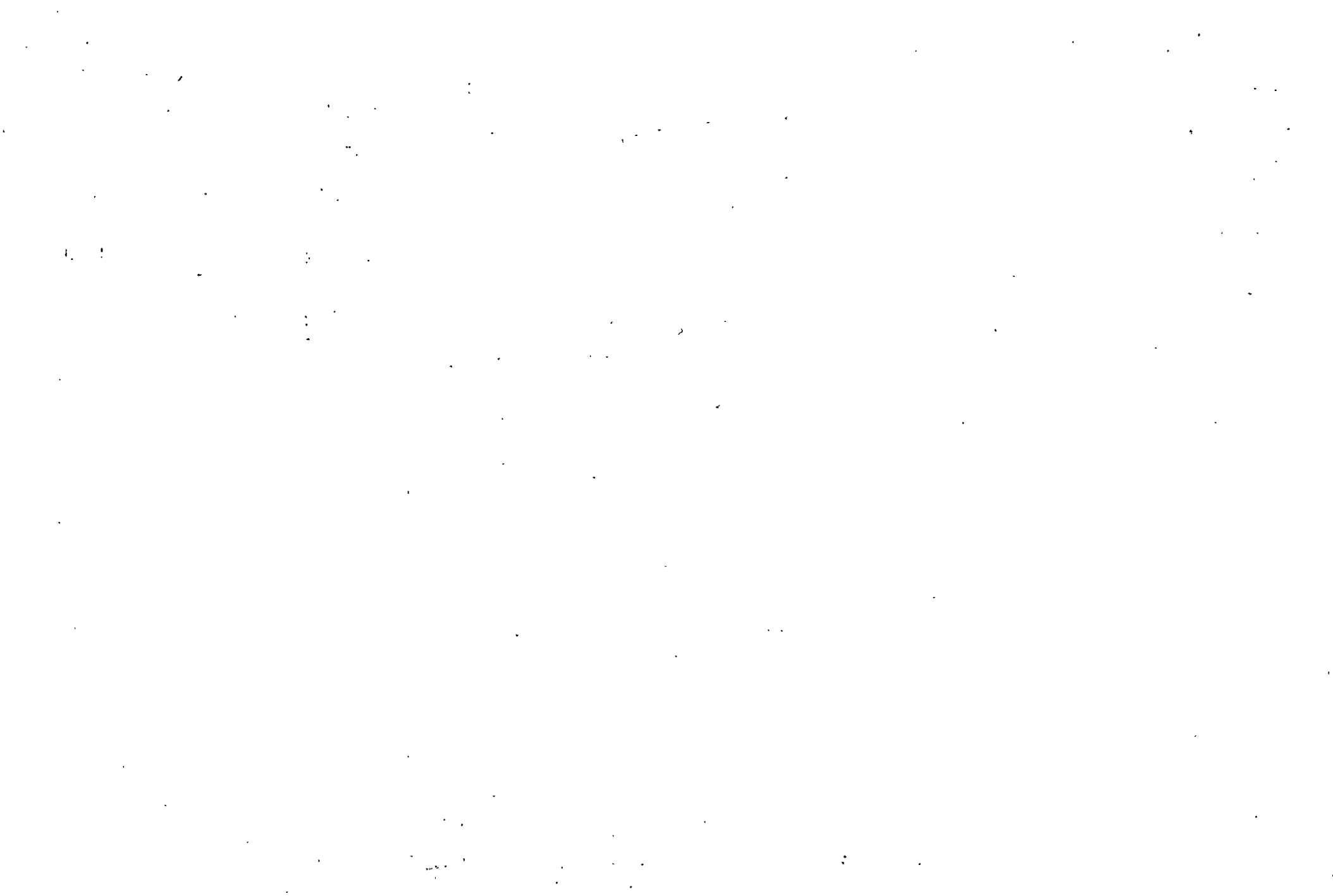


División de Educación Continua de la  
 Facultad de Ingeniería de la UNAM  
 Diplomado: "Sistemas de Calidad en Ingeniería de Proyecto y Construcción"

**Módulo II (Parte 2). Supervisión y Control de Calidad de Obras**  
 (Duración: 50 horas)

PROFESOR	TELEFONO	TEMA	FECHA	HORARIO
Raúl Vicente Orozco Santoyo	671 95 40 671 95 70 671 95 80 671 42 84 (FAX)	Introducción. Finalidad de las obras. Propiedades fundamentales de los materiales constitutivos. Casos ilustrativos: presas almacenadoras de agua, presas de jales, canales, escolleras, pavimentos, edificios, etc. Interrelación entre planeación, proyecto, construcción, supervisión, control de calidad, conservación y operación.	Lunes 13 de Octubre (4 horas)	17:00 a 18:00
		Conceptos fundamentales. Calidad. Nivel de calidad. Control de calidad. Etapas de control: previsión, acción e historia. Caso del concreto hidráulico: cartas de control; composición y consistencia del concreto tierno; resistencia del concreto endurecido.		18:00 a 20:00
		Caracterización de materiales. Relación entre compacidad, contenido de fluido (agua, asfalto o pasta aglutinante), grado de saturación y las propiedades fundamentales. Curvas isocaracterísticas. Correlación con parámetros fácilmente medibles. Criterios de aceptación, corrección y rechazo. Casos ilustrativos: suelos natural y compactado; concreto asfáltico.		20:00 a 21:00
		Secuencia de actividades para los responsables de la realización de una obra civil. Actividades inherentes al proyectista, al constructor y al controlador de calidad. Orden lógico de intervención. Importancia de su colaboración estrecha.	Martes 14 de Octubre (4 horas)	17:00 a 18:30
		Crítica de casos. Revestimientos asfálticos en canales. Pavimentos flexibles en carreteras y aeropistas. Muros de retención y cortes en general. Presas de jales.		18:30 a 21:00
Jorge Castilla Camacho	563 42 18 CONM. 229 44 00 EXT. 9510, 6514 563 10 05 (FAX)	Propiedades y pruebas de aceptación de materiales. Macizos rocosos y fragmentos de roca compactados. Suelos naturales y compactados.	Miércoles 15 de Octubre (4 horas)	17:00 a 21:00
Carlos Gómez Toledo	724 04 00 724 04 51	Concretos simple, reforzado, presforzado, compactado, lanzado y ciclópeo. Labs. Centro Tecnológico del Concreto, Toluca, Edo. Méx.	Jueves y Viernes 16 y 17 de Octubre (8 horas)	17:00 a 21:00
Rafael Limón Limón	362 04 80 362 14 21 362 19 64 362 12 14 (FAX)	Asfaltos: cementos asfálticos, asfaltos rebajados, emulsiones. Polímeros. Hule-asfalto. Programa SHRP (Strategic Highway Research Program). Labs. PACCSA, Atizapán de Zaragoza, Edo. Méx.	Sábado Lunes y Martes 18, 20 y 21 de Oct. (15 horas)	09:00 a 14:00 16:00 a 21:00
Pedro Gómez Colio	534 98 85 534 95 65 534 91 06	Mezclas asfálticas: frías (productos asfálticos) y calientes (concreto asfáltico). Alquitrán de hulla. Escoria de fundición. Labs. Dir. Gral. Servicios Técnicos, SCT, México, D.F.	Miércoles y Jueves 22 y 23 de Octubre (10 horas)	16:00 a 21:00
Jorge López Vicente	534 98 65 534 95 65 534 91 06	Otros materiales: acero, madera, geotextiles, neoprenos. Labs. Dir. Gral. Servicios Técnicos, SCT, México, D.F.	Viernes 24 de Octubre (5 horas)	16:00 a 20:30
Raúl Vicente Orozco Santoyo		Conclusiones y Recomendaciones		20:30 a 21:00





**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**“ DIPLOMADO EN SISTEMAS DE CALIDAD  
EN INGENIERÍA DE PROYECTO  
Y CONSTRUCCIÓN ”**

**MODULO II**

**CONTROL DE CALIDAD DE MATERIALES Y OBRAS**

**PARTE 2**

**SUPERVISION Y CONTROL DE CALIDAD DE OBRAS**

**TEMA:**

**INTRODUCCION**

**EXPOSITOR: M. en I. RAUL VICENTE OROZCO SANTOYO  
1997**

# **DIPLOMADO EN SISTEMAS DE CALIDAD EN INGENIERIA DE PROYECTO Y CONSTRUCCION**

## **MODULO II**

**CONTROL DE CALIDAD DE MATERIALES Y OBRAS**

### **PARTE 2**

**SUPERVISION Y CONTROL DE CALIDAD DE OBRAS**

**INSTRUCTOR: M.I. RAUL VICENTE OROZCO SANTOYO**

## **TEMARIO**

Introducción. Conceptos fundamentales. Caracterización de materiales. Secuencia de actividades para los responsables de la realización de una obra civil. Crítica de casos.

### **NOTAS DEL INSTRUCTOR**

- 1 Introducción
- 2 Conceptos fundamentales
- 3 Caracterización de materiales
- 4 Secuencia de actividades para los responsables de la realización de una obra civil
- 5 Bibliografía

Octubre de 1997



**Diplomado en Sistemas de Calidad en Ingeniería  
de Proyectos y Construcción**

**Modulo II  
Control de Calidad de Materiales y Obras**

**Parte 2  
Supervisión y Control de Calidad de Obras**

**INDICE**

<b>1. INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
1.1 Finalidad de las obras	1
1.2 Propiedades fundamentales de los materiales constitutivos	2
1.3 Interrelación entre las actividades de una obra	2
<b>2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES</b>	<b>3</b>
2.1 Calidad	3
2.2 Nivel de calidad	3
2.3 Control de calidad durante la construcción	4
2.4 Etapas de control de calidad	4
2.4.1 Etapa de previsión	4
2.4.2 Etapa de acción	5
2.4.3 Etapa de historia	6
2.4.4 Caso del concreto hidráulico	6
A) Previsión	7
B) Acción	8
C) Historia	9
D) Conclusión básica	10
E) Recomendación general	10

<b>3. CARACTERIZACION DE MATERIALES</b>	<b>10</b>
3.1 Relación entre compactación, contenido de líquido y grado de saturación	10
3.1.1 Generalidades	10
3.1.2 Definiciones	11
A) Mezcla de ingredientes	11
a) Caso de un suelo	11
b) Caso de un concreto asfáltico	11
c) Caso de un concreto hidráulico	11
B) Compactación de la mezcla (C)	11
C) Porosidad de la mezcla (n)	12
D) Relación de vacíos (e)	12
E) Peso específico (o densidad) del líquido ( $\gamma_L$ )	12
F) Contenido de líquido ( $C_L$ )	12
G) Grado de saturación con líquido ( $S_r$ )	12
H) Peso volumétrico seco ( $\gamma_d$ )	12
I) Peso volumétrico total ( $\gamma_T$ )	13
J) Peso volumétrico (o específico) del sólido ( $\gamma_s$ )	13
K) Densidad relativa (o peso específico relativo) del sólido ( $G_s$ )	13
3.1.3 Relaciones	13
3.2 Propiedades fundamentales y curvas isocaracterísticas	14
3.2.1 Diagrama CAS	14
3.2.2 Correlación con parámetros fácilmente medibles	14
3.3 Criterios de aceptación, corrección y rechazo	14
3.3.1 Caso de un suelo fino compactado	14
3.3.2 Caso de una mezcla asfáltica	15
3.3.3 Comentario general	15
<b>4. SECUENCIA DE ACTIVIDADES PARA LOS RESPONSABLES DE LA REALIZACION DE UNA OBRA CIVIL</b>	<b>16</b>
<b>5. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>17</b>

# SUPERVISION Y CONTROL DE CALIDAD DE OBRAS

Raúl Vicente Orozco Santoyo

## 1. INTRODUCCION

### 1.1 Finalidad de las obras

Lo más importante para el ingeniero civil es descubrir cuál es la finalidad de una obra, desde su gestación hasta su terminación. Normalmente se construyen las obras sin disponer de toda la información relativa a su proyecto. Por esta razón es necesario hacer una "anatomía" cuidadosa de todas las "partes" que intervienen durante la planeación, el proyecto, la construcción, la operación, el control de calidad, la conservación y la operación de la obra, con el enfoque de la calidad global.

Cuando se trata de una presa almacenadora de agua, ya sea para generación hidroeléctrica, riego o prevención de inundaciones, su finalidad será disponer de una cortina contenedora y un vaso de almacenamiento que sean impermeables, para "guardar agua". Esto quiere decir que todos los conceptos de ingeniería deberán enfocarse hacia el logro de la máxima impermeabilidad, dentro de la seguridad y la economía.

En cambio, cuando se trata de una presa de jales, que son el producto final de las plantas concentradoras de mineral, la finalidad de esta obra consiste en disponer de una cortina contenedora permeable y un vaso de almacenamiento, para "guardar residuos sólidos" con el mínimo de agua requerida para el transporte de los mismos, también dentro de la seguridad y de la economía.

En el caso de los canales construidos para los sistemas de riego, al revestirlos deberá tenerse presente la finalidad de la obra, es decir, si se requiere una capa impermeable o permeable, según la posición del nivel freático y otras características específicas que se necesiten. Esto significa que si se trata de recargar el manto acuífero, los canales deben ser permeables en su revestimiento, el cual debe permitir el flujo libre del agua, además de tener otras características de resistencia durante la operación y la conservación de los mismos. Habrán casos en que se requiera la impermeabilidad del revestimiento, independientemente del tipo de material constitutivo, ya sea concreto hidráulico o asfáltico, suelo compactado, membrana sintética enterrada o no, etc.

En el caso de las escolleras marinas, la finalidad de la obra consiste en protegerlas contra la acción de las mareas y la agresividad de las aguas salinas. Esto implica la durabilidad de los elementos constitutivos de la coraza, que viene a ser la propiedad fundamental, independientemente de su resistencia estructural intrínseca para resistir los efectos de impactos, abrasión, etc.

En el caso de los pavimentos, ya sea para aeropistas, autopistas, calles, etc., la principal finalidad de la obra es la indeformabilidad, intimamente ligada a la capacidad estructural de las capas constitutivas, para lo cual se requieren los estudios previos del terreno de cimentación y de las propiedades de resistencia y deformabilidad de los materiales constitutivos. En el caso de los pavimentos rígidos, la resistencia a la tensión por flexión de las losas de concreto hidráulico es la propiedad fundamental que domina a otras, como la durabilidad. En los pavimentos flexibles, la rigidez relativa de las capas constituye la propiedad fundamental, la cual gobierna a las otras, como la resistencia a la tensión y la durabilidad.

Otras obras, como los edificios habitacionales e instalaciones industriales, aparte de la seguridad de las mismas, tienen como finalidad fundamental la resistencia de los materiales constitutivos, principalmente a la compresión en el caso de concretos hidráulicos y a la tensión para el acero de refuerzo. Si las estructuras son completamente de acero, la compresión, la tensión y la resistencia al esfuerzo cortante son las más importantes.

## **1.2 Propiedades fundamentales de los materiales constitutivos**

Para el control de calidad de los materiales, es fundamental distinguir bien entre las propiedades básicas y las subordinadas a éstas, como se ilustra a continuación:

- La resistencia a la compresión simple o a la tensión por flexión del concreto hidráulico, estimadas en probetas convencionales, es una propiedad básica.
- El coeficiente de permeabilidad de un suelo compactado o del concreto (hidráulico o asfáltico), obtenido de permeámetros diseñados ex profeso, es una propiedad básica.
- La resistencia a la erosión del concreto hidráulico o asfáltico, estimada a partir de una prueba de desgaste convenida, es una propiedad básica.
- El contenido de agua, el grado de saturación y la compacidad de un relleno estructural, por ejemplo, son propiedades subordinadas a su módulo de rigidez o elástico (capacidad de carga y deformabilidad), que es la básica.
- El contenido de asfalto (cemento asfáltico), el grado de saturación y la compacidad de una carpeta asfáltica, también son propiedades subordinadas a su módulo de rigidez o elástico (capacidad de carga y deformabilidad), que es la básica.
- El contenido de agua, el grado de saturación y la compacidad del concreto hidráulico, además de su consistencia y composición, son propiedades subordinadas a la resistencia compresiva o a la tensión, que son las básicas.

## **1.3 Interrelación entre las actividades de una obra**

Para la construcción de las obras civiles de ingeniería, se requiere de una revisión minuciosa de los planos y las especificaciones de proyecto, una eficiente supervisión y un auténtico

control de calidad que sea ágil y oportuno, con el fin de lograr que tales obras cumplan con su propósito.

Normalmente todas las actividades de una obra (planeación, proyecto, construcción, supervisión, control de calidad, conservación y operación) se desarrollan con cierta independencia, lo cual da motivo a deficiencias y conflictos innecesarios entre los responsables de esas actividades. Esto se evita con un sistema integrado de acciones de retroalimentación constante, con actitud siempre positiva, para que realmente se logre la "estabilidad" de una obra civil (Lámina 1).

## **2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES**

### **2.1 Calidad**

El concepto de "calidad" tiene que estar presente en todas las actividades, desde que se gesta y concibe la idea (obra) hasta que se realiza, y aún después. Debe "infiltrarse" en todas las personas que de un modo u otro intervienen en el logro de una obra y "reflejarse" claramente en sus actitudes, durante el proyecto, la construcción, la supervisión, el control de calidad, la conservación y la operación de la misma.

De acuerdo con el diccionario de la Lengua Española (Real Academia Española XIX, edición 1970), el término calidad viene "Del latín Qualitas-atés: Propiedad o conjunto de propiedades inherentes a una cosa, que permiten apreciarla como igual, mejor o peor que las restantes de su especie".

### **2.2 Nivel de calidad**

El nivel de calidad lo define el responsable de la planeación de la obra, para que el proyectista lo establezca y el constructor lo asegure, el supervisor lo verifique, y el controlador de calidad lo certifique, de manera que los responsables de la conservación y la operación vigilen y mantengan respectivamente ese nivel de calidad estipulado, tanto en geometría y acabados como en materiales y procedimientos constructivos (Lámina 2).

El nivel de calidad viene siendo el conjunto de características cualitativas y cuantitativas que deben satisfacer los materiales, las instalaciones y los componentes de la obra, en los aspectos de resistencia a las cargas por soportar, asentamientos totales y diferenciales, deformaciones, geometría, apariencia, durabilidad, capacidad de carga, etc.

En el caso de los materiales, el nivel de calidad implica el establecimiento del criterio (o los criterios) de aceptación, corrección y/o rechazo, mediante el valor medio de la característica a medir (compacidad, humedad, resistencia, permeabilidad, etc.) y su desviación estándar o coeficiente de variación (como medidas de dispersión de valores), así como la probabilidad de falla en los ensayos (cada ensayo es el promedio de 2 valores, como mínimo, de la propiedad o característica medida). El nivel de calidad deseado lo complementan en la práctica las variaciones permisibles, en más o en menos, con respecto al valor medio requerido de la característica a medir.

## **2.3 Control de calidad durante la construcción**

El control de calidad consiste, en certificar que durante el proceso constructivo se vaya asegurando el nivel de calidad establecido, especialmente en el producto ya terminado.

El control de calidad debe incluir todas las operaciones inherentes al muestreo, el ensaye, la inspección y la selección de materiales, previamente a, y durante la ejecución de la obra, para asegurar que el procedimiento constructivo satisfaga las exigencias de la misma. En el transcurso de la construcción, el controlador de calidad (responsable del control de calidad) deberá realizar la inspección, el muestreo y los ensayos necesarios, en todas sus etapas, para que se logre el nivel de calidad deseado en los diversos conceptos de obra involucrados. Además, tiene que suministrar información oportuna al responsable de la construcción para que, con debido conocimiento, actúe en plan correctivo, oportuno y eficaz, a fin de evitar defectos en métodos constructivos.

De lo anteriormente expuesto, se puede establecer que el control de calidad es el sistema integrado de actividades, factores, influencias, procedimientos, equipos y materiales, que afectan al establecimiento y, posteriormente, al logro del nivel de calidad estipulado, para que la obra cumpla con su propósito.

## **2.4 Etapas de control de calidad**

El control de calidad implica un mecanismo ágil y oportuno que permite satisfacer el nivel de calidad establecido. Para esto, es muy pertinente distinguir 3 etapas básicas de control (Previsión, Acción e Historia) que están implícitas, pero que conviene separarlas en secuencia, de acuerdo con los enfoques racionales del auténtico control de calidad.

El control de calidad debe llevarse en cada una de estas etapas y en todas las actividades de la obra, según se ilustra en la Tabla 1 y se explica a continuación:

### **2.4.1 Etapa de previsión**

Se refiere a las actividades en que se pueden escoger los materiales antes de su explotación, transporte, mezcla, colocación, "bandeo" y/o compactación. En otras palabras, el control de calidad de los materiales antes de la construcción servirá para aceptarlos como ingredientes separados y es muy conveniente que esto ocurra precisamente en las fuentes de suministro, para evitar desperdicios en tiempo, dinero y energía. ¿Para qué aceptar un material al "pie de la obra", cuando se sabe que está "defectuoso" desde su origen? Si los materiales son aceptados antes de su transporte, también deben serlo en el sitio de construcción o en la planta de procesamiento o mezclado, a no ser que sean "contaminados" por descuido con otros materiales o materias extrañas. Es obvio que en esta etapa se presenta la única oportunidad de aceptar, desechar o mejorar los materiales previamente a la construcción.

Las cartas de control son magníficos auxiliares para satisfacer los niveles de calidad establecidos en el proyecto. Estas deberán actualizarse diariamente para cada parámetro básico que se estipule (contenidos de grava, arena y finos; humedades en el banco y en el sitio; índice

plástico y límites de consistencia: líquido y plástico; contracción lineal y equivalente de arena; módulos de finura de la grava y la arena; tamaños máximos y mínimos de los fragmentos de roca; coeficientes de uniformidad y curvatura de la grava-arena; contenido de partículas deleznable o deleznable; pesos volumétricos, densidades y absorciones; etc.).

Respecto a los estudios previos de los bancos, que incluyen su potencialidad y variabilidad, deberán incluirse por rutina los aspectos geológicos y los análisis petrográficos de los materiales para juzgar la durabilidad del concreto (hidráulico o asfáltico) o capas compactadas (balasto de ferrocarril, bases de pavimento, rellenos estructurales, enrocamientos en presas, revestimientos en canales, etc.). En las losas de concreto hidráulico, algunas veces ocurre que los agregados son reactivos con los álcalis del cemento Portland. En otros casos, la carpeta asfáltica se deteriora y desintegra paulatinamente porque confundimos los basaltos recientes con las andesitas o los basaltos muy antiguos que, a veces, contienen minerales expansivos (tipo zeolita), los cuales son muy ávidos de agua y rompen súbitamente a los agregados.

En esta etapa se deben conocer a fondo y mucho antes de la construcción, las dosificaciones básicas de los ingredientes, acordes con el equipo e instalaciones seleccionados.

#### **2.4.2 Etapa de acción**

Se refiere a la verdadera actividad de aceptación, corrección y/o rechazo durante la construcción. Una vez que se han aceptado los ingredientes separados en la etapa anterior (previsión), se procede al mezclado de los mismos, actividad que define el momento de inicio al proceso constructivo, el cual no debe interrumpirse sino terminarse. En esta etapa no se deben rechazar los materiales separados, es decir, los ingredientes ya pueden mezclarse. En el caso de capas compactadas, a partir de tramos de prueba, que incluyan correlaciones entre el número de pasadas del equipo compactador y las deflexiones con la viga Benkelman o el deformómetro por impacto, en esta etapa se decide si se logra el acomodo o la compacidad deseada, para proceder a los ajustes pertinentes durante la ejecución de la obra.

Las cartas de control deberán estar disponibles en el momento de la ejecución y tendrán que marcarse con claridad las zonas de aceptación, corrección y rechazo, para llevar continuamente las gráficas de tendencias de los últimos 5 valores consecutivos de cada parámetro. Todas las cartas de control deberán tenerse siempre en la obra y actualizarse diariamente para que el control de calidad sea ágil y oportuno. Esto requiere el apoyo de equipos de medición avanzados en tecnología, para que proporcionen datos inmediatamente después del proceso constructivo, como los medidores nucleares de pesos volumétricos, humedades y contenidos de cemento asfáltico. En el caso del concreto hidráulico tradicional (plástico), el concreto compactado con rodillo (CCR) o las sub-bases rigidizadas con cemento Portland (SBR), se recomiendan las pruebas de "inmersión" para conocer rápidamente la composición de las mezclas, efectuadas además de los ensayos rutinarios convencionales, porque permite corregirlas casi de inmediato al compararlas con la "mezcla patrón".

### 2.4.3 Etapa de historia

Se refiere al registro histórico de la información requerida por el proyecto, después de que el proceso constructivo ha concluido. En la etapa anterior (acción), la aceptación y/o el rechazo deberán ocurrir precisamente en el momento de la construcción y no después.

Las cartas de control relativas a la etapa de historia se requieren para análisis estadísticos e informes y son útiles también para retroalimentar al proyecto.

### 2.4.4 Caso del concreto hidráulico

En la Lámina 3 se sugiere un sistema para satisfacer el nivel de calidad establecido por el proyectista, que debe asegurar el constructor mediante la certificación que el controlador de calidad le proporciona.

No basta que el proyectista fije sólo la resistencia de proyecto ( $f'_c$ ), que es lo más usual, sino que es necesario fijar, además, la probabilidad de falla en los ensayos ( $P_f$ ). Por ejemplo, si  $f'_c=200 \text{ kg/cm}^2$ , es necesario saber si de cada cinco ensayos (teoría elástica) o de cada diez (teoría plástica), puede fallar uno, o bien, según la importancia del elemento estructural, por ejemplo, en las losas de una banqueta se podría permitir que de cada tres ensayos fallara uno ( $P_f=1/3$ ) o, si se trata de una trabe maestra de gran importancia, podría adoptarse un valor de  $P_f=1/20$  a  $1/100$ , según lo considere el proyectista.

Ahora bien, el constructor de la obra debe asegurar una resistencia media requerida ( $f_{cr}$ ) evidentemente mayor que la resistencia de proyecto ( $f'_c$ ). Con el apoyo del controlador de calidad se fijará la mezcla de diseño ( $M_d$ ), según el coeficiente de variación total ( $V_t$ ) obtenido durante la construcción, que representa una medida de la dispersión de los resultados.

En la Lámina 4 se observa que, para una resistencia de proyecto dada ( $f'_c=200 \text{ kg/cm}^2$ ) y una probabilidad de falla en los ensayos determinada ( $P_f=1/5$ ), a mayor coeficiente de variación ( $V_t=0.10$  a  $0.20$ ) se necesita una mayor resistencia media requerida ( $f_{cr}=218$  a  $240 \text{ kg/cm}^2$ ). En otras palabras, mientras menor control de calidad haya durante la construcción, mayor será el coeficiente de variación total ( $V_t$ ), según se ilustra en la Lámina 5, donde puede observarse que el mayor grado de uniformidad del concreto se logra con el menor valor de  $V_t$ .

Para facilitar el cálculo de  $f_{cr}$ , en la Lámina 6 se presenta la relación gráfica entre los conceptos anteriormente mencionados. Como ejemplo, para  $V_t=0.15$  y  $P_f=1/5$ ,  $f_{cr}/f'_c=1.15$ . Si  $f'_c=200 \text{ kg/cm}^2$ , entonces  $f_{cr} = 230 \text{ kg/cm}^2$ . Por lo tanto la mezcla de diseño ( $M_d$ ) será sugerida por el controlador de calidad al constructor, para lograr una resistencia media requerida ( $f_{cr}$ ) de  $230 \text{ kg/cm}^2$ .

Una vez que se tiene seleccionada la mezcla de diseño ( $M_d$ ), el controlador de calidad debe proceder por "Etapas" y "Niveles", tal como se ilustra en la Lámina 7 y se explica a continuación:



## **A) Previsión**

El primer nivel de control corresponde a la etapa de PREVISION de los ingredientes separados, para su aceptación o rechazo. Esto se logra mediante los indicadores o parámetros más relevantes, aplicados a las cartas de control, como los sugeridos en la Lámina 8.

Para el caso de la arena, en las Láminas 9 y 10 se presentan dos ejemplos de cartas de control, correspondientes al módulo de finura y al contenido de finos, respectivamente.

En la Lámina 9 se observa que la gráfica de tendencias está dentro de la zona de aceptación. Cada punto representa, no el valor individual, sino el promedio de los cinco últimos valores consecutivos de los ensayos durante el proceso continuo. En la Lámina 10 se nota que la gráfica de tendencias ha entrado prácticamente a la zona de aceptación.

Lo importante de la PREVISION del controlador de calidad estriba en tomar las medidas correctivas oportunas, para tratar de mantener el ingrediente dentro de la zona de aceptación. En caso de que la gráfica de tendencias entre a la zona de corrección, no debe suspenderse el proceso constructivo continuo (producción) hasta que entre marcadamente a la zona de rechazo.

Para el caso de la grava, en las Láminas 11 y 12 se presentan dos ejemplos de cartas de control correspondientes al módulo de finura y al contenido de arena, respectivamente. Este último indicador es importante porque es indeseable tener variaciones en la relación grava/arena que afecten la homogeneidad del concreto.

En la Lámina 11 se observa que la gráfica de tendencias ha entrado a la zona de aceptación. En cambio, en la Lámina 12 hubo interrupciones en el proceso constructivo continuo, debido a que la gráfica de tendencias entró a la zona de rechazo (muestra # 7) y se reinició el cribado, pero dentro de la zona de corrección, hasta que éste realmente se hizo efectivo a partir de la muestra # 27 en que la gráfica de tendencias entró a la zona de aceptación.

Se hace notar que los límites de aceptación, corrección y rechazo deben establecerse claramente en el proyecto. De no ser así, deben fijarse de común acuerdo entre el constructor y el propietario de la obra, a través de sus respectivos responsables de supervisión y control de calidad.

Para el caso del cementante (Lámina 8), que puede ser cemento, solo o mezclado con puzolana, ceniza, etc., se pueden llevar cartas de control similares a las expuestas y relativas a "indicadores" sensibles, como la resistencia compresiva en morteros convencionales, que sirve fundamentalmente para conocer indirectamente las variaciones en las propiedades mecánicas que el cementante imparte a la pasta aglutinante y juzgar indirectamente su sanidad o grado de deterioro.

Para el caso del agua y los aditivos, se aplican también cartas de control similares.

En esta etapa de PREVISION, que corresponde al primer nivel de control, deben satisfacerse los criterios de aceptación. Si no se satisfacen, no puede continuarse al segundo y tercer nivel de control en que los ingredientes ya están mezclados (Etapa de acción).

## **B) Acción**

Tanto el segundo como el tercer nivel de control se refieren a la etapa de ACCION, cuando el concreto está tierno.

En el segundo nivel debe controlarse la consistencia del concreto mediante la prueba de revenimiento, u otra similar.

En cada colado se debe disponer de una carta de control para llevar la gráfica de tendencias dentro de la zona de aceptación. En la Lámina 13 se presenta una carta de control para el caso del revenimiento medido en la forma, en donde se muestran los valores medios para 30 ensayos consecutivos y el coeficiente de variación medio correspondiente. Se nota que la gráfica de tendencias está en la zona de aceptación y el coeficiente de variación medio en la de rechazo, aunque éste tiende a entrar a la zona de corrección, lo cual refleja una mejora gradual en la homogeneidad del concreto; estas cartas de control se deben llevar tanto en la revolvedora (planta) como en la forma (obra). Además, sirven para conocer la pérdida de agua durante el transporte y la colocación del concreto, a fin de hacer los ajustes pertinentes desde la revolvedora. El número de pruebas de revenimiento depende de los volúmenes por colar y de la distribución aleatoria de las mismas.

El tercer nivel se refiere a la composición del concreto, es decir, al balance de ingredientes en el concreto ya colocado y vibrado, que se puede conocer mediante la "prueba de inmersión".

A grandes rasgos, la "prueba de inmersión" consiste en lo siguiente:

Se toma una muestra representativa del concreto vibrado en el lugar y se pesa al aire. Luego se vacía la muestra en un recipiente cilíndrico y se agrega agua para separar los ingredientes. Se agita con una varilla hasta expulsar todo el aire atrapado. Se dejan reposar los ingredientes y se llena de agua el resto del recipiente hasta enrasarlo. Se pesa el concreto sumergido. Se separa la grava por la malla # 4 mediante lavado y se pesa sumergida. Se separa la arena por la malla # 100 y se pesa sumergida junto con la grava.

Aplicando el principio de Arquímedes y tomando en cuenta todos los datos obtenidos, más el contenido de finos de la arena (que son las partículas que pasan la malla # 100), es posible conocer la cantidad de grava, arena, cemento y agua que componen la unidad de volumen del concreto. En otras palabras, se puede conocer la composición real del concreto "in situ" y compararla con la dosificación de la mezcla de diseño ( $M_d$ ).

Aquí es donde la etapa de ACCION juega el papel más importante en el control de calidad. Aunque en una planta se esté controlando por peso la dosificación de los ingredientes, durante el transporte, la colocación y el vibrado puede haber modificación o segregación de los mismos y "se presume que el concreto satisface el nivel de calidad estipulado . . ."

Si se efectúa la "prueba de inmersión", se podrá saber si el concreto ya vibrado en la forma satisface ese nivel de calidad para que, en caso contrario, se tomen a tiempo las medidas correctivas y se logre que los ingredientes del concreto ocupen el espacio que les corresponde.

La "prueba de inmersión" puede hacerse también con muestras tomadas de la revolvedora, para conocer principalmente la eficiencia del mezclado. En la Lámina 14 se muestran los principales indicadores que conviene controlar.

En la Lámina 15 se presentan los resultados de una "prueba de inmersión" del concreto tomado en la forma. Se observa que durante el colado se fueron tomando medidas correctivas para lograr el acomodo y el balance de los ingredientes dentro de la masa de concreto.

Ahora bien, cabe hacer la siguiente reflexión:

Si el concreto en la forma satisface la mezcla de diseño ( $M_d$ ) y se toman las medidas necesarias para que el concreto tierno alcance su resistencia con el tiempo, mediante el correcto curado del concreto, ¿es necesario tomar muestras para conocer la resistencia del concreto endurecido?

Al finalizar un colado basta que el responsable del control de calidad constate que el trabajo fue exitoso y se anime a certificar de inmediato los resultados obtenidos, es decir, el nivel de calidad establecido por el proyectista. De esta manera el controlador de calidad se puede "ir a dormir tranquilo" después de un colado.

Aquí termina la etapa de ACCION, que viene a ser el auténtico Control de Calidad.

Para continuar con los demás niveles de control, que corresponden a los ingredientes mezclados, pero del concreto ya endurecido, es necesario entrar a la etapa de HISTORIA (niveles cuarto a séptimo).

### **C) Historia**

El cuarto nivel de control se refiere a la resistencia del concreto a partir de probetas tomadas principalmente de la forma, ya sea a las 48 horas de edad, o menos (por medio del curado acelerado a vapor o el autógeno), con el fin de conocer anticipadamente la resistencia a 28 días de edad u otra (quinto nivel de control). En la Lámina 16 se presenta una correlación entre resistencias compresivas a 2 y 28 días que sirven de ejercicio "histórico", pero no es control de calidad oportuno, ni ágil. Conocer la resistencia anticipadamente después de un colado viene a ser HISTORIA, que es conveniente para la obra, pero no sirve para certificar el nivel de calidad.

El quinto nivel de control se refiere a la resistencia a 28 días de edad (u otra) de probetas de concreto curadas convencionalmente y tomadas principalmente de la forma. En la Lámina 17 se presenta la carta de control correspondiente a la resistencia compresiva a 28 días. En las Láminas 18 y 19 se presentan las cartas de control que corresponden, respectivamente, a la flexión (módulo de ruptura) a 7 y 28 días.

La terminación de un colado indica, que en los diversos "niveles", las cartas de control estuvieron bien aplicadas. Cuando se presenten problemas de resistencia, se acude a las pruebas indirectas (esclerómetro) o directas (corazones), que corresponden a los niveles de control sexto y séptimo indicados en la Lámina 7, para decidir si se demuele o no un elemento de concreto. ¿Para qué llegar a esto, si es fácil aceptar el elemento recién colado? (Prueba de Inmersión).

#### **D) Conclusión básica**

No es necesario tomar probetas cilíndricas del concreto hidráulico para ensayarse a la compresión simple, ni a los 28 días, ni a edades menores, ya que si el concreto vibrado en la forma tiene la dosificación de proyecto ("prueba de inmersión"), hay una probabilidad muy grande de que se logre la resistencia esperada.

#### **E) Recomendación general**

Para finalizar, conviene hacer hincapié en que cada uno de los que participan en el proceso constructivo del concreto hidráulico, deben desarrollar sus actividades con la mayor eficiencia posible, como la correcta ejecución de las pruebas de laboratorio y, principalmente, la observación de los resultados; el vibrado efectivo; la aplicación correcta y oportuna del agua y la membrana para el curado; el ranurado completo y oportuno de las losas de concreto para el control del agrietamiento; etc.

### **3. CARACTERIZACION DE MATERIALES**

#### **3.1 Relación entre compacidad, contenido de líquido y grado de saturación**

##### **3.1.1 Generalidades**

Con un enfoque geotécnico puro, el ingeniero civil puede tratar con facilidad muchos materiales, como el suelo (natural o compactado), la roca (natural o en fragmentos compactados), el concreto (asfáltico o hidráulico), etc. Es posible unificar el comportamiento de estos materiales mediante la aplicación del concepto de compacidad, íntimamente relacionado con el contenido de líquido y el grado de saturación. Todos estos conceptos están inspirados en los esquemas gravimétricos de la mecánica de suelos.

Desde el punto de vista geotécnico, es muy conveniente unificar el concepto estructural de los materiales, de acuerdo con las definiciones siguientes:

### 3.1.2 Definiciones

#### A) Mezcla de ingredientes

Es la unión de partículas sólidas con o sin líquido (agua o asfalto) y gas, homogéneamente distribuidas por un proceso.

##### a) Caso de un suelo

La parte sólida se refiere a las partículas secas del suelo, incluyendo el agua molecular absorbida. La parte líquida corresponde al agua libre o la capilar. La parte gaseosa se refiere a los vacíos llenos de aire o cualquier otro gas.

##### b) Caso de un concreto asfáltico

La parte sólida corresponde a las partículas de agregado grueso y fino, totalmente secas. La parte líquida consiste en el cemento asfáltico puro. La parte gaseosa se refiere a los huecos llenos de aire o cualquier otro gas.

Téngase presente que, realmente, la parte líquida puede ser semilíquida, semisólida o sólida, según la "vida" del concreto asfáltico o las condiciones climatológicas actuantes.

##### c) Caso de un concreto hidráulico

La parte sólida está constituida por el cementante y por los agregados grueso y fino, totalmente saturados y superficialmente secos; el agua incluida dentro de las partículas es únicamente la de absorción. La parte líquida corresponde al agua de mezclado, la cual se combinará con el cementante (reacción química). Algunos aditivos pueden quedar incluidos en esta parte líquida. La parte gaseosa se refiere a las burbujas de aire incluidas ex profeso o generadas durante el mezclado.

Es importante considerar que la concepción de las partes sólida, líquida y gaseosa, en el concreto hidráulico, es válida solamente para el concreto tierno, ya que una vez que se han iniciado las reacciones de fraguado, la parte líquida se transformará gradualmente en sólida y gaseosa.

#### B) Compacidad de la mezcla (C)

Es la relación entre el volumen de la parte sólida ( $V_s$ ) y el volumen de todas las partes (volumen total,  $V_T$ ).

$$C = \frac{V_s}{V_T} \quad (1)$$

### C) Porosidad de la mezcla (n)

Es la relación entre el volumen de la parte líquida más la gaseosa (volumen de vacíos,  $V_v$ ) y el volumen total ( $V_T$ ).

$$n = \frac{V_v}{V_T} \quad (2)$$

### D) Relación de vacíos (e)

Es la relación entre el volumen de vacíos ( $V_v$ ) y el volumen de sólidos ( $V_s$ ).

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (3)$$

### E) Peso específico (o densidad) del líquido ( $\gamma_L$ )

Es la relación entre el peso de la parte líquida ( $W_L$ ) y el volumen correspondiente ( $V_L$ ).

$$\gamma_L = \frac{W_L}{V_L} \quad (4)$$

### F) Contenido de líquido ( $C_L$ )

Es la relación entre el peso de la parte líquida ( $W_L$ ) y el peso de la parte sólida ( $W_s$ ).

$$C_L = \frac{W_L}{W_s} \quad (5)$$

### G) Grado de saturación con líquido ( $S_r$ )

Es la relación entre el volumen de la parte líquida ( $V_L$ ) y el volumen de vacíos ( $V_v$ ).

$$S_r = \frac{V_L}{V_v} \quad (6)$$

### H) Peso volumétrico seco ( $\gamma_d$ )

Es la relación entre el peso de la parte sólida ( $W_s$ ) y el volumen total ( $V_T$ ).

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_T} \quad (7)$$

### I) Peso volumétrico total ( $\gamma_T$ )

Es la relación entre el peso de las partes sólida más la líquida (peso total,  $W_T$ ) y el volumen total ( $V_T$ ).

$$\gamma_T = \frac{W_T}{V_T} \quad (8)$$

### J) Peso volumétrico (o específico) del sólido ( $\gamma_s$ )

Es la relación entre el peso de la parte sólida ( $W_s$ ) y el volumen de sólidos ( $V_s$ ).

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (9)$$

### K) Densidad relativa (o peso específico relativo) del sólido ( $G_s$ )

Es la relación entre el peso volumétrico del sólido ( $\gamma_s$ ) y el peso específico del líquido ( $\gamma_L$ ).

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_L} \quad (10)$$

Estas definiciones están representadas esquemáticamente en la Lámina 20.

### 3.1.3 Relaciones

Las relaciones principales entre "C", "n" y "e", son las siguientes:

$$C + n = 1 \quad (11)$$

$$C = \frac{1}{1 + e} \quad (12)$$

$$C = \frac{n}{e} \quad (13)$$

$$C = \frac{\gamma_d}{\gamma_s} = \frac{\gamma_d}{G_s \gamma_L} \quad (14)$$

$$C = \frac{1}{1 + \frac{C_L}{S_r} G_s} \quad (15)$$

## 3.2 Propiedades fundamentales y curvas isocaracterísticas

### 3.2.1 Diagrama CAS

La representación gráfica de la Ec. 15 se designa como el diagrama CAS [Compacidad-Contenido de Agua o Asfalto-Grado de Saturación]. En la Lámina 21 se presenta el caso para  $G_s=2.55$ .

El diagrama CAS tiene aplicaciones prácticas para muchos materiales, ya sean rocas, suelos con o sin cementantes hidráulicos, o bien, mezclas con agua o asfalto para aglutinar, etc., ya que en dicho diagrama se pueden ubicar los estados o condiciones iniciales o finales de esos materiales y, además, se pueden trazar las curvas de igual propiedad fundamental (isocaracterísticas).

### 3.2.2 Correlación con parámetros fácilmente medibles

Mediante el diagrama CAS es posible localizar con un punto la posición correspondiente a la condición inicial de un material, definido por sus propiedades índice ( $C$ ,  $C_L$ ,  $S_r$ ), que son parámetros fácilmente medibles. Entonces, la propiedad básica de interés se anota a un lado del punto y se trazan las curvas de igual valor ("isocaracterísticas").

Esta representación conduce a un mejor entendimiento de las interrelaciones que hay entre las propiedades índice ( $C$ ,  $C_L$ ,  $S_r$ ) y las fundamentales.

## 3.3 Criterios de aceptación, corrección y rechazo

Para ilustrarlos, a continuación se presentan dos ejemplos:

### 3.3.1 Caso de un suelo fino compactado

En este caso se puede establecer que los cambios volumétricos unitarios ( $\Delta V/V_o$ ) sean menores de cierto valor (4 %) y la resistencia a la compresión simple ( $q_u$ ) sea mayor que otro valor ( $9 \text{ t/m}^2$ ), para optimizar simultáneamente las propiedades de estabilidad volumétrica y resistencia al esfuerzo cortante del suelo; es decir, "sacarle jugo".

Para obtener la zona de aceptación combinada, se trazan las curvas de igual cambio volumétrico unitario en el diagrama  $CAS_1$  y se delimita la zona de rechazo (Lámina 22); similarmente, también se delimita la zona de rechazo para las curvas de igual resistencia en el diagrama  $CAS_2$  (Lámina 23). Después, se empalma el diagrama  $CAS_2$  sobre el  $CAS_1$  y se define la zona de aceptación combinada que satisface simultáneamente los dos criterios:

- a)  $\Delta V / V_o < 4 \%$
- b)  $q_u > 9 \text{ t/m}^2$



Finalmente, en un diagrama CAS se dibuja la zona de aceptación y se establecen los criterios correspondientes:

- a)  $58.5 \% \leq C \leq 67.5 \%$
- b)  $18 \% \leq C_L \leq 21 \%$

Lo anterior se ilustra en la Lámina 24, la cual constituye una carta de control bidimensional.

### 3.3.2 Caso de una mezcla asfáltica

En este caso interesa la rigidez de la mezcla asfáltica, estimada mediante el módulo Marshall, según se define enseguida:

$$M_M = \frac{S}{f t} \quad (16)$$

- $M_M$  = módulo Marshall,  $\text{kg/cm}^2$
- $S$  = estabilidad Marshall, kg
- $f$  = flujo, cm
- $t$  = espesor del espécimen, cm

Las curvas de igual módulo Marshall ("isocaracterísticas") se han trazado en el diagrama CAS correspondiente (Lámina 25), para lo cual se efectuaron pruebas con diferentes contenidos de cemento asfáltico ( $4\% < C_L < 8\%$ ) y energías de compactación ( $25 \leq N \leq 150$ ); N representa el número de golpes / cara en los especímenes Marshall.

Los criterios de aceptación propuestos, fueron:

- a)  $75 \% \leq S_r \leq 85 \%$
- b)  $700 \text{ kg/cm}^2 \leq M_M \leq 1,000 \text{ kg/cm}^2$

Lo anterior corresponde a los criterios de aplicación práctica siguientes:

- a)  $82 \% \leq C \leq 84 \%$
- b)  $6.3 \% \leq C_L \leq 6.9 \%$

Esto conviene representarlo en una carta de control bidimensional, como la ilustrada en la Lámina 26.

### 3.3.3 Comentario general

Los criterios de aceptación y rechazo aquí esbozados para el concreto asfáltico, tienen un apoyo sólido de laboratorio, pero es conveniente insistir en la necesidad de obtener información experimental a escala natural, a fin de conocer el comportamiento de los materiales con la es-

estructura real que resulta de utilizar los equipos de construcción habituales. Por ejemplo: un módulo Marshall de laboratorio ( $600 \text{ kg/cm}^2$ ) es superior al obtenido de un "corazón" en el campo ( $200 \text{ kg/cm}^2$ ).

Cuando se tengan datos suficientes, podrán establecerse los criterios de aceptación que se acerquen más a la realidad.

#### **4. SECUENCIA DE ACTIVIDADES PARA LOS RESPONSABLES DE LA REALIZACIÓN DE UNA OBRA CIVIL**

Como ya se soslayó en el Capítulo 1, el fracaso de muchas obras civiles se debe básicamente a la falta total o parcial de conocimiento, observación, entendimiento y comunicación entre los responsables de las mismas (proyectista, supervisor, constructor, controlador de calidad, etc.). Por esta razón conviene resaltar las actividades inherentes a estos responsables, tomando en cuenta el orden lógico de su intervención y la importancia de su colaboración estrecha.

Por ejemplo, cuando de suelos finos se trata, el proyectista normalmente fija el nivel de calidad con el criterio del "mínimo" de compactación y, por desconocer el comportamiento de los suelos compactados, logra que el constructor fabrique y asegure, "sin querer" o por ignorancia, una estructura peligrosa; en otras palabras, transforma un suelo "noble" en "rebelde". Y lo que es más, el controlador de calidad y el supervisor se encargan, respectivamente, de certificar y verificar esta aberración.

En cambio, si el proyectista correlacionara las propiedades básicas del suelo compactado (estabilidad volumétrica y resistencia al esfuerzo cortante) con parámetros fácilmente medibles (compacidad y humedad), podrían establecerse racionalmente los criterios de aceptación, corrección y rechazo, tomando en cuenta la opinión del experto en construcción y efectuando tramos de prueba como el ilustrado en la Lámina 27. De esta manera se aprovecharía mejor el material y el equipo que proponga el constructor y, por otra parte, el control de calidad sí tendría entonces mayor razón de ser.

Para finalizar, conviene insistir en que, para cada caso particular, se establezca el sistema detallado de supervisión y control de calidad propio de la obra, donde deben intervenir también el proyectista y el constructor. Es importante definir las principales actividades de los responsables de la obra (Tabla 2), así como la secuencia más recomendable de las mismas (Tabla 3).

## 5. BIBLIOGRAFIA

Orozco y Orozco, José Vicente (1970-1986). Escritos inéditos y comunicaciones personales. México, D.F.

Orozco Santoyo, Raúl Vicente (1977). "Reflexiones sobre Control de Calidad". Revista Mexicana de Ingeniería y Arquitectura, Vol. LVI, N°. 2. Asociación de Ingenieros y Arquitectos de México (AIAM). México, D.F.

Orozco S., R.V. (1978). "Compactación y Control de Calidad". IX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Tomo I. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (SMMS). Mérida, Yuc.

Orozco S., R.V. (1979). "Comentarios en el..." Simposio Internacional de Mecánica de Suelos. Vol. 2., SMMS. Oaxaca, Oax.

Orozco S., R.V. (1980). "Criterios Básicos de Control de Calidad". Asociación Mexicana de Caminos (AMC). México, D.F.

R. V. Orozco y Cía., S.A. de C.V. (1986). "Control de Calidad en el Aeropuerto de Mazatlán, Sin." Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA). México, D.F.

Orozco Santoyo, Raúl Vicente (1986). "Construcción y Control de Calidad de Pavimentos." XIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Vol. I, Mazatlán, Sin.

Orozco S., R.V. y Torres Verdín, Víctor (1986). "Criterios de Aceptación para Mezclas Asfálticas". XV Congreso Panamericano de Carreteras (PIARC), Tomo II, México, DF.

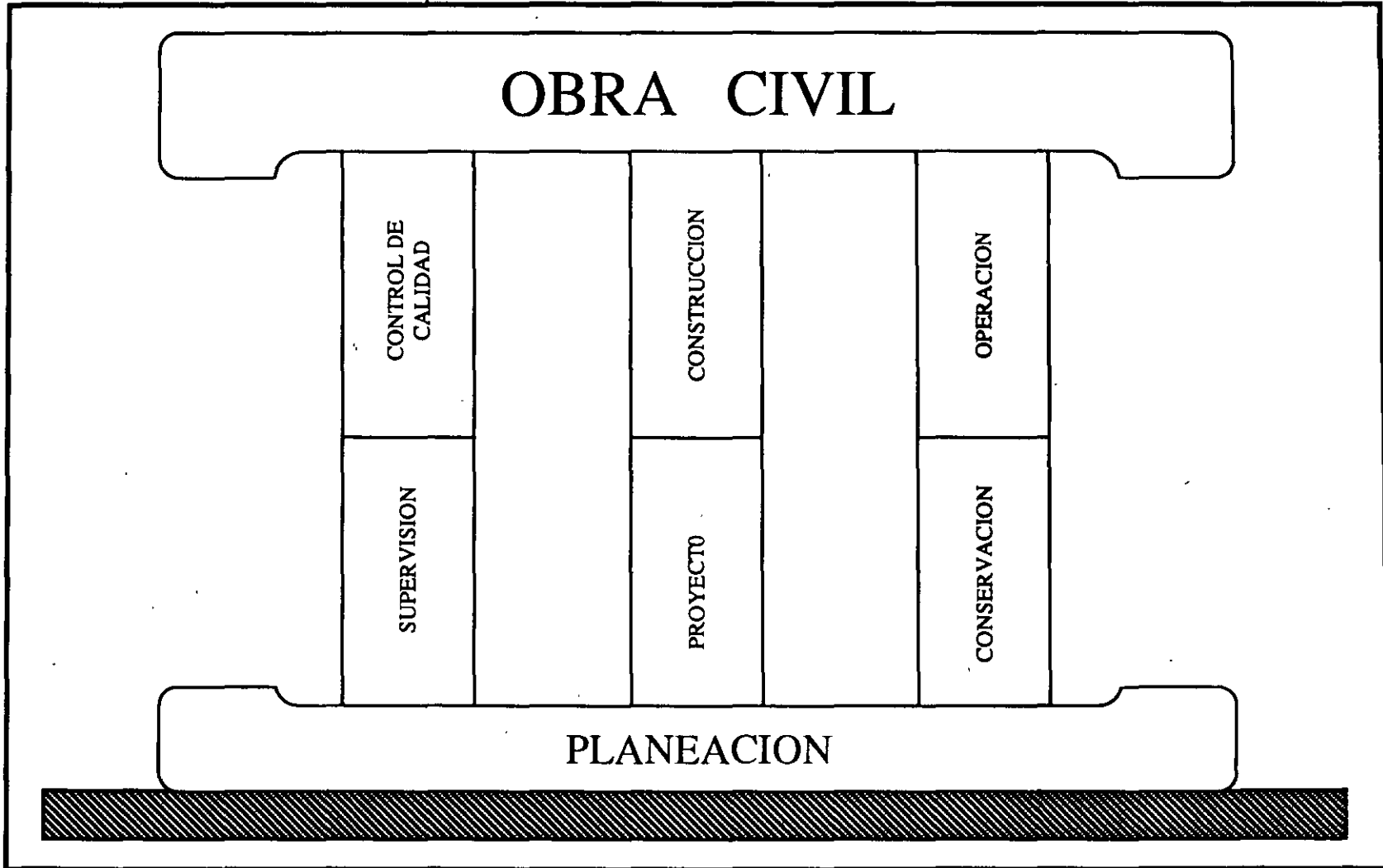
Orozco S., R.V. (1996). El Concepto "Calidad en las Vías Terrestres", XII Reunión Nacional de Vías Terrestres (AMIVTAC), San Luis Potosí, S.L.P.

Orozco S., R.V. (1996). "Control de Calidad Geotécnico y Diseño de Normas", Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, Qro.

Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos (1997). Lineamientos de Supervisión de Obra Pública.

Orozco S., R.V. (1997). "Supervisión y Control de Calidad de Obras", Diplomado en Ingeniería de Sistemas Carreteros (CENTRO SCT, N.L. E ITESM, CAMPUS MONTERREY), Monterrey, N.L.

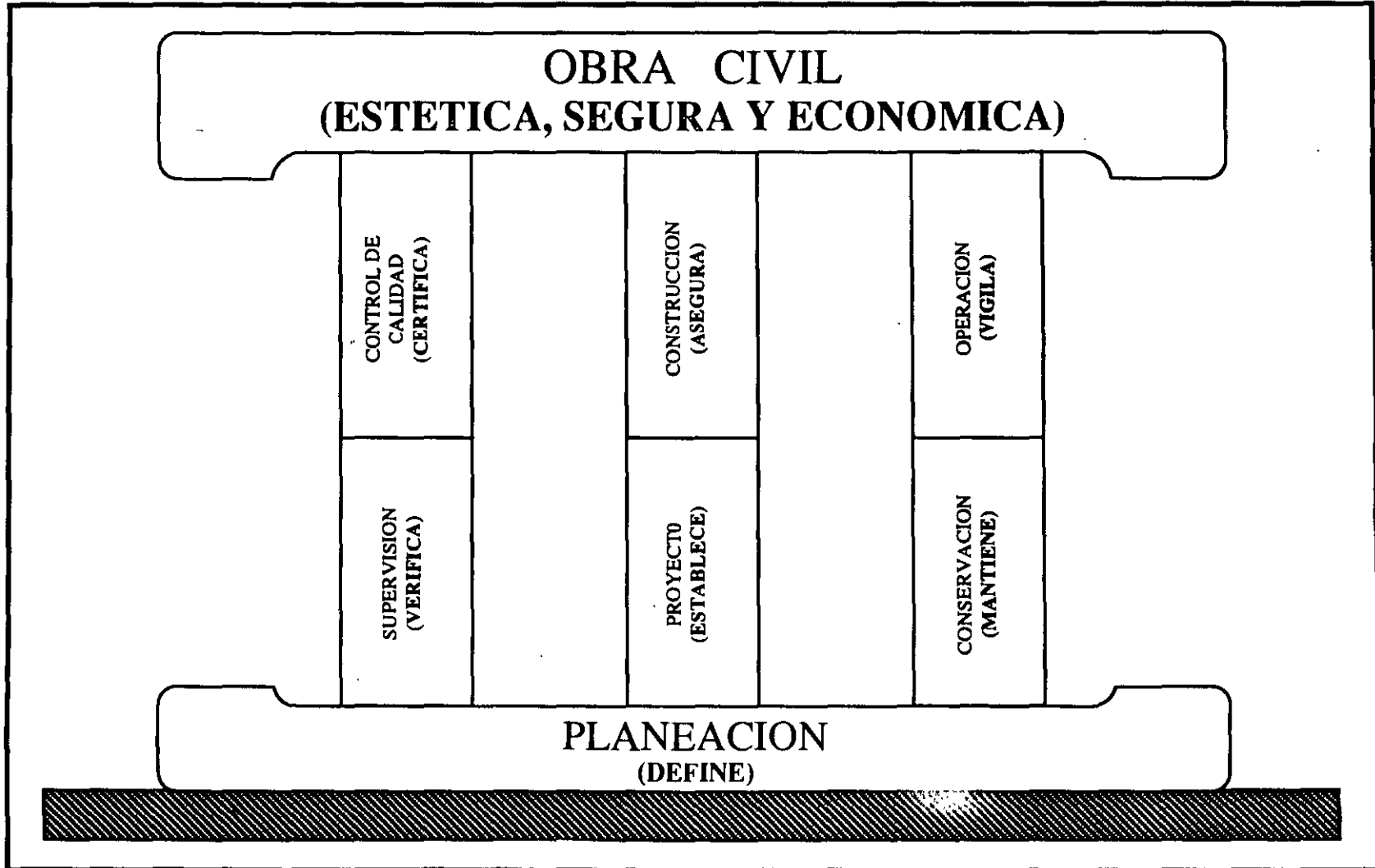
# ESTABILIDAD DE UNA OBRA CIVIL



81

# NIVEL DE CALIDAD

(GEOMETRIA, ACABADOS, MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS)

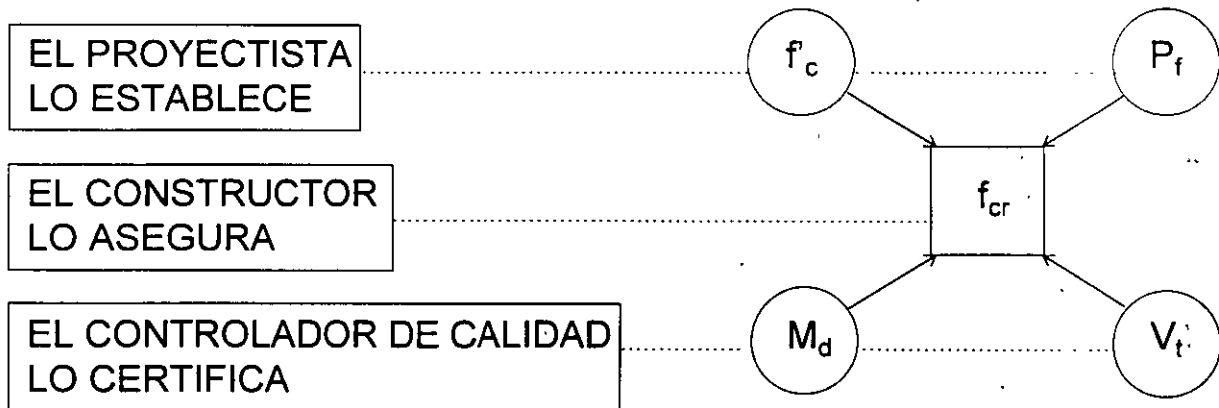


61

Lámina 3

SISTEMA DE CONTROL DE CALIDAD  
EN EL CASO DEL CONCRETO HIDRAULICO

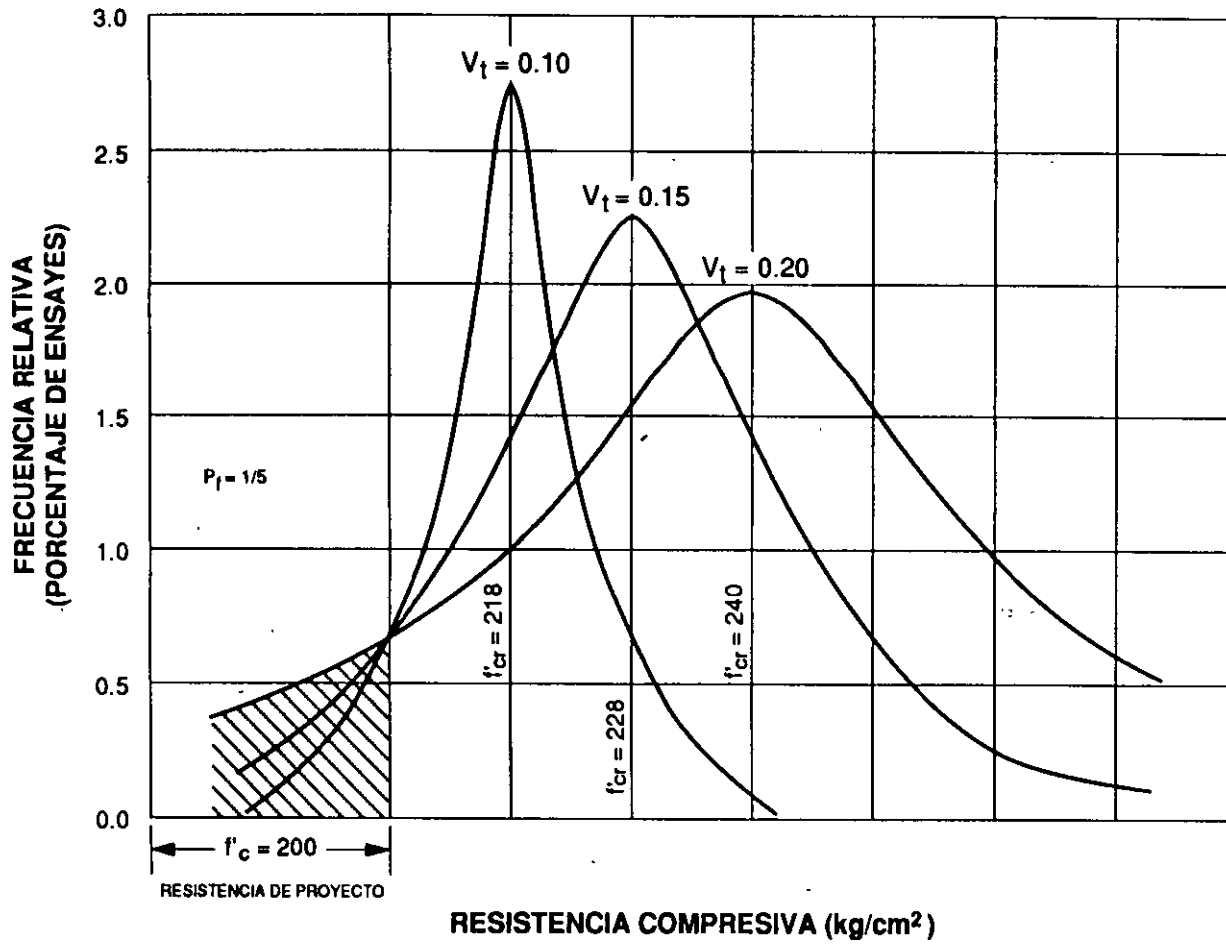
NIVEL DE CALIDAD



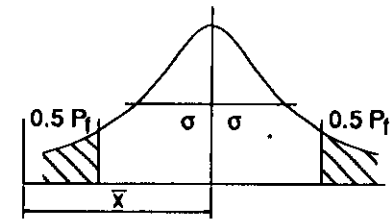
- $f_c$  = resistencia de proyecto
- $f_{cr}$  = resistencia media requerida
- $P_f$  = probabilidad de falla en los ensayos
- $M_d$  = mezcla de diseño
- $V_t$  = coeficiente de variacion total

Lámina 4

CURVAS NORMALES DE FRECUENCIA



$$V_t = \frac{\sigma}{\bar{x}}$$



- $\bar{x}$  = valor medio =  $f_{cr}$
- $\sigma$  = desviación estándar
- $V_t$  = coeficiente de variación total
- $P_f$  = probabilidad de falla en los ensayos
- $f_{cr}$  = resistencia media requerida
- $f'_c$  = resistencia de proyecto

Handwritten mark resembling the letter 'R'.

Lámina 5

GRADO DE UNIFORMIDAD DEL CONCRETO

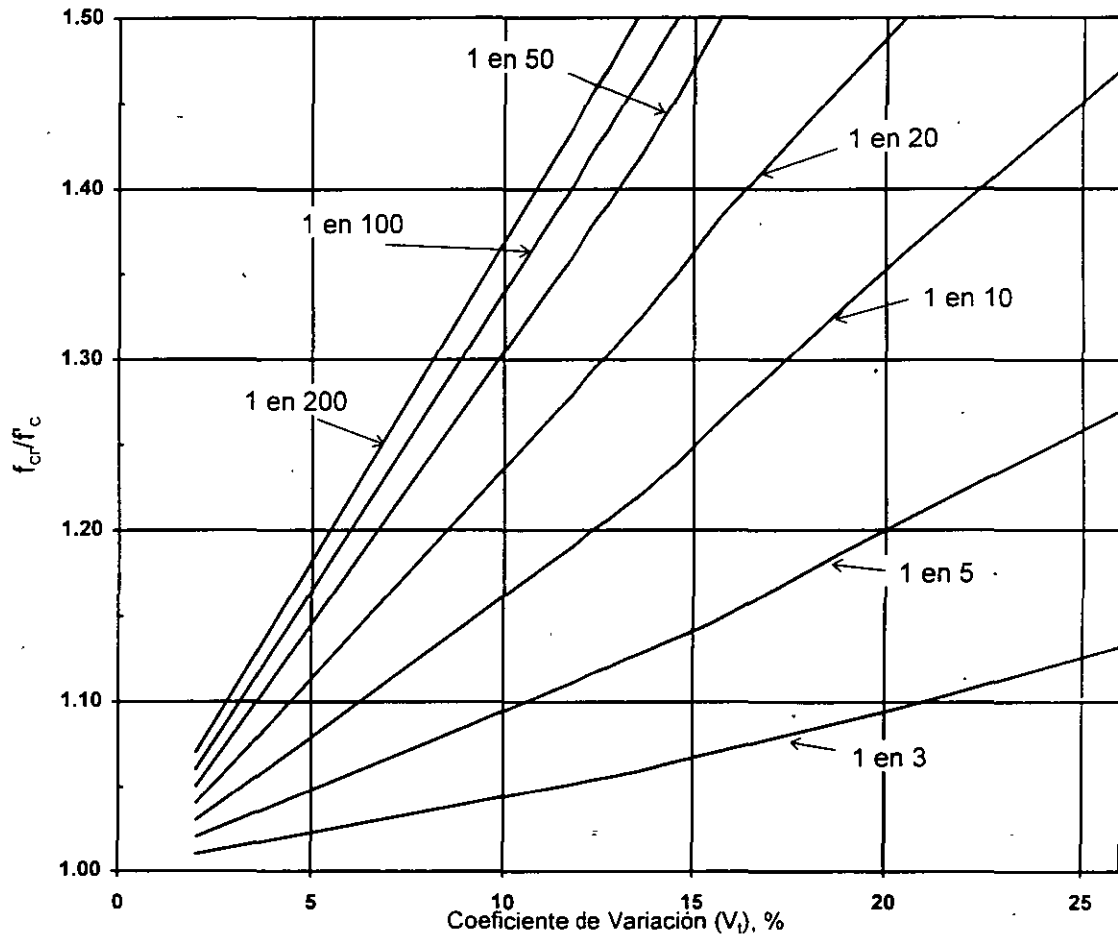
COEFICIENTE DE VARIACION TOTAL ( $V_t$ )	CALIFICACION	CONDICION
0 a 0.05	EXCELENTE	LABORATORIO
0.05 a 0.10	MUY BUENO	<u>PRECISO</u> CONTROL DE LOS MATERIALES Y DOSIFICACION POR <u>PESO</u>
0.10 a 0.15	BUENO	<u>BUEN</u> CONTROL DE LOS MATERIALES Y DOSIFICACION POR <u>PESO</u>
0.15 a 0.20	MEDIANO	<u>ALGUN</u> CONTROL DE LOS MATERIALES Y DOSIFICACION POR <u>PESO</u>
0.20 a 0.25	MALO	<u>ALGUN</u> CONTROL DE LOS MATERIALES Y DOSIFICACION POR <u>VOLUMEN</u>
> 0.25	MUY MALO	<u>NINGUN</u> CONTROL DE LOS MATERIALES Y DOSIFICACION POR <u>VOLUMEN</u>



# Lámina 6

## SELECCION DE LA MEZCLA DE DISEÑO

### PROBABILIDAD DE FALLA EN LOS ENSAYES ( $P_f$ )



$$\frac{f_{cr}}{f'_c} = \frac{\text{Resistencia Media Requerida}}{\text{Resistencia de Proyecto}}$$

Lámina 7

ETAPAS Y NIVELES DE CONTROL

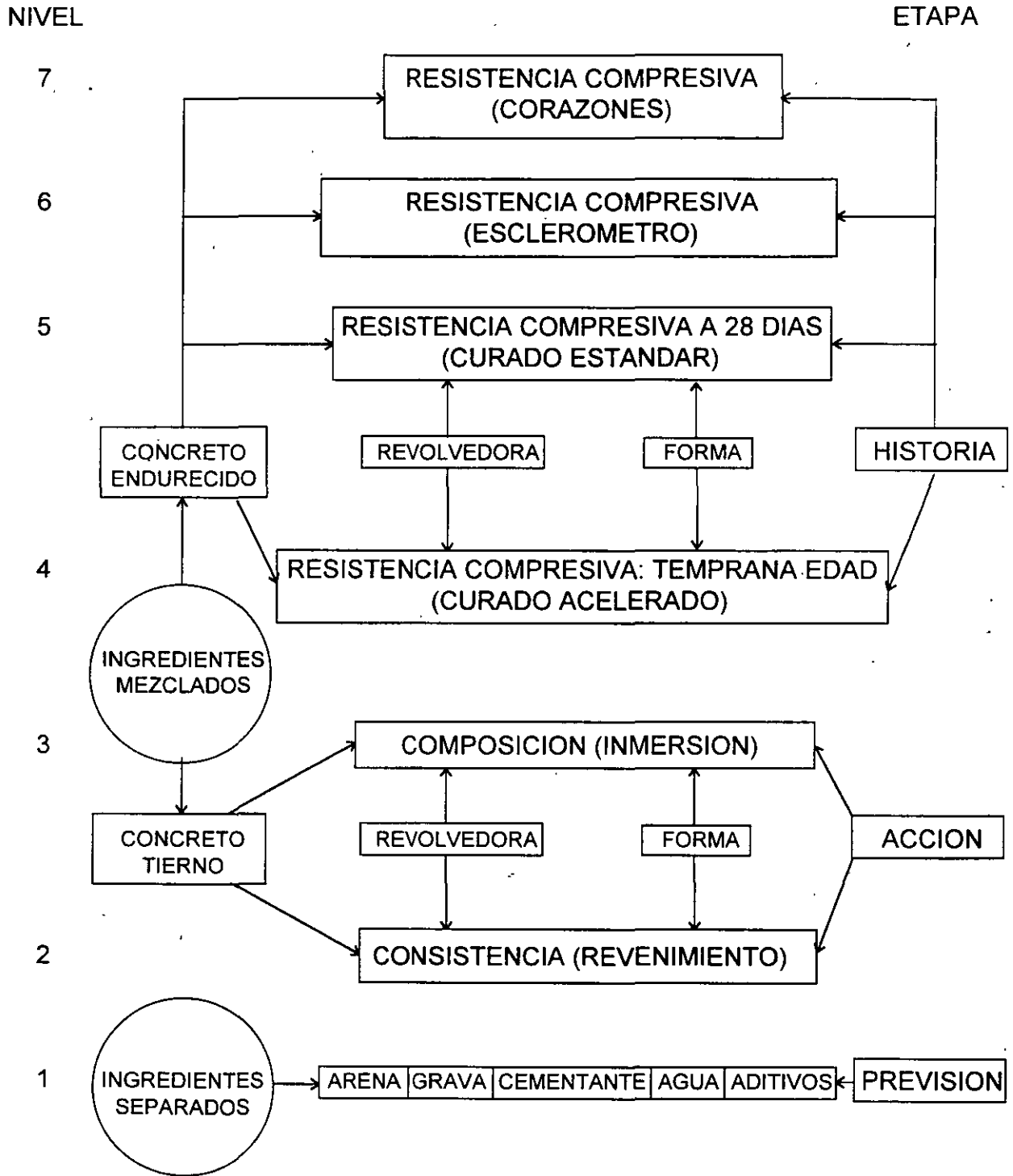


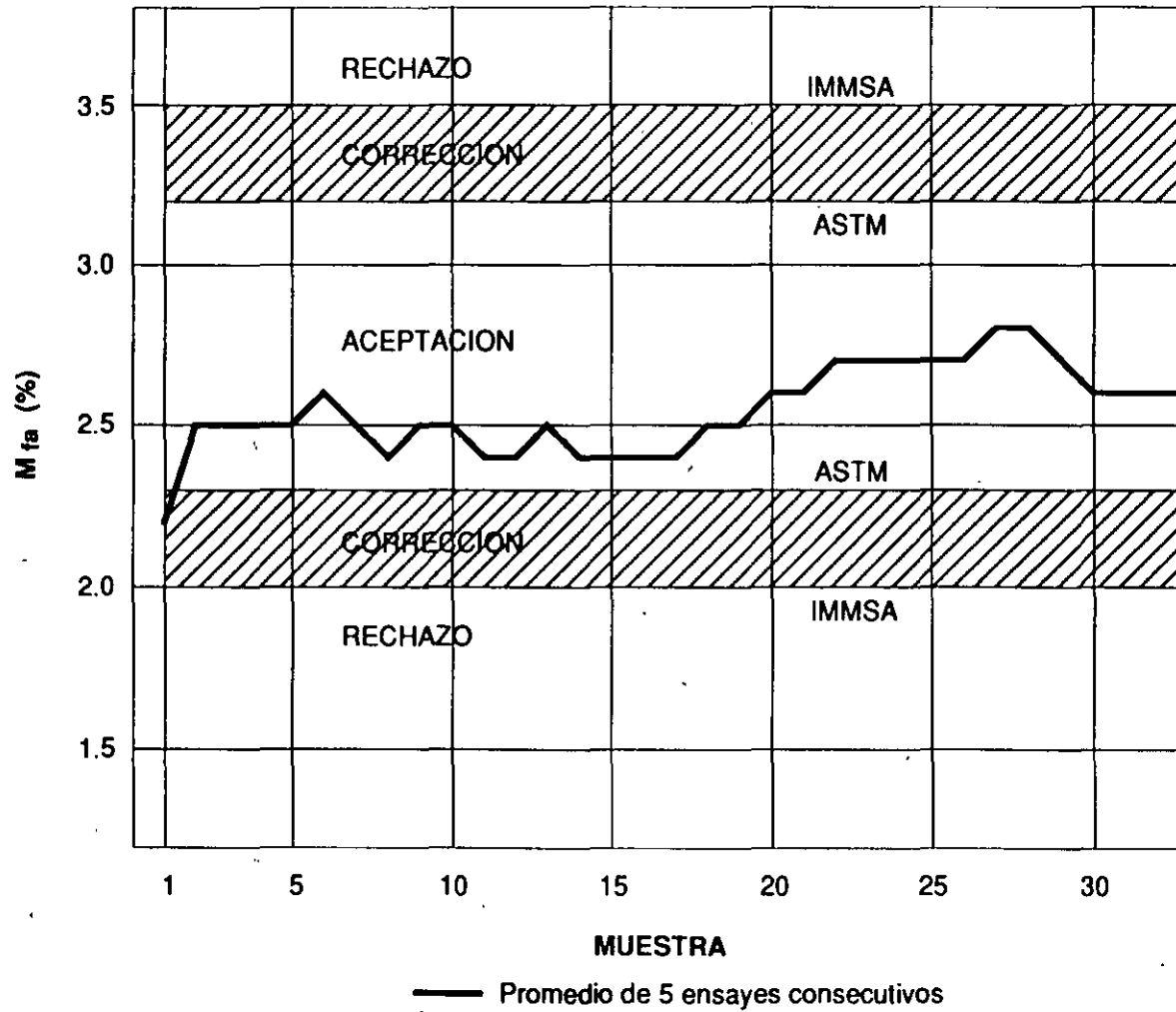
Lámina 8

REVISION DE INGREDIENTES SEPARADOS

ARENA	MODULO DE FINURA
	CONTENIDO DE FINOS
	CONTENIDO DE MATERIA ORGANICA
	CONTENIDO DE GRAVA
GRAVA	MODULO DE FINURA
	CONTENIDO DE ARENA
	CONTENIDO DE FINOS
CEMENTANTE	PROPIEDADES FISICAS
	PROPIEDADES QUIMICAS
	RESISTENCIA COMPRESIVA
AGUA	PROPIEDADES FISICAS
	PROPIEDADES QUIMICAS
ADITIVOS	PROPIEDADES ESPECIFICAS

Lámina 9

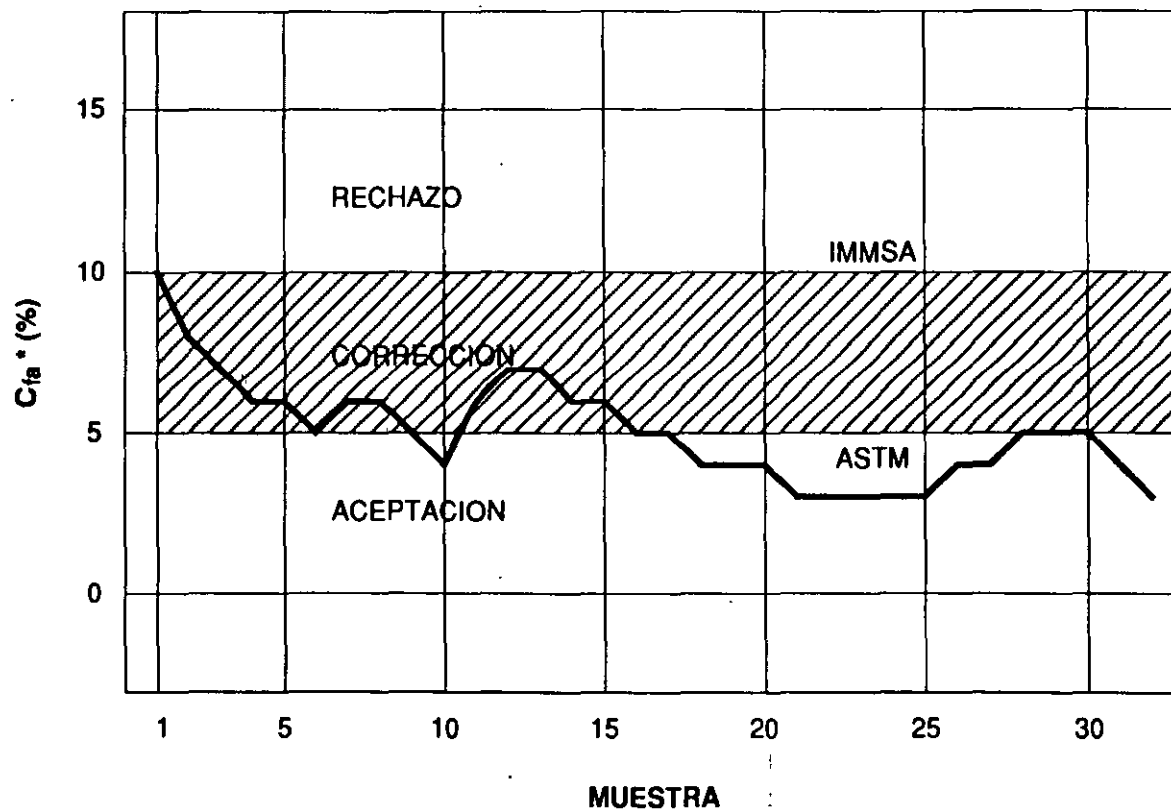
CARTA DE CONTROL:  
MODULO DE FINURA DE LA ARENA ( $M_{fa}$ )



26

Lámina 10

CARTA DE CONTROL:  
CONTENIDO DE FINOS EN LA ARENA ( $C_{fa}$ )



— Promedio de 5 ensayos consecutivos

\* Pasan malla # 100  
Industria Minera México, S.A. de C.V. (IMMSA)  
American Society of Testing Materials (ASTM)

27

Lámina 11

CARTA DE CONTROL:  
MODULO DE FINURA DE LA GRAVA ( $M_{fg}$ )

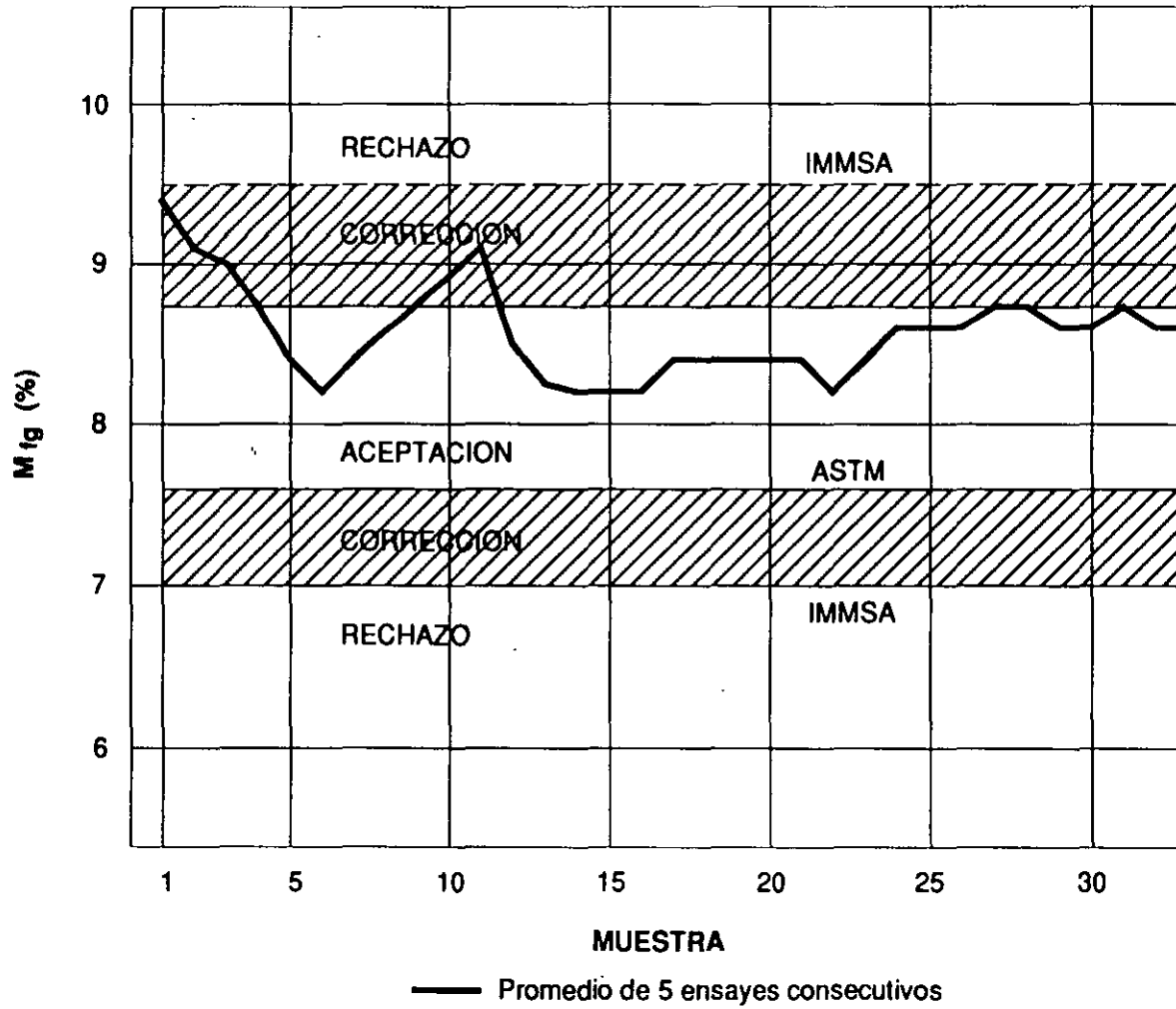
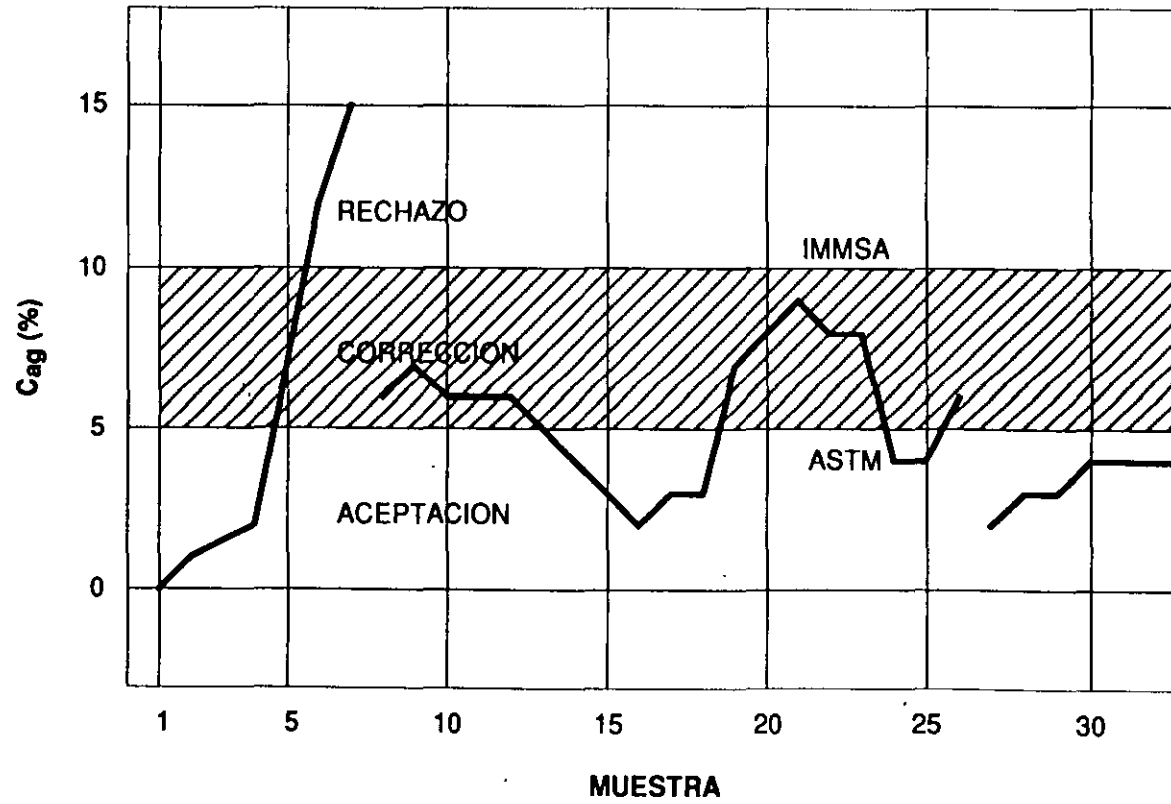


Lámina 12

CARTA DE CONTROL:  
CONTENIDO DE ARENA EN LA GRAVA (C<sub>ag</sub>)



— Promedio de 5 ensayos consecutivos

29

Lámina 13

**CARTA DE CONTROL:  
ANALISIS ESTADISTICO DE REVENIMIENTOS EN LA FORMA**

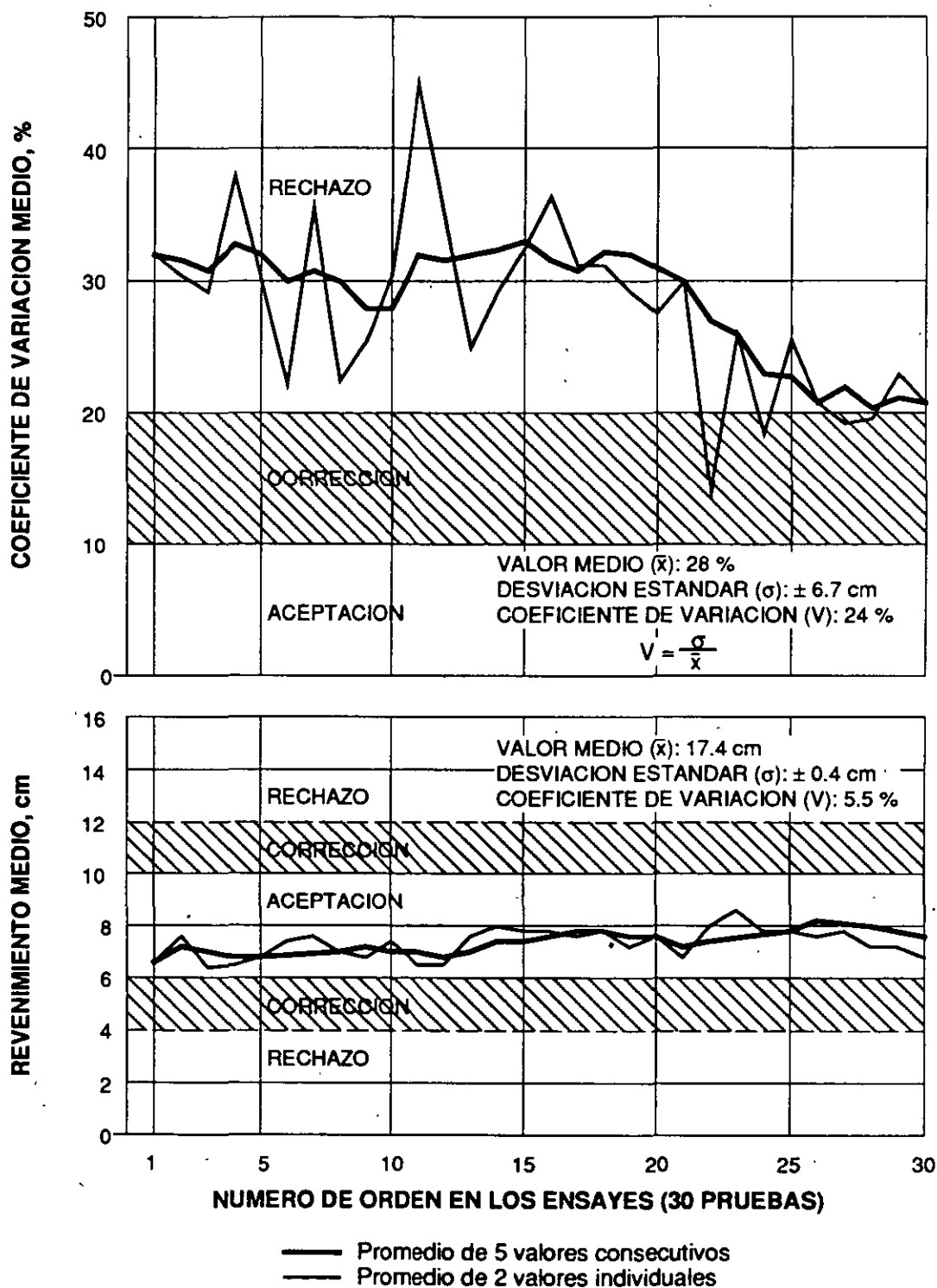




Lámina 14

**CONTROL DE INGREDIENTES MEZCLADOS  
(COMPOSICION DEL CONCRETO TIERNO)**

<b>RELACIONES</b>	<b>AGUA / CEMENTANTE</b>
	<b>AGREGADOS / CEMENTANTE</b>
	<b>GRAVA / ARENA</b>
<b>CONTENIDOS</b>	<b>CONSUMO UNITARIO DE CEMENTANTE</b>
	<b>PORCENTAJE DE AIRE INCLUIDO</b>

Lámina 15

**CARTA DE CONTROL:**  
**COMPOSICION DEL CONCRETO TIERNO**  
*PRUEBA DE INMERSION EN MUESTRAS TOMADAS DE LA FORMA*

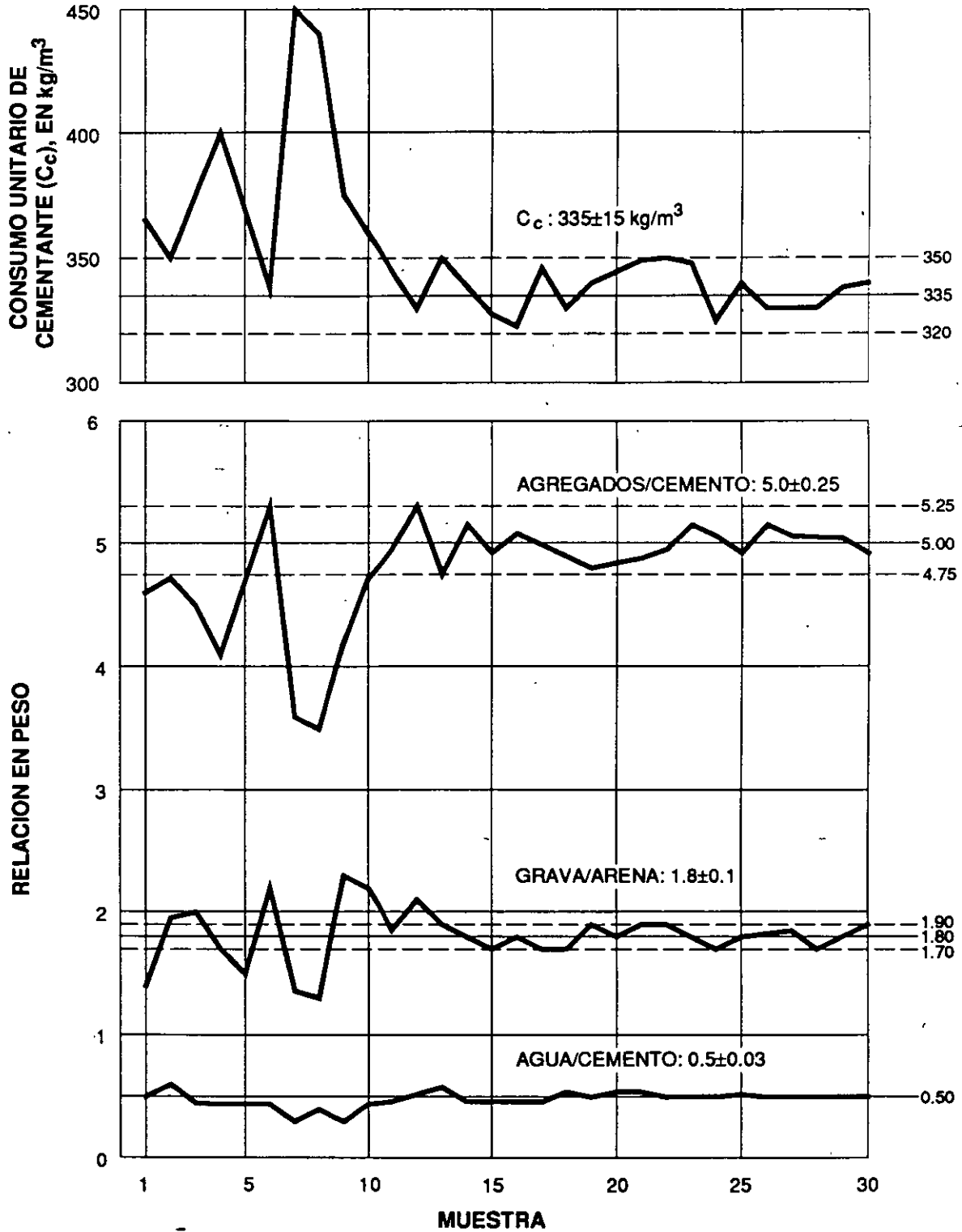


Lámina 16

CORRELACION ENTRE RESISTENCIAS COMPRESIVAS  $R_{28} \rightarrow R_2$

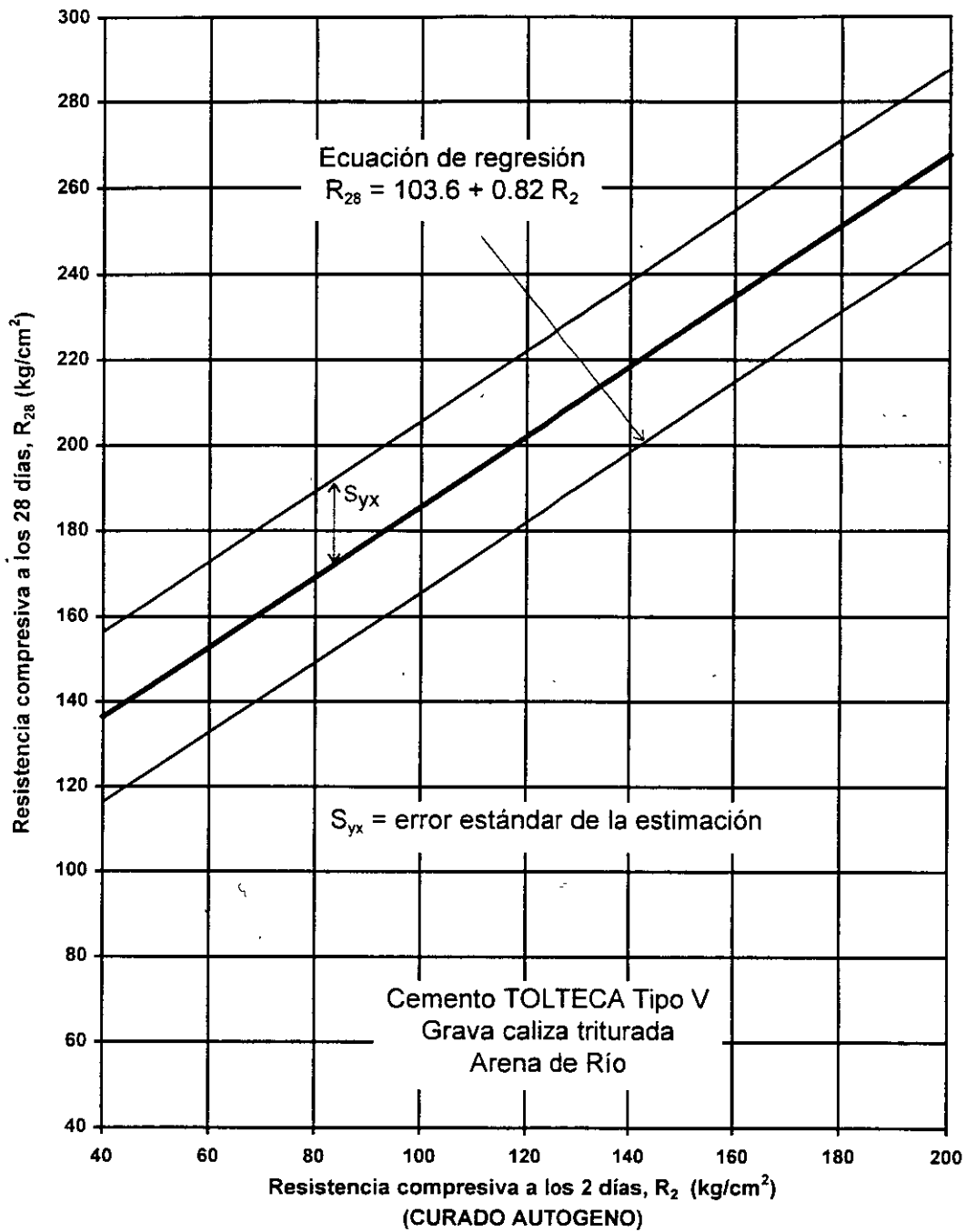


Lámina 17

**CARTA DE CONTROL**  
**ANALISIS DE RESISTENCIAS COMPRESIVAS A 28 DIAS**

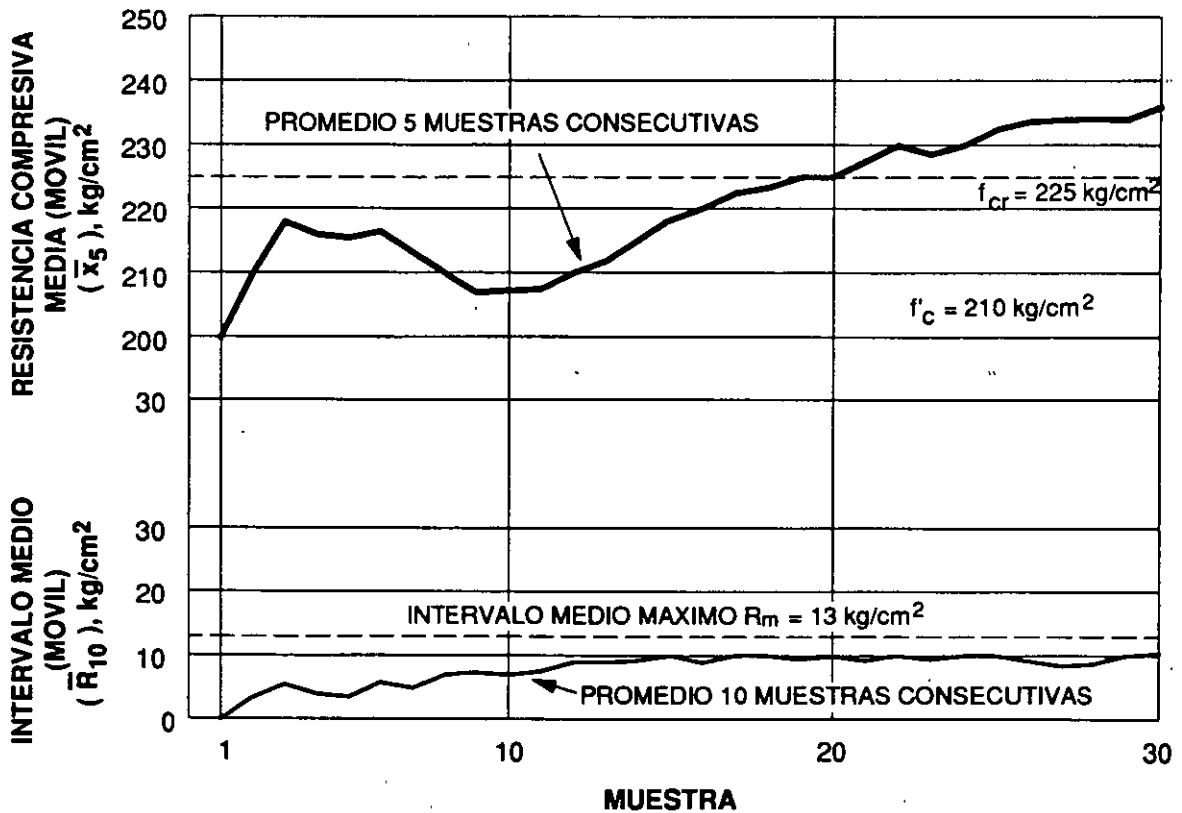
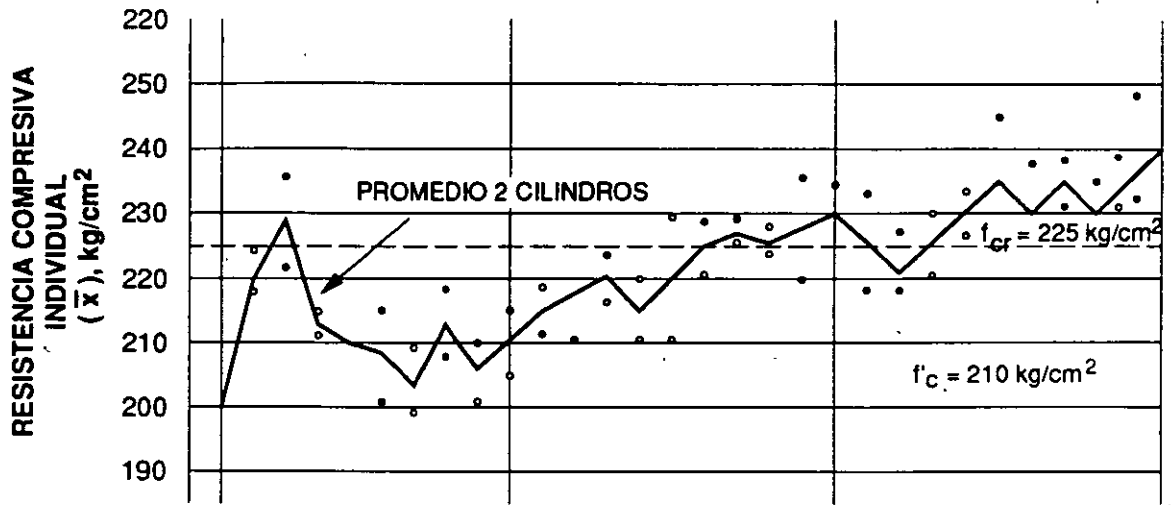
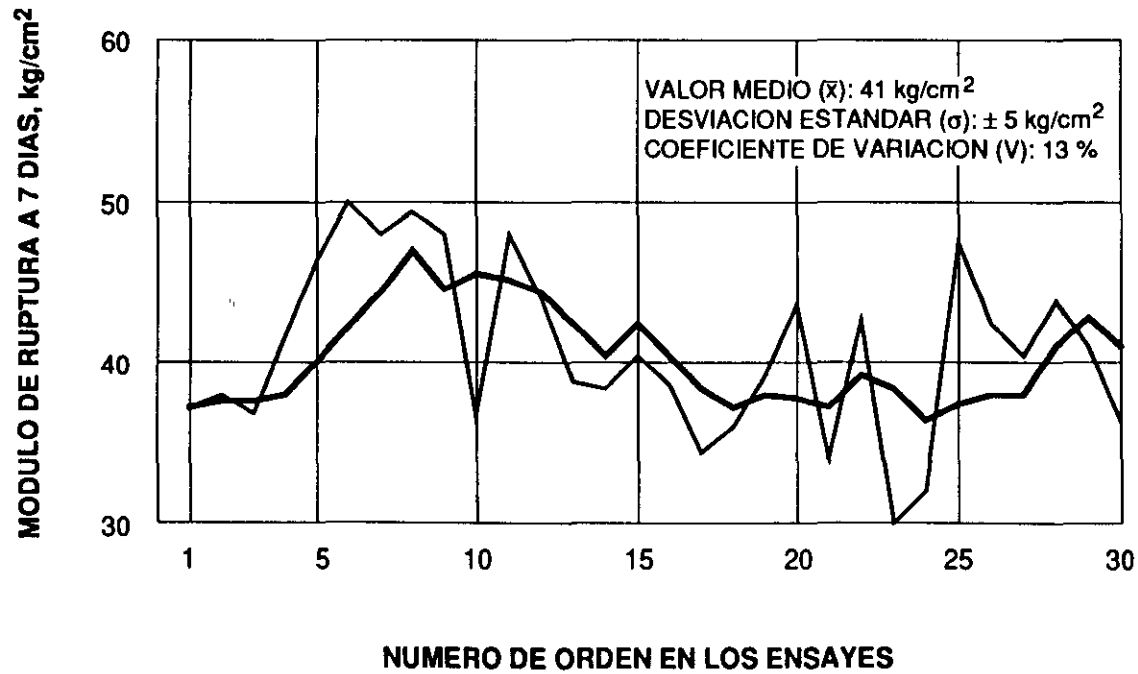


Lámina 18

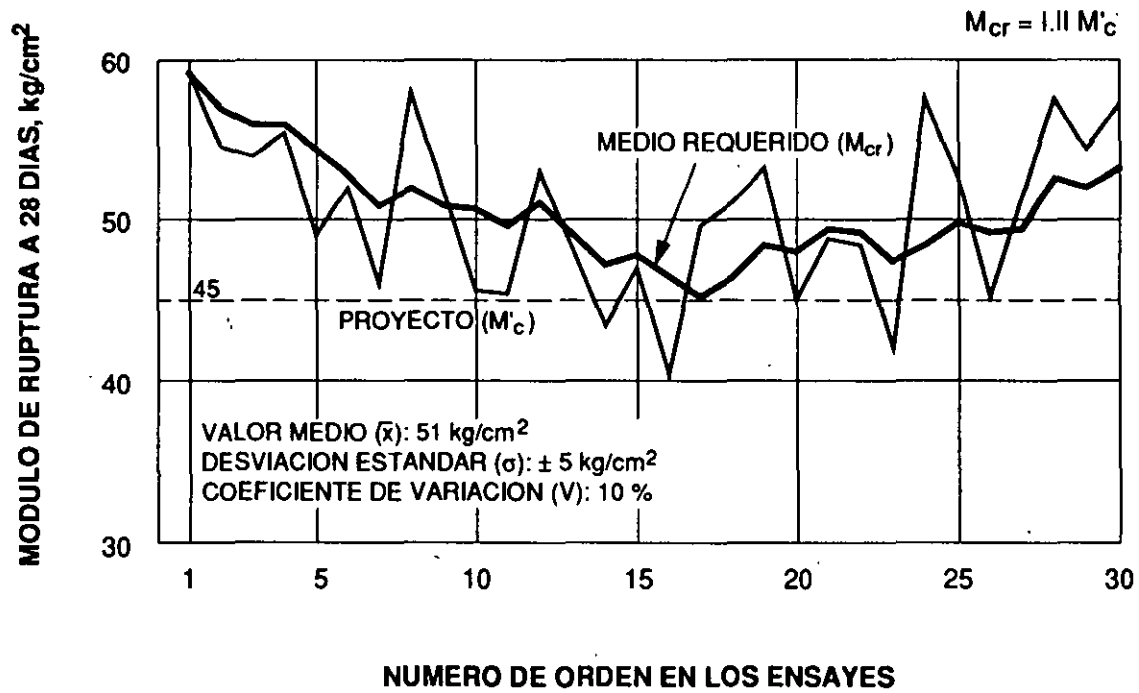
CARTA DE CONTROL:  
RESISTENCIA EN LOSAS



— Promedio de 5 valores consecutivos  
— Promedio de 2 valores individuales

Lámina 19

CARTA DE CONTROL:  
RESISTENCIA EN LOSAS



— Promedio de 5 valores consecutivos  
— Promedio de 2 valores individuales

Lámina 20

DEFINICIONES GRAVIMETRICAS FUNDAMENTALES EN UNA MEZCLA

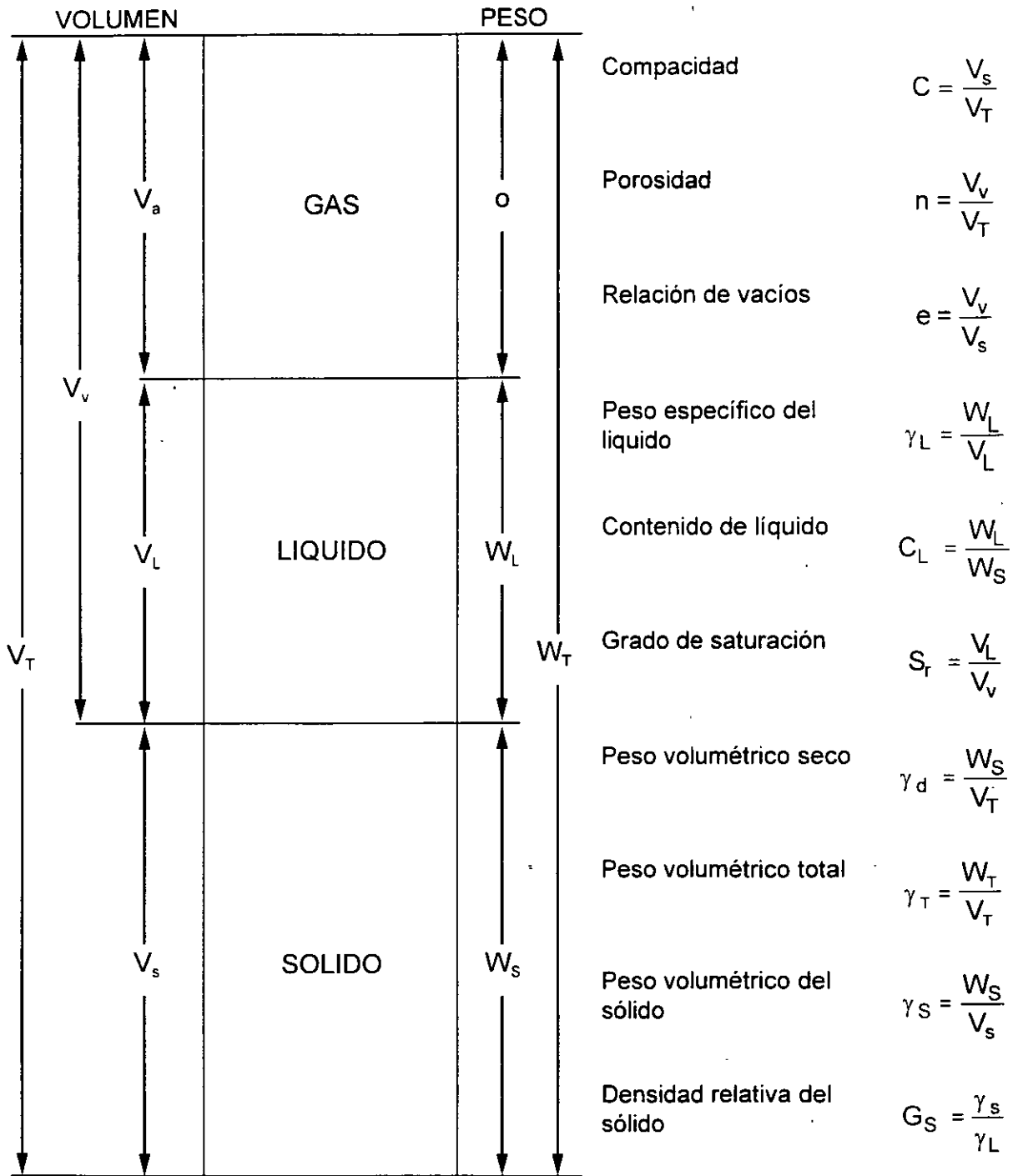
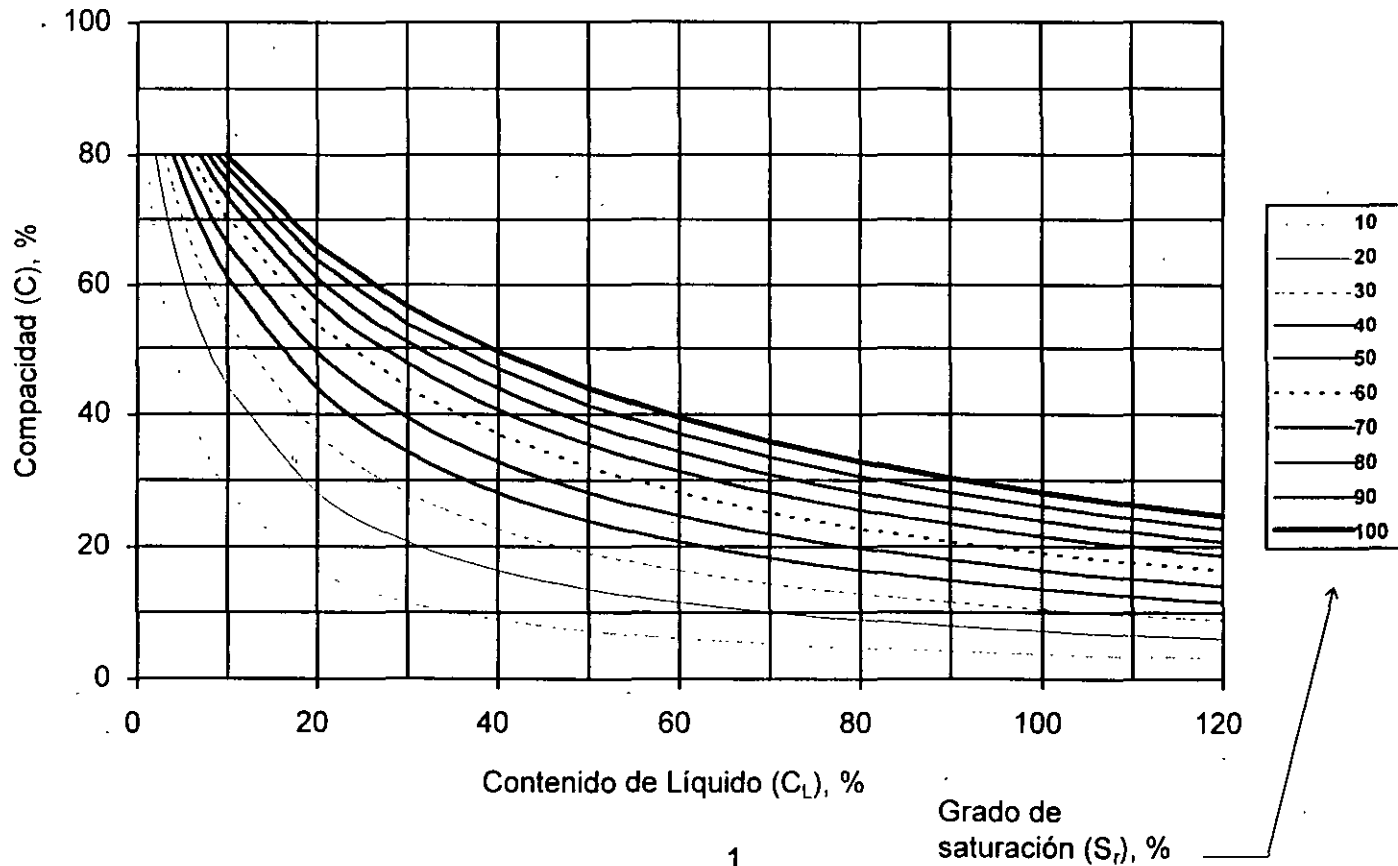


Lámina 21

DIAGRAMA CAS (COMPACIDAD-AGUA O ASFALTO-SATURACION)



$$C = \frac{1}{1 + \frac{C_L}{S_r} G_s}$$

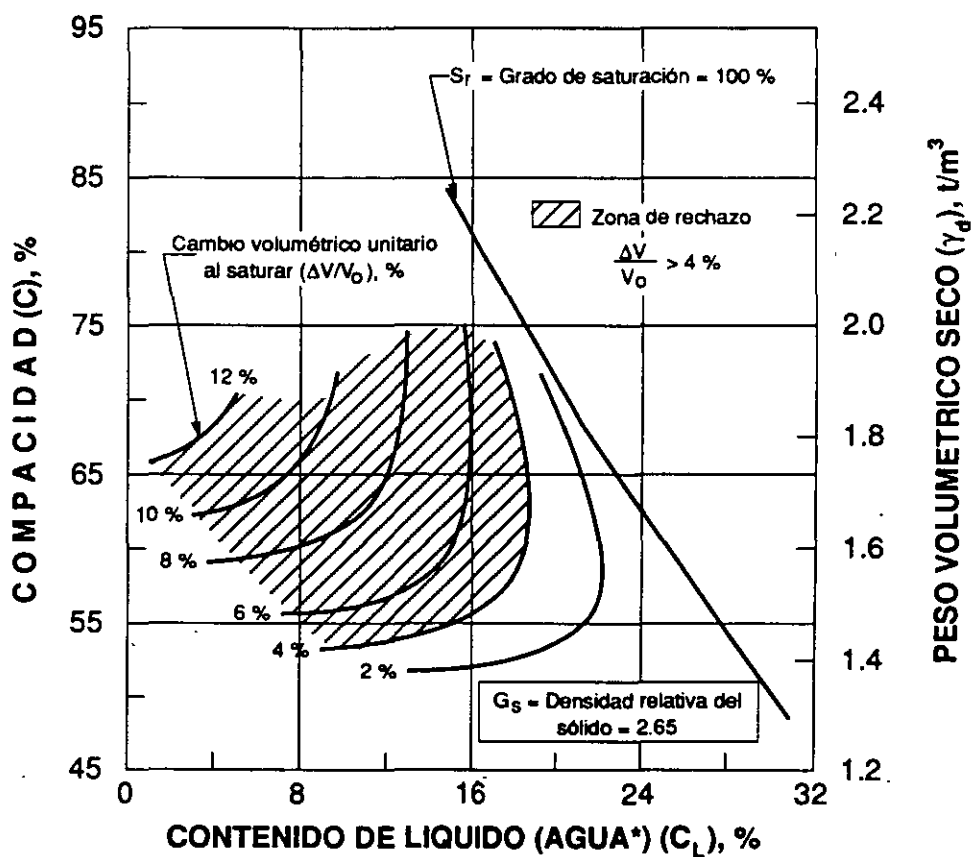
G<sub>s</sub> = Densidad relativa del Sólido = 2.55

38



Lámina 22

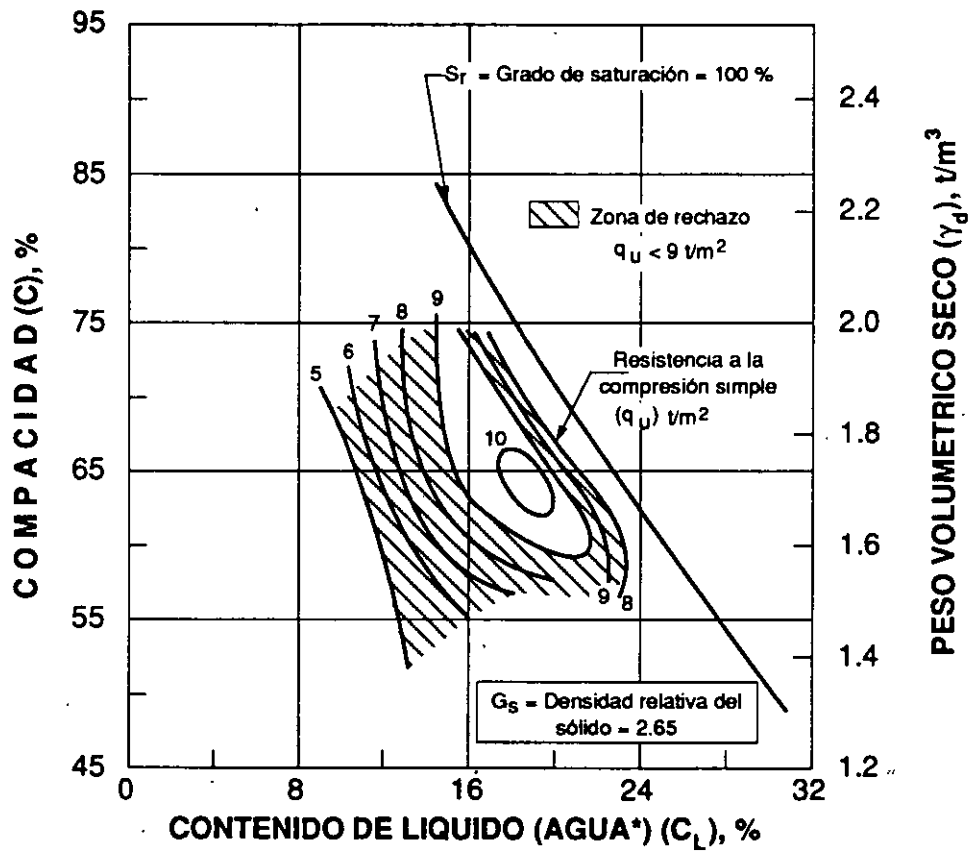
DIAGRAMA CAS<sub>1</sub> .- CURVAS DE IGUAL CAMBIO VOLUMETRICO AL SATURAR UN SUELO COMPACTADO



\* En mecánica de suelos, el contenido de agua o humedad se designa con el símbolo w

Lámina 23

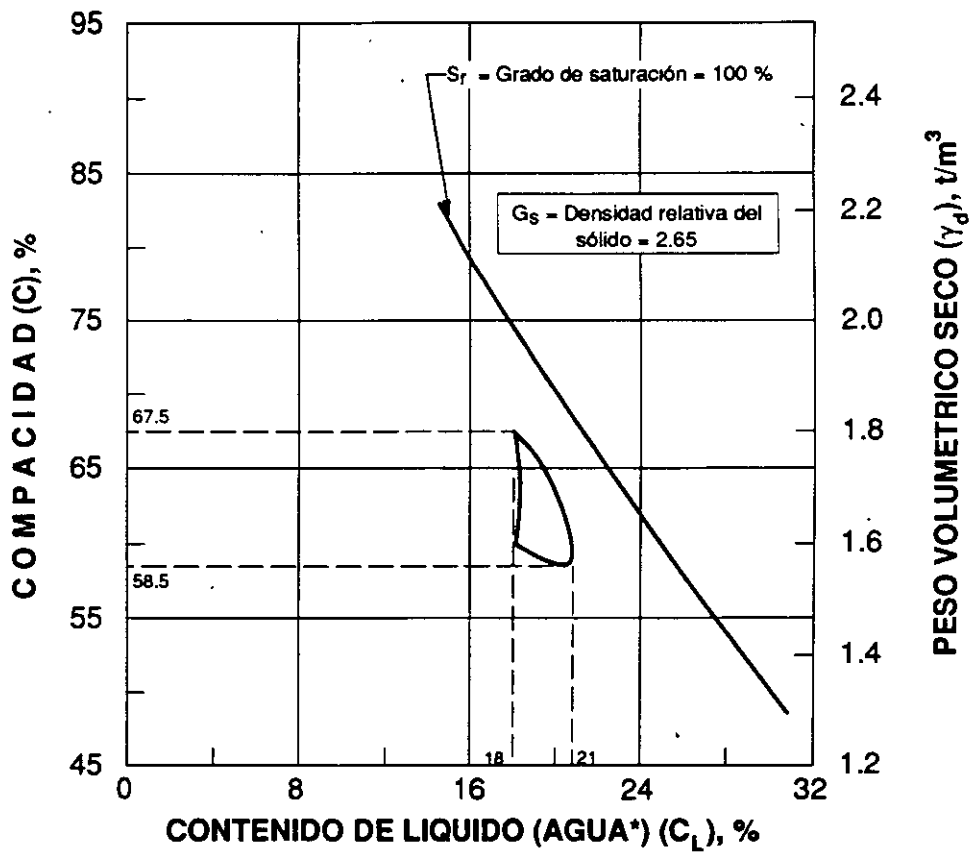
DIAGRAMA  $CAS_2$ .- CURVAS DE IGUAL RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE EN UN SUELO COMPACTADO



\* En mecánica de suelos, el contenido de agua o humedad se designa con el símbolo  $w$

Lámina 24

DIAGRAMA CAS PARA CARTA DE CONTROL.- ZONA DE ACEPTACION PARA EL SUELO COMPACTADO DE LAS LAMINAS 22 Y 23



\* En mecánica de suelos, el contenido de agua o humedad se designa con el símbolo w

Lámina 25

DIAGRAMA CAS.- CURVAS DE IGUAL  
MODULO MARSHALL

$M_M$  = Módulo Marshall  
 $S_r$  = Grado de Saturación  
 con asfalto  
 $G_s$  = Densidad relativa  
 del Sólido = 2.54

Criterios de Aceptación Propuestos  
 1.  $75\% \leq S_r \leq 85\%$   
 2.  $700 \text{ kg/cm}^2 \leq M_M \leq 1000 \text{ kg/cm}^2$

Recomendaciones:  
 1.  $82\% \leq C \leq 84\%$   
 2.  $6.3\% \leq C_a \leq 6.9\%$

SIMBOLOGIA	
N = No. de golpes por cara en los especímenes Marshall	
□	150
△	125
●	100
○	75
+	50
x	25
▨	Zona de rechazo

ck

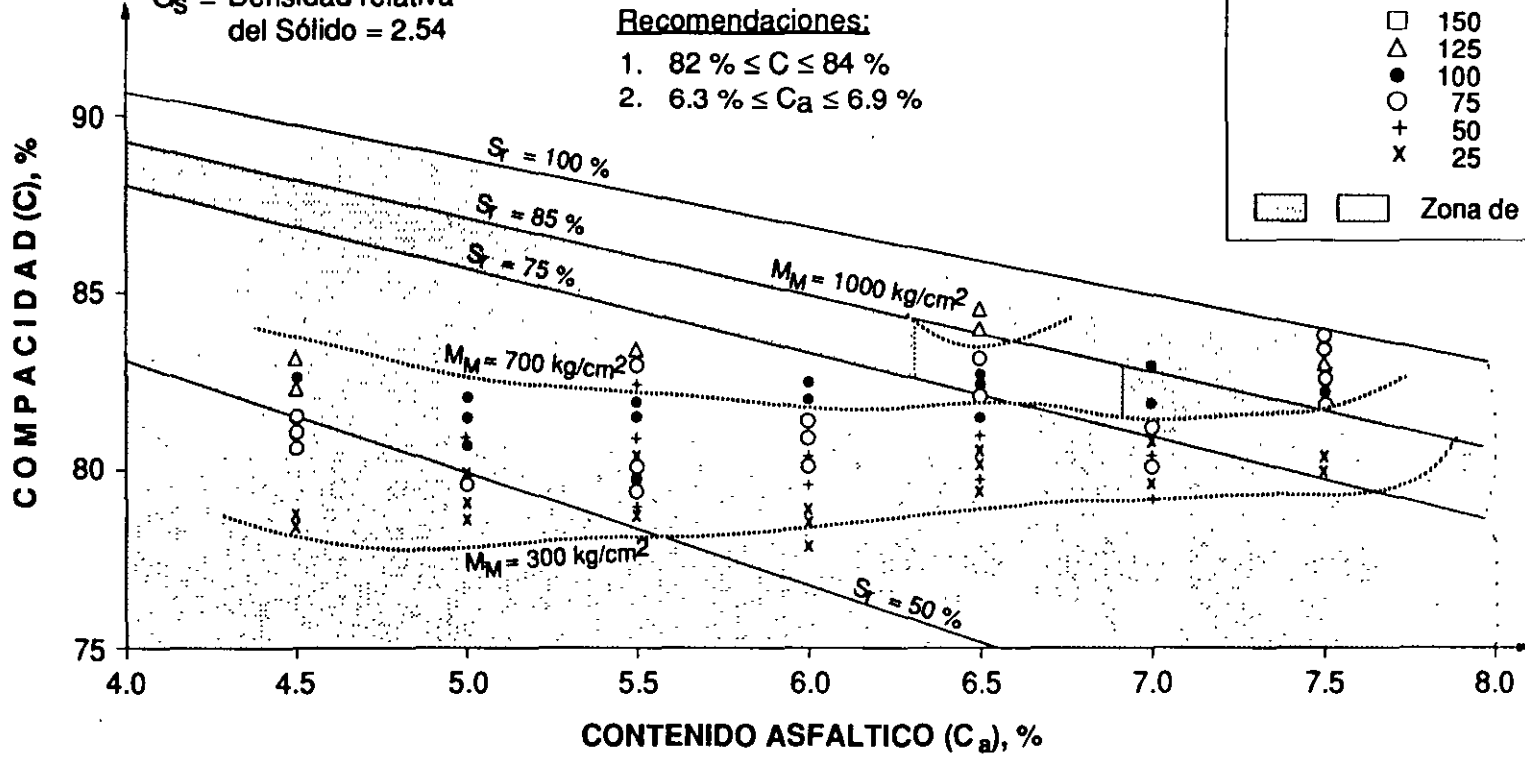


Lámina 26

DIAGRAMA CAS PARA CARTA DE CONTROL.- ZONA DE ACEPTACION PARA EL CONCRETO ASFALTICO DE LA LAMINA 25

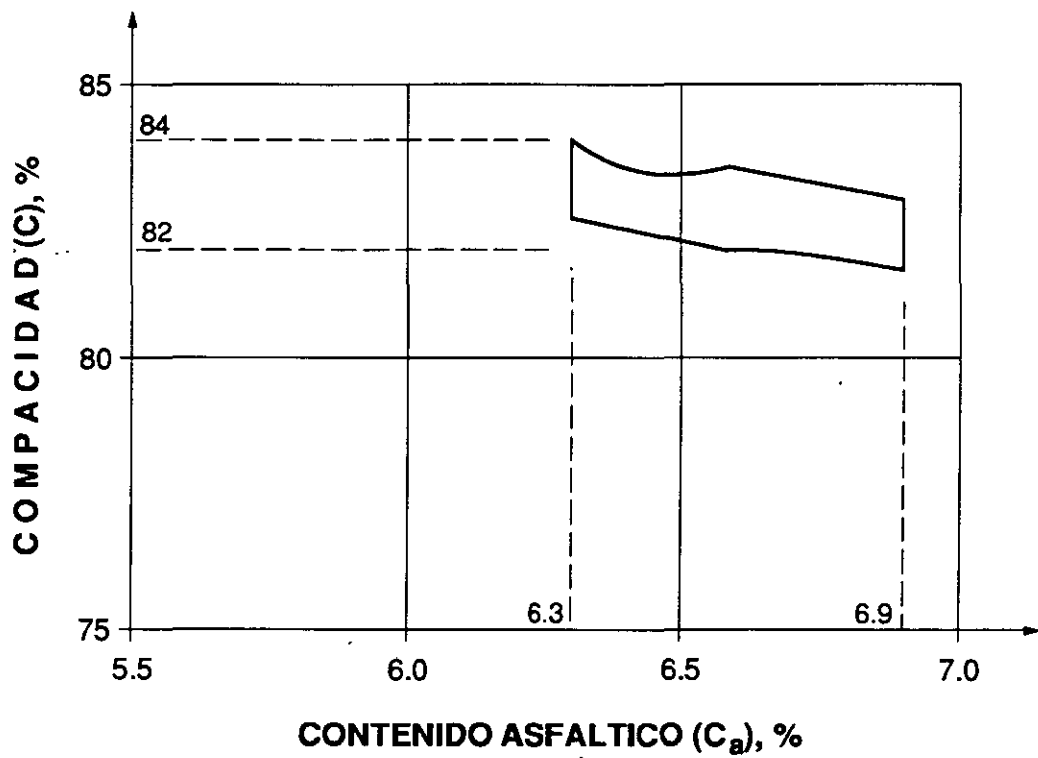


Lámina 27

TRAMO DE PRUEBA EN CAPA SUBRASANTE  
AEROPUERTO "DOS MONTES" VILLAHERMOSA, TAB. (SEPTIEMBRE, 1976)

CAPA COMPACTA DE 25 cm  
ARCILLA ARENOSA (CL)

RODILLO VIBRATORIO CA-25; 1500 vpm

HUMEDAD INICIAL:  $15.5 \pm 1.5$  %  
HUMEDAD OPTIMA: 18.5 %

RELACION DE HUMEDAD =  $\frac{15.5}{18.5} = 0.84$

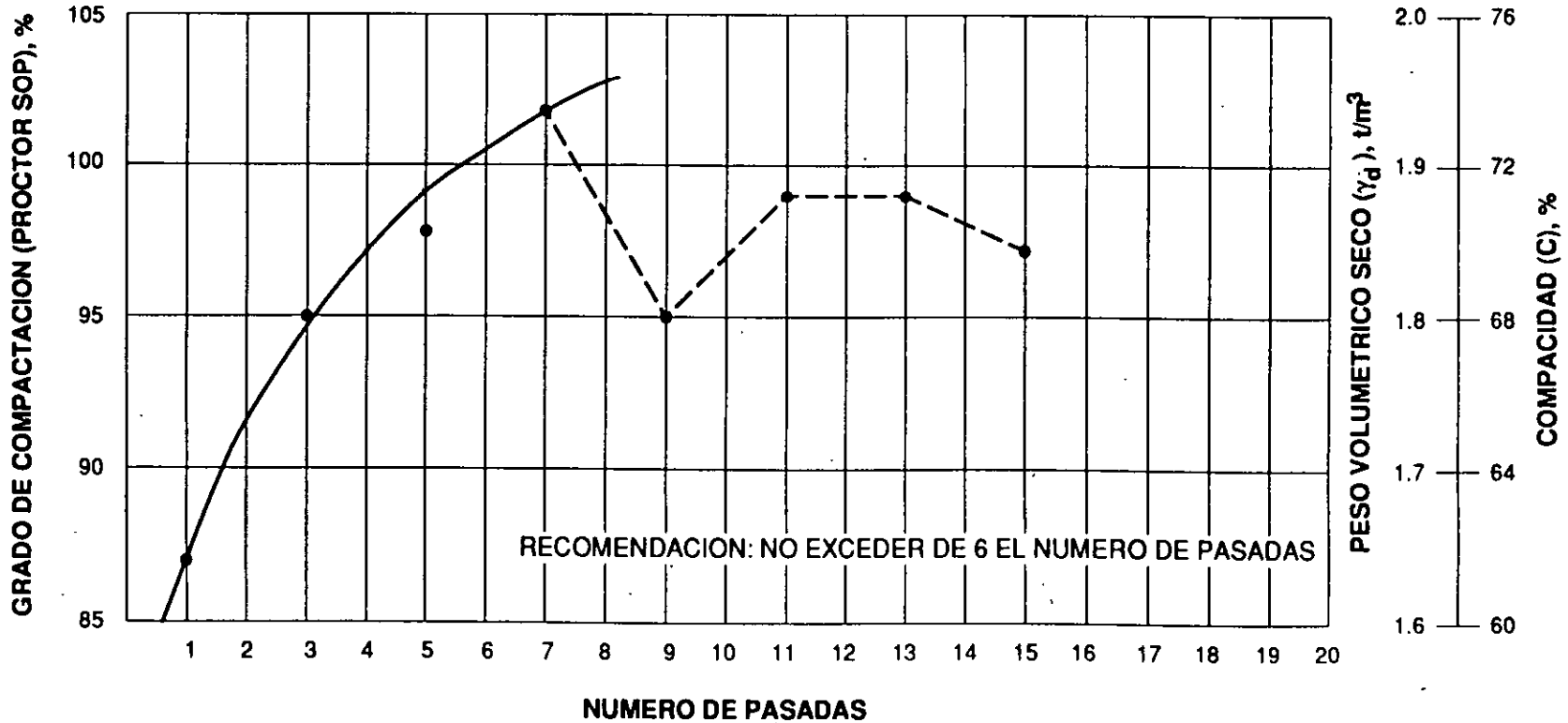


Tabla 1

ETAPAS DEL CONTROL DE CALIDAD

CONCEPTO ETAPA	CONSTRUCCION	INGREDIENTES	ACTIVIDAD	MATERIAL O CARACTERISTICA
PREVISION	ANTES	SEPARADOS (Dosificaciones básicas)	CONTROL Y ACEPTACION (Selección de equipo e instalaciones)	GRAVA; ARENA; AGUA; CEMENTO* Y ADITIVOS
ACCION	DURANTE	MEZCLADOS	AJUSTE, EJECUCION, CONTROL Y ACEPTACION	SUELO A COMPACTAR CON O SIN ADICIONANATES (AGUA O CEMENTO); MEZCLAS DE CONCRETO*
HISTORIA	DESPUES	TRANSFORMADOS (NUEVO MATERIAL)	INFORME Y ANALISIS ESTADISTICO	COMPACIDAD Y CONTENIDO DE LIQUIDO (AGUA O ASFALTO) DE LAS CAPAS; RESISTENCIAS O RIGIDECES DEL CONCRETO*

(\*) HIDRAULICO O ASFALTICO

45

**Tabla 2**

**ACTIVIDADES PRINCIPALES DE LOS RESPONSABLES DE LA OBRA**

PROPIETARIO

Respaldo al proyectista y al supervisor. Financiamiento constructivo. Pago oportuno de estimaciones

REPRESENTANTE Y/O DIRECTOR

PLANEADOR	PROYECTISTA	SUPERVISOR	CONSTRUCTOR Y SU CONTROL DE CALIDAD	CONTROLADOR DE CALIDAD
<p>Definición de niveles de calidad y criterios básicos de proyecto, construcción, supervisión, control de calidad, conservación y operación</p>	<p>Establecimiento de niveles de calidad y cumplimiento de criterios básicos de proyecto</p> <p>Elaboración de planos constructivos y especificaciones con normas de calidad de materiales</p> <p>Especificaciones y normas de construcción</p> <p>Asesoramiento durante la construcción</p> <p>Retroalimentación de información</p> <p>Revisión del proyecto y modificación de normas, de requerirse</p>	<p>Verificación de los niveles de calidad</p> <p>Conocimiento detallado del proyecto, con métodos constructivos y programa de ejecución</p> <p>Aprobación de sistemas constructivos</p> <p>Seguimiento del control de calidad para su aceptación</p> <p>Verificación constructiva del proyecto. Medición de cantidades de obra</p> <p>Informes periódicos de avance, financieros y de calidad</p> <p>Certificación de entrega de obra</p> <p>Retroalimentación continua al proyectista y al constructor</p>	<p>Aseguramiento de los niveles de calidad</p> <p>Conocimiento detallado del proyecto y su programa constructivo</p> <p>Conciliación de sistemas constructivos con la supervisión y el proyectista</p> <p>Suministro de recursos humanos, de equipo, de materiales y monetarios. Costos</p> <p>Ejecución de la obra, con aseguramiento continuo, ágil y oportuno de los niveles de calidad</p> <p>Presentación de estimaciones y acta de entrega</p> <p>Retroalimentación continua al proyectista y al supervisor</p>	<p>Certificación de los niveles de calidad en geometría, acabados, materiales y procedimientos constructivos</p> <p>Información sistemática al supervisor</p> <p>Retroalimentación continua al supervisor y al constructor</p>

9/1



Tabla 3

**SECUENCIA RECOMENDABLE DE ACTIVIDADES INHERENTES A LOS RESPONSABLES DE UNA OBRA.  
CASO DE MATERIALES**

Nº	REPONSABLE	ACTIVIDAD
1	PROYECTISTA	Establecer niveles de calidad
2	PROYECTISTA	Correlacionar propiedades fundamentales con parámetros fácilmente medibles
3	PROYECTISTA	Definir y establecer zonas de aceptación, corrección y rechazo
4	CONSTRUCTOR	Proponer aprovechamiento de materiales y procedimientos constructivos
5	PROYECTISTA Y SUPERVISOR	Aprobar proposición del constructor
6	CONTROLADOR DE CALIDAD	Ajustar correlaciones y zonas de control a condiciones reales en la obra
7	CONTROLADOR DE CALIDAD	Determinar desviaciones durante la construcción e informar al supervisor
8	SUPERVISOR	Corregir desviaciones durante la construcción
9	SUPERVISOR	Retroalimentar al proyectista y al constructor
10	SUPERVISOR	Determinar cantidades de obra, formular estimaciones y controlar el programa de avances (físico y financiero)

47



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**“ DIPLOMADO EN SISTEMAS DE CALIDAD  
EN INGENIERÍA DE PROYECTO  
Y CONSTRUCCIÓN ”**

**MODULO II**

**CONTROL DE CALIDAD DE MATERIALES Y OBRAS**

**PARTE 2**

**SUPERVISION Y CONTROL DE CALIDAD DE OBRAS**

**TEMA:**

**PROPIEDADES Y PRUEBAS DE ACEPTACION DE MATERIALES**

**EXPOSITOR: M. en I. JORGE E. CASTILLA CAMACHO  
1997**

# **DIPLOMADO EN SISTEMAS DE CALIDAD EN INGENIERIA DE PROYECTO Y CONSTRUCCION**

## **MODULO II**

**CONTROL DE CALIDAD DE MATERIALES Y OBRAS**

## **PARTE 2**

**SUPERVISION Y CONTROL DE CALIDAD DE OBRAS**

**INSTRUCTOR: M.I. JORGE E. CASTILLA CAMACHO**

## **TEMA**

### **PROPIEDADES Y PRUEBAS DE ACEPTACION DE MATERIALES**

Macizos rocosos y fragmentos de roca compactados Suelos naturales y compactados.

## **NOTAS DEL INSTRUCTOR**

- 1 Introducción
- 2 Propiedades
- 3 Aceptación de materiales
- 4 Referencias
- 5 Anexos

Octubre de 1997

**CONTROL DE CALIDAD DE LOS MATERIALES  
(DIPLOMADO DE CALIDAD DE LA CONSTRUCCION)**

**PROPIEDADES Y PRUEBAS PARA ACEPTACION DE MATERIALES**

**MACIZOS ROCOSOS Y FRAGMENTOS DE ROCA COMPACTADOS  
SUELOS NATURALES Y COMPACTADOS**

**Jorge E. Castilla Camacho**

**INTRODUCCION**

Toca en este capítulo exponer las acciones que es necesario ejercer durante la construcción de un proyecto, para asegurar la calidad de los materiales involucrados, particularmente de los macizos rocosos, los suelos naturales, los fragmentos de roca compactados (enrocamientos) y de los suelos compactados en general.

La calidad requerida de estos materiales o de cualquier otro, dependerá del papel que juegue dentro del proyecto con el que esté involucrado, es decir de las expectativas que el proyectista le consideró y que deben por lo tanto de cumplirse, como mínimo, para lograr congruencia con el diseño de que se trate.

Los requerimientos de calidad pueden estar expresados en las especificaciones de construcción mediante la indicación de características o condiciones que deben de presentar o lograrse con los materiales, o bien de las propiedades o parámetros que estos deben de cumplir para satisfacer congruentemente al diseño.

El cumplimiento durante la construcción de esta calidad debe ser responsabilidad del constructor, quien debe de cerciorarse de lograrla y controlarla, tocando al supervisor la verificación de los sistemas y procesos aplicados, de los resultados logrados y de su compatibilidad con las exigencias del proyecto.

Siendo los materiales a los que nos estamos refiriendo, y en general los materiales involucrados con la geotecnia (suelos y rocas), materiales que pueden presentar heterogeneidades y anisotropías en el entorno de las obras de que se trate, y considerando las limitaciones que ofrecen, por necesidad, los métodos de exploración utilizados para la caracterización y determinación de propiedades de los materiales antes mencionados, es muy importante, yo diría fundamental, el acompañamiento por el diseñador, de las actividades del constructor y del supervisor, para no dejar como una función de "Check List" el cumplimiento o no de los requisitos incluidos en las especificaciones.

Por lo antes mencionado, existe la posibilidad, sobre todo en cierto tipo de proyectos de gran envergadura, de que las condiciones o características del medio (macizo rocoso, suelo natural, bancos de préstamo para materiales para compactarse), difieran de aquellas que pudieron preverse al ejecutar el diseño, y deban ajustarse las condiciones del proyecto a éstas, para cumplir con seguridad las funciones para las cuales se concibió la obra. Estos ajustes o adaptaciones serán al fin de cuentas acciones para cumplir con la calidad integral del proyecto, y deben ser realizadas por el diseñador para conservar la coherencia del proyecto.

Sea cual sea la vía que se aplique para aceptar la calidad de los materiales (pruebas de campo o laboratorio, inspección visual de características y condiciones, etc.), debe de constituir una acción expedita, tanto como sea posible, en su aplicación y aporte de resultados, para poder juzgar "sobre la marcha" del proceso constructivo la calidad de los materiales y tomar oportunamente las medidas correctivas, en su caso.

## **PROPIEDADES**

Para fines de diseño las propiedades que interesan en prácticamente cualquier obra de ingeniería civil son: la resistencia, la deformabilidad y la permeabilidad. Podría adicionarse la durabilidad o permanencia de los materiales sin cambios importantes de sus características físicas en el periodo de vida útil de la obra..

Para los materiales de los que nos estamos ocupando en este capítulo, las propiedades anteriores están regidas por otras propiedades físicas o características existentes en ellos, que les confieren y condicionan las propiedades que nos son de interés para fines de diseño.

Agruparemos, para desarrollar el tema, a los macizos rocosos y a los suelos naturales por un lado, y a los enrocamientos y a los suelos compactados por otro, en virtud de que los primeros se refieren a materiales que se utilizan permaneciendo en su lugar de origen, y los segundos después de extraerlos de algún banco, aplicarles algún proceso y de colocarlos en el lugar que se les ha asignado dentro del proyecto en construcción.

Los macizos rocosos y el suelo natural, por su naturaleza, ofrecen posibilidades limitadas para modificar sus propiedades naturales. Aunque hay métodos para lograr su mejoramiento (inyecciones, anclajes, drenajes, densificaciones, consolidación, etc.), los proyectos deben de adaptarse a las propiedades y características que estos ofrecen en forma natural o después de su modificación. En ambos casos, en etapas del proyecto anteriores a la de construcción (planeación y proyecto), se han caracterizado y conocido las propiedades que ofrecen los materiales en forma natural, se ha determinado la posibilidad técnica y conveniencia económica de modificarlas, y definido el método para lograrlo. Esto, a través de exploración, muestreo y pruebas de campo y/o laboratorio, incluyendo tal vez la ejecución de tramos de prueba a escala natural para verificar la aplicabilidad y bondad del método de mejoramiento considerado, y establecer las especificaciones para su aplicación.

Durante la construcción, incluida en ella la etapa de aplicación del método de mejoramiento, se hace necesario ejercer controles propios para garantizar la correcta aplicación del método de mejoramiento elegido y cumplir con las especificaciones y propósito del mismo, así como para

verificar las propiedades resultantes después del mejoramiento, y ver su compatibilidad con las que se consideraron en la concepción del proyecto o bien para adaptarlo a las propiedades posibles de lograr realmente, con objeto de tener un proyecto que cumpla con la seguridad y funcionalidad adecuadas.

Por lo que respecta a los enrocamientos y suelos compactados, que como se dijo, corresponden con materiales extraídos de algún banco, también existen actividades previas a las de la etapa de construcción que permitieron caracterizarlos, juzgar sobre su calidad y posibilidades de uso y determinar los procedimientos más adecuados, técnica y económicamente, para su explotación, procesamiento, colocación y compactación, así como para determinar las propiedades que es posible lograr después de las acciones anteriores, para considerarlas en la etapa de diseño del proyecto.

Toca durante la etapa de construcción establecer y aplicar los controles necesarios para verificar el logro de las propiedades que se establecieron previamente y garantizar así el cumplimiento de los requerimientos del proyecto.

## **ACEPTACION DE MATERIALES**

Una vez establecidas las necesidades de características, condiciones y propiedades que deben de tener los materiales, toca durante la construcción el cumplirlas, verificarlas y medirlas, si es posible, para aceptarlos como adecuados para cumplir con el proyecto. A continuación trataremos aspectos relacionados con cada uno de los materiales a los que hemos estado refiriéndonos.

### **Macizos Rocosos**

Los macizos rocosos tendrán sus propiedades condicionadas por diversos factores: el tipo de roca que los constituya, la alteración e intemperismo que presente, el grado de fracturamiento que lo afecte (frecuencia, espesor, longitud, relleno existente en el mismo, condiciones de las paredes de las fracturas, etc.), la presencia de accidentes geológicos en la masa de roca, las propiedades propias de la roca intacta que constituye los fragmentos entre fracturas y/o diaclasas, así como del relleno que se encuentre entre ellos, las características geométricas de los accidentes anteriores dentro de la masa de roca y su relación con la superficie libre del macizo, la topografía del macizo rocoso, y varios otros que a fin de cuentas conferirán al macizo rocoso propiedades particulares que deberemos conocer para considerarlas en el diseño que nos ocupe, la bibliografía al final de estas notas contiene mayor información para estos fines (ver del 1 al 6, 26 y 27).

Conocidas las características y propiedades del macizo rocoso, podrá realizarse el diseño del proyecto de que se trate. Generalmente los macizos de roca se ven asociados a obras de gran embergadura como presas, túneles, grandes excavaciones, etc. Para cumplir con las necesidades del proyecto, muy frecuentemente hay que hacer mejoramientos del macizo de roca como parte del procedimiento constructivo de la obra, que permitan homogeneizar las

condiciones del mismo y proporcionar un mínimo de control de las propiedades de éste, al menos localmente, en el entorno inmediato del macizo asociado a la obra.

Durante la construcción, la aceptación o no de las características y propiedades de los macizos rocosos, dependerá de los controles y resultados mismos de las acciones para el mejoramiento que se hayan aplicado, pudiéndose, desde luego, verificar las propiedades resultantes mediante las mismas técnicas y procedimientos con los que se exploró originalmente el macizo rocoso. Pero, sobre todo, la vigilancia por observación directa de las condiciones del macizo rocoso en la parte más expuesta del mismo, y que es en general la más involucrada con el proyecto de ingeniería de que se trate, juega un papel de la mayor importancia y constituye la mejor "prueba" para la aceptación o no del macizo de roca, permitiendo además decidir sobre las acciones que deben de aplicarse para lograr los objetivos del proyecto.

Como se ha dicho, las propiedades de los macizos rocosos pueden modificarse en algunas ocasiones, dentro de ciertos límites. Por ejemplo, puede modificarse su permeabilidad mediante la inyección de productos en el interior de su masa, de sus fracturas y otras diaclasas; o introduciendo drenaje mediante perforaciones para aumentar su permeabilidad, si esto es lo que por condiciones de proyecto se requiere.

La inyección de productos, en el interior del macizo de roca además de reducir su permeabilidad, aumentará, bajo ciertas condiciones, su resistencia y disminuirá su deformabilidad. El diseño, aplicación y control de los métodos para lograrlo constituyen en sí toda una especialidad. Los resultados de aplicar esta tecnología de mejoramiento del macizo de roca se evalúan de la misma forma en que pudieron determinarse las propiedades originales del macizo, es decir pruebas de permeabilidad (Lugeon) o bien determinación de la deformabilidad de la masa con ayuda de prospección geofísica (geosísmica), sin embargo, la mejor garantía del mejoramiento se obtiene durante la ejecución misma del tratamiento, controlando el producto(s) que se inyecta (mezclas agua/cemento, en ocasiones con bentonita, arena, o aditivos para diversos propósitos), los volúmenes que es posible inyectar y las presiones que se desarrollan durante la inyección, y la distribución de las "tomas" del producto inyectado en el medio, etc.

El drenaje puede constituir un procedimiento para el mejoramiento de la resistencia del macizo rocoso, al eliminar o controlar los efectos dañinos que en él pudiera ocasionar la subpresión que pudiera generarse entre bloques de roca por agua acumulada en las fracturas que los limitan. El control de su ejecución es muy importante y puede limitarse, en primera instancia, a la verificación, por geometría, de que éste se realice en la zona en que se proyectó y alcance las profundidades consideradas en el proyecto, cruzando los planos o zonas en las que se quiere evitar o controlar la generación de presiones hidráulicas.

A largo plazo, el conocer la eficiencia y efectividad de los drenes es muy importante, pues en general tienden a obturarse por el taponamiento que pueden sufrir debido a la depositación de minerales en sus paredes (carbonatos, óxidos, etc.), o al arrastre de partículas. La instalación adecuada de piezómetros en el entorno de la zona que se pretende drenar es una medida necesaria, así como lo es el diseño adecuado de los drenes, incluyéndoles filtros o aditamentos que eviten la depositación de minerales en sus paredes o extremos en contacto con aire, para aumentar su tiempo de vida útil efectiva. Los resultados que arroja la

piezometría pueden indicar la necesidad de realizar limpieza de mantenimiento en los piezómetros o de ejecutar drenes adicionales.

Mediante la instalación de anclajes u otros medios de soporte se mejoran las características de resistencia locales de la masa de roca, como puede ser el entorno de excavaciones subterráneas o de taludes en excavaciones a cielo abierto. El mejoramiento es en un volumen reducido del macizo de roca, pero es en aquel que juega un papel importante dentro del proyecto al que nos enfrentamos. La verificación y aceptación de los resultados de este mejoramiento mediante la aplicación de soporte al macizo de roca reside en los controles que se hayan ejercido durante la instalación de los elementos de soporte mismos. Por ejemplo: si se trata de anclajes, y estos son de fricción, el control residirá en las características del producto utilizado para inyectar al ancla, en el grado de retaque que se haya logrado entre el ancla y la pared de la perforación para transmitir por fricción la carga de una a otra; si el anclaje es de tensión, en el agarre que tenga el elemento mecánico con la roca dentro de la perforación. Al final de la instalación siempre podrán realizarse pruebas de extracción de anclas para verificar si la carga que éstas aportan al macizo de roca es adecuada con el proyecto considerado. Un aspecto muy importante a considerar es el diseño particular del elemento de soporte y el cuidado en su instalación, incluyendo protecciones contra corrosión, con la finalidad de lograr sistemas de soporte duraderos a lo largo de la vida útil del proyecto de que forman parte.

Al principio se mencionó la durabilidad como una propiedad adicional importante para el diseño. En realidad esta depende de diversos factores como es la propia resistencia del medio, las características que éste presente (alteración, intemperismo, fracturamiento, homogeneidad, etc.), las acciones a que vaya a estar expuesto (flujo, cambio de condiciones de humedad, carga, etc.), que pueden provocar su deterioro progresivo por erosión, desgaste, rotura, etc. La durabilidad puede mejorarse mediante tratamientos que eviten las condiciones dañinas, aislando al medio de que se trate de los factores que pueden deteriorarlo, mediante tratamientos superficiales (p.ej. concreto o mortero lanzado).

Como hemos visto, la calidad y propiedades de los macizos rocosos se determinan y juzgan desde la etapa de estudios. Si se decide su mejoramiento, al aplicarlo, se deben ejercer controles, y pueden, durante la aplicación del mejoramiento o al final del mismo, verificarse las propiedades logradas para considerarlas en el diseño de que se trate, mediante las mismas pruebas de laboratorio y/o campo aplicadas en la etapa de exploración y caracterización del medio. Sin embargo, no termina ahí la acción de juicio sobre la calidad de los macizos rocosos. Una parte muy importante se debe de ejercer durante el proceso constructivo mismo.

Esté el macizo rocoso ligado a cualquier obra de ingeniería civil, como puede ser la cimentación de cualquier estructura incluyendo una presa, la excavación de un túnel, la construcción de una vía de comunicación. Durante la construcción misma será el momento en que pueda verse realmente al material de que estamos hablando, que estará íntimamente involucrado con la obra, y que tendremos que apreciar para aceptarlo o no en relación al proyecto. Antes podemos haber juzgado la masa de roca en conjunto, ahora tendremos que juzgar a la superficie de roca sobre la que se desplantará la estructura, o se apoyará un revestimiento o un muro, a que quedará expuesta al medio ambiente.



En general no habrá pruebas físicas que nos permitan evaluarlo y medir cualitativamente alguna propiedad para proceder a su aceptación. Será la observación visual, el entendimiento del papel que juega el macizo de roca, o la porción involucrada de él, en el proyecto; y el mejor juicio basado en conocimientos, sentido común y experiencia, lo que permita o no aceptar al material como se presenta y, en su caso aplicar las medidas correctivas locales para satisfacer el objetivo del proyecto en seguridad, funcionalidad y durabilidad.

Estas medidas pueden ser, por ejemplo, la remoción de roca alterada, intemperizada o fracturada mediante medios mecánicos energéticos (rompedoras neumáticas), la remoción de promontorios de roca firme, aun con explosivos, que ofrecen geometría indeseable para el apoyo de estructuras, la reposición con concreto de depresiones sobre la superficie de roca, el retiro de fragmentos sanos pero algo desprendidos de la masa de roca, la limpieza y relleno con concreto o mortero de fracturas para protección de los rellenos que hubiera en ellos (concreto dental), y cualquier otra que se justifique para lograr el objetivo del proyecto.

## **Suelo Natural**

Este material tiene implicaciones semejantes a la de los macizos rocoso en lo que se refiere a que será utilizado permaneciendo en su lugar de origen. Lo veremos involucrado en cimentaciones de estructuras, túneles y excavaciones a cielo abierto. En el proceso de estudios del proyecto de que se trate debió de haber sido explorado y caracterizado mediante pruebas de campo y de laboratorio para determinar sus propiedades índice, mecánicas e hidráulicas, aplicando las técnicas propias de la mecánica de suelos (ver referencias 1 a 3, 10 a 14 y 26), y determinando su distribución horizontalmente y a profundidad. Del conocimiento de sus propiedades y de la demanda a la que estará sometido por las solicitaciones del proyecto, podrá juzgarse si sus propiedades, características y condiciones son aceptables o se requiere su modificación mejorándolas. Se diseñará y aplicará el método de mejoramiento y, como en los macizos rocosos, se controlará, y podrán determinarse nuevamente las propiedades del medio para verificación de los resultados y ejecución del diseño considerando las nuevas propiedades. Durante la construcción podrán verificarse algunas características y condiciones del suelo natural para su aceptación o modificación en orden de cumplir con las expectativas del proyecto.

Durante la etapa de estudios la determinación de propiedades debe de realizarse de la manera más confiable para representar las condiciones de trabajo del suelo; y con la mayor precisión posible. Existen técnicas de campo y de laboratorio para ello que incluyen desde la exploración para toma de muestras según sea el tipo de suelo, ensayos de campo para determinar resistencia, deformabilidad y permeabilidad; y ensayos de laboratorio para identificación y clasificación del suelo y para determinación de propiedades mecánicas y representar comportamientos esperados para poder, cuantitativamente, involucrar en el análisis y diseño el comportamiento esperado del suelo.

Del conocimiento de las propiedades en esta etapa y de las implicaciones de éstas en el comportamiento de las estructuras del proyecto, se decidirá sobre la necesidad de mejorar el suelo por alguna de las técnicas aplicables. Estas técnicas pueden ser por medios mecánicos hidráulicos y químicos, o por inclusión de elementos o sustancias en la masa de suelo (ver

referencias (24 y 25). De cualquier forma se procurará mejorar la resistencia, deformabilidad y/o permeabilidad del suelo, básicamente mediante su densificación por compactación, consolidación o relleno de vacíos por inyección; aumento de fuerzas de liga entre partículas por efectos eléctricos, químicos o físicos; inclusión de elementos resistentes en la masa de suelo, como pilotes, columnas de materiales rígidos, etc.

La aplicación de los métodos para mejoramiento de suelos es ya parte de la etapa de construcción del proyecto y deben de aplicarse procedimientos de verificación del beneficio causado por el método y para determinar propiedades del suelo modificado. Las propiedades pueden determinarse con los mismas técnicas con que se determinaron en la etapa de estudio, pero se requieren pruebas que permitan el control en cuanto a homogeneidad y calidad del procedimiento de mejoramiento del suelo, que sean aplicables y proporcionen resultados de manera expedita, para poder tomar decisiones oportunas durante el mismo proceso y que permitan a su vez la aplicación, relativamente profusa, en el medio involucrado para poder tener evaluación confiable y completa de los resultados del mejoramiento. Estas pruebas que llamaremos de control, puede que no midan en forma directa las propiedades utilizadas explícitamente en el análisis y diseño del proyecto, sino otras que se relacionen con ellas. Es por ello que deben de calibrarse las pruebas de control y establecerse correlaciones particulares para los materiales, procesos y condiciones de trabajo del sitio, entre los resultados de las pruebas de control y las propiedades de interés para el diseño, ejecutando secciones de prueba del método de modificación del suelo. De estas correlaciones entre las pruebas de control y las mas rigurosos o elaboradas para determinación de propiedades se establecerán cartas de control y criterios de aceptación acordes con el proyecto.

Las pruebas de control pueden ser de aplicación en superficie o a profundidad, pero deben siempre abarcar el volumen de suelo involucrado. Entre las de aplicación de superficie, además de controlarse mediante las pruebas índice de mecánica de suelos (granulometría, contenido de agua, límites de consistencia líquido y plástico, clasificación de suelos, etc.), según se indica en las referencias 12 a 14, pueden incluirse las de placa, la geosísmica, los penetrómetro ligeros, las calas para determinación de peso volumétrico, y los métodos nucleares par determinación de peso volumétrico. Para el control de propiedades a profundidad, existen los conos dinámico y estático la prueba de penetración estándar, los presurómetros y algunos métodos geofísicos.

Debe mencionarse que los pruebas aportan resultados numéricos que permiten establecer estadísticamente las condiciones del suelo y usar los valores para un mejor control documentado, pero no debe de olvidarse que la vigilancia y supervisión durante la construcción, por personal entrenado y experto es la primera fuente de juicio de los logros de un proceso constructivo.

En el anexo se incluyen copias de procedimientos de pruebas de control extraídas del Manual de Procedimientos de la Gerencia de Ingeniería Experimental y Control de la Comisión Federal de Electricidad.

La prueba de placa permite la medición de las características de deformabilidad y resistencia del terreno sobre el que se ejecuta, Su ejecución es relativamente sencilla y aporta resultados inmediatamente al final de su terminación. Su resultado dependerá del tamaño, rigidez y forma de la placa utilizada para la aplicación de la carga y no representa una propiedad

intrínseca del material (ver referencia 26). Es una prueba de carácter estático que nos proporciona la relación entre la deformación y la carga que se aplica al terreno a través de una placa (módulo de reacción), pudiendo proporcionar datos de la resistencia del terreno si se provoca una deformación tal que se produzca la falla del terreno por penetración de la placa en él.

Los métodos geofísicos (sísmicos) para determinación de propiedades del terreno tienen la ventaja de ser de aplicación relativamente rápida y de proporcionar resultados inmediatamente al final de su aplicación. La profundidad y volumen involucrado en prueba dependen del equipo que se utilice y de la energía que se introduzca en el terreno para efectuar la medición. La prueba consiste en generar una perturbación en el terreno mediante la aplicación de un impacto (por golpeo con un martillo o por una explosión), generando así ondas de corte y de compresión en el terreno, que viajan a través de él y pueden ser registradas por geófonos colocados a diferentes distancias del punto en que generaron. La medición del tiempo entre la generación y arribo de las ondas al punto de medición y la distancia entre ellos, permiten la medición de transmisión de las ondas en el medio de que se trate y el cálculo de las propiedades elásticas dinámicas del material (ver referencia 1,2 y 26).

Los penetrómetros ligeros son equipos que permiten medir en forma rápida y con mucha frecuencia características puntuales de la resistencia del terreno a ser penetrado por un elemento que consiste básicamente en una varilla ligada a un dinamómetro que mide esa resistencia. Los equipos permiten, en forma indirecta, la medición del peso volumétrico y del contenido de agua en el campo, al haber sido previamente calibrado el penetrómetro en el laboratorio directamente contra suelos compactados en moldes. Una de estas pruebas es la denominada de valor relativo de soporte (VRS), que puede ser aplicada a los materiales en el campo o en laboratorio (ver referencias 10 a 12 y 30).

La determinación del peso volumétrico o compacidad relativa del material en su lugar es uno de los procedimientos más socorridos para el control de características físicas y mecánicas de materiales térreos en el campo, teniendo el inconveniente de que los resultados se obtienen después de secar al material, lo cual puede llevar algún tiempo después de la aplicación del método dependiendo del procedimiento que se aplique (estufa u horno), para solventar esta circunstancia existe un método, indirecto también, pero de rápida aplicación y presentación de resultados, que consiste en la obtención del contenido de agua y peso volumétrico del material con ayuda de equipo nuclear (ver referencias 10 a 14, 29 y 30).

Para la determinación de propiedades a profundidad en forma rápida existen los llamados conos y el método de penetración estándar (SPT). Los conos pueden ser introducidos en el terreno en forma estática o dinámica y medir la resistencia a la penetración en el terreno, de un elemento longitudinal (barra), en la punta o en el fuste de la misma. Los hay instrumentados eléctricamente lo que permite contar con registros continuos de la resistencia o bien aquellos en los que se lleva solo el registro de una presión de hincado, cuando es estático, o un conteo de golpes para hacerlo penetrar, cuando es dinámica (ver referencias 28 y 30).

## **Enrocamiento**

El enrocamiento es un material que se extrae en banco, generalmente con explosivos, puede ser procesado o no, se coloca y se compacta en el lugar que le corresponde según el proyecto. Está constituido por fragmentos de roca de tamaño variable, mayores a las 3" y hasta varias decenas. Se utiliza para formar terraplenes de piedra (pedraplenes) para cimentar caminos u otras estructuras, obras de protección o respaldos de presas.

Su calidad depende desde del tipo de roca que lo constituye, de las características y condiciones de la masa de roca de la cual se extrajo, de la manera en que se aplicaron los explosivos para su explotación, del proceso sufrido, de la forma en que se colocó y de la forma en que se compactó.

Por el tamaño de sus los fragmentos que lo constituyen, tanto por dificultad de maniobras como por el volumen involucrado en las pruebas que tendrían que hacerse para lograr representatividad de los resultados, las pruebas que se hacen para su control, generalmente son escasas, pues son tardadas e interfieren con el proceso constructivo. Sin embargo si se realizan y éstas son del mismo tipo que las ejecutadas para otro tipo de suelos pero con mayor volumen. Consisten básicamente en la determinación de pesos volumétricos mediante calas y granulometrias.

Por las restricciones anteriores, juega un papel muy importante la supervisión de las operaciones en el manejo de los enrocamientos. Desde la elección del banco para explotarlo, hasta su colocación y compactación.

Los bancos que se elijan deben de ser de roca sana y explotarse en forma tal que produzcan (hasta donde sea posible) la variación de tamaños que interese. Aunque los tamaños que se logren dependerá principalmente del fracturamiento que exista en el banco, la forma de explotarlo puede modificar o influir también este parámetro (ver referencias 7 y 8).

Generalmente se pretende que los enrocamientos sean resistentes y poco compresibles para lo cual se requiere que estén constituidos por partículas sanas, que presenten granulometrias bien graduadas ( la mayoría de tamaños en proporción adecuada), y sean no contaminados por suelos cohesivos (arcillas). Sin embargo, en ciertas obras se requiere que presenten principalmente resistencia y permeabilidad (escolleras, obras de protección), por lo que las granulometrias adecuadas serán más bien las uniformes, pero con capacidad de retener a los materiales que estén abajo o atrás de ellas, para evitar su fuga a través de los vacíos entre las partículas que constituyen a las capas sobre o enfrente de ellos.

Desde la operación de carga en la cantera puede iniciarse u proceso de selección de los materiales para su utilización, realizando un operación de peinado, con el equipo de acercamiento y/o carga, para separar materiales por tamaño, o puede recurrirse a rejas de apertura predeterminada. La manera de "tirar" el material en el sitio de utilización condiciona la homogeneidad del mismo. Ya sea por balconeo desde capas superiores o por colocación de montones y extendido con tractores, se logran materiales diferentes en cuanto a la distribución de tamaños pudiendo haber segregación de tamaños en la masa de enrocamiento en conformación.

La compactación generalmente se determina con base en pedraplenes de prueba realizados previamente a las operaciones de construcción, con la finalidad de establecer el número de veces que el equipo deberá pasar por un mismo lugar para lograr una compacidad adecuada del enrocamiento. El control puede establecerse por mediciones topográficas de la superficie expuesta del enrocamiento, por calas volumétricas grandes (diámetro del agujero para hacer la cala de cuando menos 5 veces el diámetro nominal de la partícula que constituye al enrocamiento), mediante pruebas de placa, o por medición de las vibraciones producidas al transitar el equipo mismo de compactación sobre el enrocamiento. Estas mediciones pueden hacerse sobre el terreno o bien el propio equipo de compactación tener integrado un medidor de vibraciones que indica la variación de la rigidez del material sobre el cual transita al irlo compactando (ver referencias 17 a 23 y 26).

De hacerse calas volumétricas siguiendo el procedimiento usual, como el indicado en el anexo para suelos con partículas de menor tamaño. Se debe tener cuidado al medir el volumen de la excavación de la cual se extrajo el material compactado. Esta medición se hace colocando una membrana de plástico (polietileno) en el fondo de la excavación y rellenando con agua la excavación. Para hacer esta determinación se deben realizar calibraciones del método para determinar el volumen.

## **Suelos Compactados**

Los suelos compactados pueden dividirse en materiales cohesivos (arcillas y algunos limos) y no cohesivos (gravas, arenas y algunos limos). Desde luego existen las mezclas de los dos que tienen que compactarse como tales. En este caso si la porción de material cohesivo está alrededor del 15 % ésta regirá el comportamiento de la mezcla, pues las partículas cohesivas (granulares) quedarán "flotando" en la matriz de suelo cohesivo.

Como todos los materiales que se han tratado en este capítulo, su calidad dependerá de las características de los mismos. El control de estas características empieza en el propio banco de explotación, mediante la clasificación de campo, o apoyada en laboratorio, del suelo de que se trate.

Las pruebas que para aceptación de los materiales se realicen una vez colocados son principalmente para determinar pesos volumétricos, granulometrías y contenidos de agua, en forma directa o indirecta, mediante calas o mediciones con equipo nuclear o para verificar resistencias mediante la medición de la resistencia a la penetración de elementos al terreno (ver referencias 10 a 14, 17, 18 22 y 26).

En los anexos se han incluido algunos procedimientos de prueba como referencias. El manejo del acervo de datos que se obtienen como resultado de la aplicación de estas pruebas de control ha sido objeto de otros capítulos de este mismo curso.

## REFERENCIAS

1. DOBRIN, M.B. (1960) "Introduction to Geophysical Prospecting" Second Edition. International Student Edition. McGraw-Hill Book Company, Inc. Tokyo, Japan.
2. GRIFFITS, D.H. y KING, R.F. (1972) "Geofísica Aplicada para Ingenieros y Geólogos" Traducido por Río de la Cruz, A. Paraninfo. Madrid, España.
3. HALL, W.J., NEWMARK, N.M. y HENDRON, A.J. (?) "Classification, Engineering Properties and Field Exploration of Soils, Intact Rock and In Situ Rock Masses. U.S. Atomic Energy Commission. Washington, D.C. U.S.A.
4. BROWN, E.T. (1981) "Rock Characterization, Testing and Monitoring" ISRM Suggested Methods. International Society for Rock Mechanics. Pergamon Press. Great Britain.
5. LNEC (1983) "Desenvolvimentos Recentes no Dominio da Mecânica das Rochas" Laboratorio Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, Portugal.
6. ALBERRO, J. (1974) "Apuntes del Curso de Mecánica de Rocas" División de Estudios de Posgrado. Facultad de Ingeniería. UNAM. México, D.F.
7. GUSTAFSSON, R. (1977) "Técnica Sueca de Voladuras" Traducido por Bravo, B. Nora Boktryckeri, AB. Suecia.
8. OLOFSSON, S.O. (?) "Applied Explosives Technology for Construction and Mining" APPLEX, Arla, Sweden.
9. AVITIA, R.C. (1971) "Suelo Cemento" Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. México, D.F.
10. RICO, A. y DEL CASTILLO, H. (1974) "La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres" Octava Reimpresión. Vol. I y II. Editorial Limusa, S.A. de C.V. México, D.F.
11. JUAREZ, E. y RICO, A. (1963) "Mecánica de Suelos" Segunda Edición. Vol. I, II y III. Talleres Larios. México, D.F.
12. SRH (1970) "Manual de Mecánica de Suelos" Secretaria de Recursos Hidráulicos. México, D.F.
13. LAMBE, T.W. (1951) "Soil Testing For Engineers" Twelfth Printing. John Wiley & Sons, Inc. N.Y. U.S.A.
14. AKROYD, T.N.W. (1954) "Laboratory Testing in Soil Engineering" Soil Mechanics Limited. London, England.
15. SOCIEDAD MEXICANA DE MECANICA DE SUELOS (1979) "Mejoramiento Masivo de Suelos" SMMS No. 017. México, D.F.

16. CFE (1985) "Comportamiento de Presas Construidas en México. 1974-1984" SMMS No. 060. México, D.F.
17. USBR (1960) "Design of Small Dams" U.S. Department of the Interior. Bureau of Reclamation. Washington, D.C. U.S.A.
18. MARSAL, R.J. y RESENDIZ, D. (1968) "Compactación de Suelos Arcillosos. Propiedades Mecánicas de Suelos Arcillosos Compactados" Instituto de Ingeniería, UNAM. No. 187. México, D.F.
19. MARSAL, R.J. y RESENDIZ, D. (1968) "Problemas de Construcción y Control de Materiales en Presas de Tierra y Enrocamiento" Instituto de Ingeniería, UNAM. No. 193. México, D.F.
20. MARSAL, R.J. y RESENDIZ, D. (1975) "Presas de Tierra y Enrocamiento" Limusa, México, D.F.
21. MARSAL, R.J. (1980) "Contribuciones a la Mecánica de Medios Granulares. Selección de Trabajos de Raúl J. Marsal" CFE, México, D.F.
22. SHERARD, J.L., WOODWARD, R.J., GIZIENSKI, S.F. y CLEVINGER, W.A. (1967) "Earth and Earth-Rock Dams" John Wiley and Sons, Inc., New York, USA
23. FORSSBLAD, L. (1981) "Vibratory Soil and Rock fill Compaction" Dynapac Maskin AB. Dolna, Sweden.
24. STAMATOPOULOS, A.C. y KOTZIAS, P.C. (1990) "Mejoramiento de Suelos por Precarga" Traducido por Navarro, R. Noriega Limusa, México, D.F.
25. HAUSMANN, M.R. (1990) "Engineering Principles of Ground Modification" Mc. Graw-Hill Publishing Co., New York. U.S.A.
26. CFE (1981) "Manual de Diseño de Obras Civiles. Sección B. Geotecnia". Comisión Federal de Electricidad. México, D.F.
27. INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS SUGGESTED METHODS. (Colección de publicaciones sobre métodos de prueba en roca intacta y macizos rocosos). Secretariat of the ISRM. Lisboa, Portugal.
28. SANTOYO, E., LIN XUE, R. y OVANDO, E. (1989) "El Cono en la Exploración Geotécnica". TGC Geotecnia, México, D.F.
29. TERZAGHI, K. y PECK, R.B. (1967) "Soil Mechanics in Engineering Practice" Second Edition. John Wiley and Sons, New York. USA.
30. INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA (1990). "Mecánica de Suelos Instructivo para ensaye de Suelos" IMTA, México, D.F.

# **ANEXOS**



# COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADA

## 1. PROPOSITO

Este procedimiento tiene como propósito establecer una guía para determinar la relación contenidos de agua-densidades secas del suelo compactado, para aplicarlos en los procedimientos constructivos y el control de la compactación de campo.

## 2. ALCANCE

El método es aplicable a los suelos finos plásticos y, en general, a mezclas suelo-agregados cuya fracción fina es cohesiva, y en los que con este procedimiento se logra definir bien la curva de compactación y la densidad seca máxima. La prueba se emplea en suelos que pasan la malla No. 4.

## 3. REFERENCIAS

3.1 Norma ASTM D 698

3.2 Norma ASTM D 2168

## 4. DEFINICIONES

**Contenido de agua óptimo.** Es aquel contenido de agua con el que se obtiene la densidad seca máxima del suelo compactado.

**Densidad seca máxima.** Es la densidad seca que corresponde con el valor máximo obtenido de la curva de compactación del suelo y corresponde al punto en que la tangente trazada a dicha curva es horizontal.

## 5. INSTRUCCIONES

### 5.1 Equipo mínimo requerido

- Molde Proctor de 10,2 cm de diámetro y 11,7 cm de altura, con extensión de 5 cm de altura (ref 3.1).

- Martillo de compactación manual o mecánico de 46 cm de altura de caída libre, 5,1 cm de diámetro y 4,54 kg de masa (ref 3.1).

- Base estándar de forma cúbica o cilíndrica de concreto de 90 kg de peso mínimo (recomendable para lograr consistencia en los resultados).
- Balanza con capacidad mínima de 10 kg y precisión mínima de 1 g.
- Varios: regla metálica para enrasar, malla No.4, mortero y mano de mortero cubierta de hule, cucharón, horno de secado, desecador, recipientes para determinar el contenido de agua, charola, espátulas y recipientes de vidrio con tapa hermética.

En lugar del martillo de compactación manual, es aceptable emplear un martillo mecánico, a condición de que su diseño permita una buena repartición de los golpes en toda la superficie de la muestra. Los martillos mecánicos deben calibrarse periódicamente, por comparación con el dispositivo manual, empleando muestras de un material moderadamente plástico, con un contenido de agua vecino al contenido de agua óptimo. La densidad seca, obtenida con el martillo mecánico, no debe diferir más de  $0,1 \text{ kN/m}^3$  de la obtenida con el martillo manual. Las calibraciones deben hacerse a cada 1000 determinaciones de la densidad, después de haber suspendido el uso del compactador por un tiempo prolongado, incluyendo sus reparaciones, y cuando se obtengan resultados dudosos. Las calibraciones se harán de acuerdo con los métodos indicados en la ref 3.2.

## 5.2 Preparación de la muestra

Consiste en seleccionar una porción representativa del material por ensayar, de manera que se obtengan alrededor de 15 kg de suelo que pasa la malla No.4. Previamente al cribado se disgrega el suelo con una mano de mortero cubierta de hule, cuidando de no romper los granos individuales.

Para la preparación de la muestra existen dos procedimientos: en húmedo y en seco. Es preferible, siempre que sea posible, que los suelos clasificados como ML, CL, OL, GC, SC, MH, CH, OH y PT, se preparen por vía húmeda.

La preparación por vía húmeda se hace cribando por la malla No. 4 la muestra seleccionada con su contenido de agua original. El material retenido se desecha.

En el método seco se deja secar el suelo al aire, o en el horno a una temperatura inferior a  $60^\circ\text{C}$ . El suelo seco se criba por la malla No. 4 y se desecha el material retenido.

## 5.3 Ejecución de la prueba

1. De la muestra ya preparada, que ha pasado por la malla No. 4, se toma una cantidad de suelo suficientemente grande para obtener 2,5 kg de suelo para la determinación de cada uno de los puntos de la curva de compactación. Se requiere un mínimo de cinco determinaciones, dos con contenidos de agua inferiores al óptimo y dos con contenidos de agua superiores.

2. Se mezcla cada fracción de suelo (masa aproximada igual a 2,5 kg) con suficiente agua para obtener el contenido de agua deseado; debe tomarse en cuenta el contenido de agua inicial del material. Esta operación puede hacerse con un atomizador.
3. Se almacena cada una de las mezclas en un recipiente de vidrio con tapa hermética, para permitir que el contenido de agua sea uniforme en toda la mezcla. Si el material tiene baja plasticidad, deberá almacenarse durante doce horas y si la plasticidad es alta, uno o dos días.
4. Se pesa el molde Proctor con su placa de base.
5. Se acomoda el collarín de extensión sobre el molde.
6. Se coloca en el molde la quinta parte de una de las fracciones de suelo, aproximadamente. Se empareja la superficie con los dedos.
7. Se compacta esta capa con 25 golpes de martillo de 4,54 kg de masa, con altura de caída libre de 46 cm. Los golpes deberán distribuirse uniformemente sobre la superficie de la capa.
8. Se repiten los pasos 6 y 7 con una segunda, tercera y hasta la quinta capa. La superficie de la quinta capa deberá sobresalir 6 a 13 mm del borde del molde, dentro del collarín de extensión.
9. Se quita, con cuidado, el collarín de extensión y se enrasa el suelo con una regla metálica. En caso de materiales plásticos, es conveniente aflojar el material en contacto con el collarín antes de quitar éste, para evitar que se desprendan trozos de suelo.
10. Después de limpiar el cilindro exteriormente, se pesan el molde (incluyendo la placa base) y el suelo, con una precisión de 1 g. El valor obtenido se anota en el registro de cálculo.
11. Se desarma el molde para extraer fácilmente el material. Conviene emplear, para esta operación, un extractor.  
  
Se hacen dos determinaciones de contenido de agua en dos muestras representativas, cada una con peso aproximado de 100 g, una tomada de la parte superior del molde y otra del fondo.
12. Se repiten los pasos 5 a 11 para las cuatro fracciones restantes de suelo, preparadas como se indica en los pasos 2 y 3.
13. Se dibuja la gráfica de densidad seca contra contenido de agua de compactación.

Es conveniente dibujar, al mismo tiempo, la curva de saturación completa, cuya ecuación es la siguiente:

$$\gamma_d = \frac{S_s}{1 + wS_s}$$

donde:

w      contenido de agua  
S<sub>s</sub>    densidad de sólidos del material  
γ<sub>d</sub>    densidad seca



# PRUEBA DE COMPACTACIÓN PORTER

## 1. PROPOSITO

Determinar el contenido de agua óptimo y la densidad seca máxima del suelo compactado para aplicarlos en las especificaciones de construcción y en el control de la compactación de campo. Los resultados de la prueba son necesarios para el control de la compactación de terracerías, sub-bases y bases de pavimentos.

## 2. ALCANCE

La prueba está limitada a la fracción de suelos que pasan la malla de 1". Deberá efectuarse también en los suelos finos en que la prueba de compactación por impactos no pueda llevarse a cabo, como son las arenas de río o de mina, arenas producto de trituración y en general, en todos los materiales que carezcan de cohesión o cementación.

## 3. REFERENCIAS

3.1 SCT Normas de construcción. Muestreo y pruebas de materiales, Tomo IX, Parte primera. Capítulo 2. Edición. 1981.

## 4. DEFINICIONES

**Contenido de agua óptimo.** Es la humedad mínima con la que al aplicar la carga para compactar al suelo, como se indica en las instrucciones que se describen adelante, se humedece la base del molde de compactación.

**Densidad seca máxima.** Es la densidad seca que se obtiene al compactar el suelo con su contenido de agua óptimo.

## 5. INSTRUCCIONES

### 5.1 Equipo mínimo requerido

- Molde Porter de 15,7 cm de diámetro y 20,3 cm de altura.
- Máquina de compresión con capacidad mínima de 300 kN y aproximación de 10 N para cargas bajas.

- Varilla metálica con punta de bala de 1,9 cm de diámetro y 30 cm de longitud.
- Placa circular para compactar de 15,5 cm de diámetro.
- Balanza con capacidad mínima de 10 kg y precisión mínima de 1 g.
- Varios: charolas de lámina, malla de 1" (25,4 mm), malla No.4, probeta graduada de 500 cc, probeta graduada de 1000 cc, regla de 15 cm graduada en milímetros, horno de secado, desecador, recipientes para determinar el contenido de agua, espátulas y recipientes de vidrio con tapa hermética.

## **5.2 Preparación de la muestra**

Consiste en seleccionar una porción representativa del material por ensayar, de manera que se obtengan alrededor de 16 kg de suelo que pasa la malla de 1". Previamente a su cribado, se disgrega el suelo con una mano de mortero cubierta de hule, cuidando de no romper los granos individuales.

Para la preparación de la muestra existen dos procedimientos: en húmedo y en seco. Es preferible, siempre que sea posible, que los materiales cuya fracción fina se clasifique como: ML, CL, OL, MH, CH, OH y PT, se preparen por vía húmeda.

La preparación por vía húmeda se hace cribando por la malla de 1" la muestra seleccionada con su contenido de agua original. El material retenido se desecha.

En el método seco se deja secar el suelo al aire, o en el horno a una temperatura inferior a 60°C. El suelo seco se criba por la malla de 1" y se desecha el material retenido.

En caso de requerirse compactar el suelo para utilizarlo en la prueba de Valor Relativo de Soporte (VRS), deberá procederse como sigue:

Si la muestra original contiene menos de 15% en peso de material que se retiene en la malla de 1", debe utilizarse para la prueba el material que pasó la malla. Cuando el retenido en la malla 1" exceda de 15% en peso, será necesario sustituir este retenido por una cantidad igual en peso de material pétreo que pase la malla de 1" y se retenga en la No. 4, el cual deberá tomarse de otra muestra del mismo material.

## **5.3 Ejecución de la prueba**

1. A la muestra ya preparada (16 kg aprox.), que ha pasado por la malla de 1", se le agrega suficiente agua para obtener un contenido de agua un poco menor que el óptimo esperado. Debe tomarse en cuenta el contenido de agua inicial del material.

2. Para realizar la prueba, se toman de la muestra por cuarteo cuatro porciones representativas del suelo de por lo menos 4 kg cada una, cada porción deberá mezclarse con el agua requerida para la compactación. La primera porción tendrá el contenido de agua de la

muestra después del paso 1, correspondiente a la primera determinación. Las tres porciones restantes tendrán un contenido de agua igual al de la porción anterior más 80 cc.

3. Se almacena cada una de las mezclas en un recipiente de vidrio con tapa hermética para permitir que el contenido de agua se uniformice en toda la mezcla. Si el material contiene finos de baja plasticidad, deberá almacenarse durante doce horas y, si la plasticidad es alta, uno o dos días.

4. Se pesa el molde sin su base y se anota en el registro de cálculo.

5. Se acomodan su base y su extensión.

6. Se coloca en el molde la tercera parte de una de las porciones de suelo, aproximadamente. Se empareja el suelo con los dedos y a la capa se le dan 25 golpes con la varilla metálica, distribuidos uniformemente sobre su superficie.

7. Se repite el paso anterior con una segunda y tercera capa.

8. Se coloca la placa circular de carga.

9. Con la prensa se compacta el suelo hasta una presión de 13,8 MPa, la que deberá aumentarse desde cero en un tiempo de cinco minutos.

10. La presión deberá mantenerse constante durante un minuto e inmediatamente hacer la descarga a cero en otro minuto.

11. Si al llegar a la carga máxima no se humedece base del molde, se considera que el contenido de agua de la muestra ensayada es menor que el óptimo. En caso de que en la carga máxima se observe que se humedece la base del molde por haberse iniciado la expulsión del agua, se considerará que el material se encuentra con una humedad ligeramente mayor que la óptima Porter. Para fines prácticos se debe considerar que el espécimen se encuentra con su humedad óptima cuando el comienzo del humedecimiento de la base del molde coincide con la aplicación de la carga máxima.

12. Los resultados obtenidos después de compactado el suelo se anotan en el registro de cálculo.

13. Se repiten los pasos 4 a 12 con la siguiente porción de suelo y así sucesivamente, hasta que en una prueba coincida el comienzo del humedecimiento de la base del molde con la aplicación de la carga máxima.

14. En cada caso se determina la altura del espécimen restando la altura entre la cara superior de éste y el borde del molde, de la altura total del molde. Se pesa el espécimen con el molde de compactación, se le resta el peso del molde y se calcula la densidad húmeda.

15. Se extrae el espécimen del molde y se determinan su contenido de agua óptimo y su densidad seca máxima.



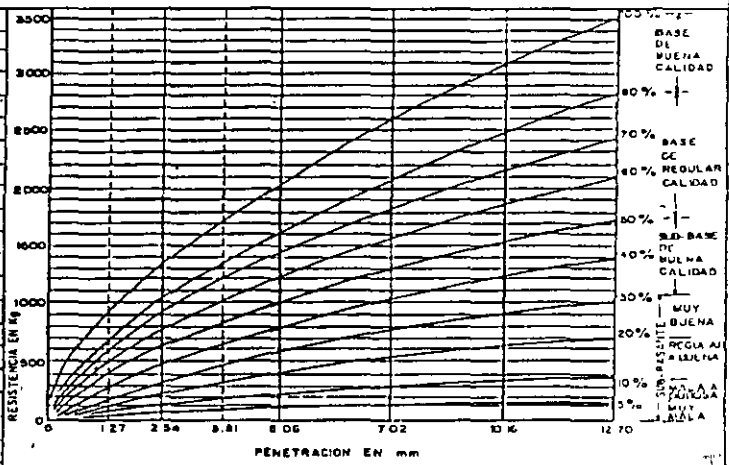
CFC

PRUEBA DE COMPACTACION  
PORTER Y V.R.S.

11010

OBRA \_\_\_\_\_ FECHA \_\_\_\_\_  
BANCO \_\_\_\_\_ MUESTRA \_\_\_\_\_  
LOCALIZACION \_\_\_\_\_ OPERADOR \_\_\_\_\_

MOLDE No. \_\_\_\_\_  
ESTACION KILOMETRO \_\_\_\_\_  
MOLOE + WH \_\_\_\_\_  
PESO MOLDE \_\_\_\_\_  
PESO WH \_\_\_\_\_  
ALTURA MOLDE \_\_\_\_\_  
ALTURA FALTANTE \_\_\_\_\_  
ALTURA ESPECIMEN \_\_\_\_\_  
ARF<sup>a</sup> DEL MOLDE \_\_\_\_\_  
VO DEL ESPECIMEN \_\_\_\_\_  
P VOL. H. \_\_\_\_\_  
P VOL. S.M \_\_\_\_\_  
% DE V.R.S. \_\_\_\_\_  
Nº DE CAPSULA \_\_\_\_\_  
WH + CAP \_\_\_\_\_  
WS + CAP \_\_\_\_\_  
PESO DE CAP. \_\_\_\_\_  
% DE HUMEDAD \_\_\_\_\_  
PENETRACIONES  
1 27 PRESION \_\_\_\_\_  
2 54 \_\_\_\_\_  
3.81 \_\_\_\_\_  
5.08 \_\_\_\_\_  
7.62 \_\_\_\_\_  
10.16 \_\_\_\_\_  
12.70 \_\_\_\_\_  
1 27 Kgs. \_\_\_\_\_  
2.54 \_\_\_\_\_  
3.81 \_\_\_\_\_  
5.08 \_\_\_\_\_  
7.62 \_\_\_\_\_  
10.16 \_\_\_\_\_  
12.70 \_\_\_\_\_



OBSERVACIONES

1

LECTURA INICIAL \_\_\_\_\_ ALTURA ESPECIMEN \_\_\_\_\_  
LECTURA FINAL \_\_\_\_\_ % DE EXPANSION \_\_\_\_\_  
DIFERENCIA - \_\_\_\_\_  
OBSERVACIONES \_\_\_\_\_

# COMPACIDAD RELATIVA

## 1. PROPOSITO

Establecer una guía para determinar la compacidad que tiene un suelo granular con respecto a sus estados más suelto y más compacto determinados en el laboratorio.

## 2. ALCANCE

El método está limitado a suelos granulares que pasan totalmente la malla de 3", y que contienen hasta 15% de partículas sin cohesión que pasan la malla No. 200 y hasta 30% de partículas retenidas en la malla de 1 1/2".

## 3. REFERENCIAS

3.1 Engineering properties of soils and their measurement. Joseph E. Bowles. Mc Graw Hill. 3a. Ed. 1988.

## 4. DEFINICIONES

Se define por compacidad relativa  $C_r$ , a la relación siguiente

$$C_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (1)$$

donde:

$e_{\max}$  = relación de vacíos del suelo en su estado más suelto  
 $e_{\min}$  = relación de vacíos del suelo en su estado más compacto  
 $e$  = relación de vacíos del suelo en el lugar

Es mas conveniente sin embargo, usar las densidades secas del suelo, puesto que en el cálculo de las relaciones de vacíos se requiere del uso de la densidad de sólidos. En este sentido la compacidad relativa se expresa como sigue:

$$C_r = \frac{\gamma_d - \gamma_{d \min}}{\gamma_{d \max} - \gamma_{d \min}} \cdot \frac{\gamma_{d \max}}{\gamma_d} \quad (2)$$

donde:

$\gamma_{d \max}$  = densidad seca del suelo en su estado más compacto  
 $\gamma_{d \min}$  = densidad seca del suelo en su estado más suelto  
 $\gamma_d$  = densidad seca del suelo en el lugar

## **5. INSTRUCCIONES**

### **5.1 Equipo mínimo requerido**

- Molde Porter de 15,7 cm de diámetro y 20,3 cm de altura.
- Placa circular para confinar la muestra de 15,5 vcm de diámetro y 12 kg de masa.
- Varilla metálica con punta de bala de 1,9 cm de diámetro y 30 cm de longitud.
- Mazo de hule de 0,5 kg de masa
- Balanza con capacidad mínima de 10 kg y precisión mínima de 1 g.
- Varios: regla metálica para enrasar, malla de 3", malla de 1 1/2", malla No. 4, malla No. 200; cucharón, charola, espátulas y brocha.

### **5.2 Preparación de la muestra**

Consiste en seleccionar una porción representativa del material por ensayar, de manera que se obtengan alrededor de 7-8 kg de suelo seco que pasa la malla de 3".

### **5.3 Ejecución de la prueba**

#### **a) Determinación de la densidad seca compacta**

Se requiere un mínimo de tres determinaciones de la densidad seca en estado compacto. En cada caso se coloca el material en el molde Porter en cinco capas de la siguiente forma:

1. La muestra preparada se mezcla suficientemente para proporcionarle una distribución homogénea de partículas. Esto es para tener la menor segregación posible.
- 2- Se pesa el molde con su base y extensión y se anota en el registro de cálculo.
3. Con el cucharón se coloca la primera capa de suelo en el molde, se empareja con los dedos y se le dan 25 golpes con la varilla metálica, distribuidos uniformemente sobre su superficie.
4. Se coloca la placa circular para confinar la muestra y se gira lentamente varias veces, para asentarla uniformemente sobre la superficie del suelo colocado. Al mismo tiempo se golpea la pared externa del molde con el mazo de hule, debiéndose dar 25 golpes distribuidos uniformemente en todo el perímetro.
5. Se repiten los pasos 3 y 4 con la segunda, y hasta la quinta capa de suelo.
6. Se determina la altura del espécimen, al menos en cuatro puntos diametralmente opuestos, restando la altura entre la cara superior de éste y el borde del molde, de la altura total del molde, y con este dato se calcula la altura promedio del espécimen. Se pesa el espécimen con el molde, se le resta el peso del molde y se calcula la densidad seca compacta.

7. Se extrae el espécimen del molde, se integra a la muestra sobrante y se repiten Los pasos 1 a 7 para una segunda y tercera determinación.
8. Para el cálculo de la compacidad relativa se usará el máximo valor obtenido de la densidad seca compacta, de acuerdo con el siguiente criterio de aceptación:

Seleccione las dos más altas densidades secas compactas obtenidas y calcule su promedio. Si la diferencia entre estas dos densidades, expresada en porcentaje de su promedio, es menor o igual que los valores que se muestran en la tabla 1, el máximo valor obtenido de la densidad seca compacta es aceptable: En caso contrario deberán efectuarse determinaciones adicionales de la densidad y repetir el proceso de aceptación.

**b) Determinación de la densidad seca suelta**

Se requiere un mínimo de tres determinaciones de la densidad seca suelta. Cada determinación se hará de acuerdo con el siguiente procedimiento:

1. La muestra preparada se mezcla suficientemente para proporcionarle una distribución homogénea de partículas. Esto es para tener la menor segregación posible.
2. Se pesa el molde con su caso y se anota en el registro de cálculo.
3. Con el cucharón se vacía el suelo cuidadosamente en el interior del molde, distribuyéndolo uniformemente en toda su superficie con un movimiento circular, evitando en lo posible transmitirle vibraciones por impactos. Deberá tenerse cuidado de que en el suelo colocado no se tengan huecos sin llenar, sobre todo entre o debajo de las partículas de mayores dimensiones. Durante esta operación el cucharón deberá sostenerse un poco arriba de la superficie del suelo, para que el material por colocar resbale, evitando que caiga. Si fuera necesario, se quitarán con la mano las partículas más grandes del cucharón, para impedir que éstas lleguen a rodar hacia el suelo colocado. El molde se llenará hasta rebasar su borde, pero no más arriba de 25 mm de dicho borde.
4. Con la regla metálica se enrasa el exceso de suelo del molde, procurando transmitirle la menor vibración posible. Las partículas mayores que 3/4" se retirarán con la mano y la superficie del suelo se podrá enrasar con la regla metálica y, de necesitarse, con la ayuda de los dedos.
5. Se pesa el espécimen con el molde, se le resta el peso del molde y se calcula la densidad seca suelta.
6. Se extrae el espécimen del molde, se integra a la muestra sobrante junto con las partículas eliminadas y se repiten los paso 1 a 6 para una segunda y tercera determinación.
7. Para el cálculo de la compacidad relativa se usará el mínimo valor obtenido de la densidad seca suelta, de acuerdo con el siguiente criterio de aceptación.

Seleccione las dos más bajas densidades sueltas obtenidas y calcule su promedio. Si la diferencia entre estas dos densidades, expresada en porcentaje de su promedio, es menor o igual que los valores que se muestran en la tabla 1, el mínimo valor obtenido de la densidad seca suelta es aceptable: En caso contrario deberán efectuarse determinaciones adicionales de la densidad hasta cumplir con el criterio de aceptación anterior.


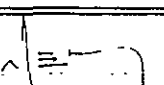
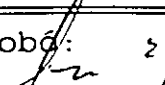
## 6. CALCULO DE LA COMPACIDAD RELATIVA

Conocidas las densidades secas del material al que se le está determinando su compacidad relativa, en su estado más compacto y en estado más suelto, se sustituyen en la ecuación 2 y se calcula dicho valor.

Si se conoce la densidad de sólidos del material, se podrá utilizar la ecuación 1, obteniendo previamente las relaciones de vacíos que corresponden para cada caso.

Tabla 1. Criterio de aceptación en la obtención de las densidades secas suelta y compacta para el cálculo de la Compacidad Relativa

<b>Tipo de material</b>	<b>Intervalo aceptable entre dos resultados, expresado en porcentaje de su promedio</b>
Arenas finas a medias	2,5
Arenas con grava	4,0

COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD GERENCIA DE INGENIERIA EXPERIMENTAL Y CONTROL SUBGERENCIA DE GEOTECNIA Y MATERIALES DEPARTAMENTO DE MECANICA DE SUELOS		Proced. IGM-MS-019 Rev. 1 Fecha: Marzo 25, 1996 Hoja 1 de 5
Título: COMPACIDAD RELATIVA		
Preparó:  Ing. Salomón Sedano L.	Revisó:  Ing. Juan de D. Alemán	Aprobó:  Ing. Jorge E. Castilla

### 1. PROPOSITO

Establecer una guía para determinar la compacidad que tiene un suelo granular con respecto a sus estados más suelto y más compacto determinados en el laboratorio.

### 2. ALCANCE

El método está limitado a suelos granulares que pasan totalmente la malla de 3", y que contienen hasta 15% de partículas sin cohesión que pasan a malla No. 200 y hasta 30% de partículas retenidas en la malla de 1 1/2".

### 3. REFERENCIAS

3.1 Engineering properties of soils and their measurement. Joseph E. Bowles, Mc Graw Hill. 3a. Ed. 1988.

### 4. DEFINICIONES

Se define por compacidad relativa  $D_a$ , a la relación siguiente:

$$D_a = \frac{e_{\text{máx}} - e}{e_{\text{máx}} - e_{\text{mín}}} \quad (1)$$

donde:

$e_{\text{máx}}$  = relación de vacíos del suelo en su estado más suelto  
 $e_{\text{mín}}$  = relación de vacíos del suelo en su estado más compacto  
 $e$  = relación de vacíos del suelo en el lugar

Título: COMPACIDAD RELATIVA

Es más conveniente, sin embargo, usar las densidades secas del suelo, puesto que en el cálculo de las relaciones de vacíos se requiere del uso de la densidad de sólidos. En este sentido la compactación relativa se expresa como sigue:

$$D_d = \frac{\gamma_d - \gamma_{d_{\min}}}{\gamma_{d_{\max}} - \gamma_{d_{\min}}} \frac{\gamma_{d_{\max}}}{\gamma_d} \quad (2)$$

donde:

$\gamma_{d_{\max}}$  = Densidad seca del suelo en su estado más compacto  
 $\gamma_{d_{\min}}$  = Densidad seca del suelo en su estado más suelto  
 $\gamma_d$  = Densidad seca del suelo en el lugar

## 5. RESPONSABILIDADES

El Jefe de la Oficina de Cimentaciones es el responsable de la implementación de este procedimiento.

Los laboratoristas, como ejecutores, son los responsables de su aplicación y el Encargado o Jefe del Laboratorio es el responsable de la verificación de su aplicación en el laboratorio.

## 6. INSTRUCCIONES

### 6.1 Equipo mínimo requerido

- Molde Porter de 15,7 cm de diámetro y 20,3 cm de altura.
- Placa circular para confinar la muestra de 15,5 cm de diámetro y 12 kg de masa.
- Varilla metálica con punta de bala de 1,9 cm de diámetro y 30 cm de longitud.
- Mazo de hule de 0,5 kg de masa
- Balanza con capacidad mínima de 10 kg y precisión mínima de 1 g
- Varios: regla metálica para enrasar, malla de 3", malla de 1 1/2", malla No. 4, malla No. 200, cucharón, charola, espátulas y brocha.

Título: COMPACIDAD RELATIVA

## 6.2 Preparación de la muestra

Consiste en seleccionar una porción representativa del material por ensayar, de manera que se obtengan alrededor de 7-8 kg de suelo seco que pasa la malla de 3".

## 6.3 Ejecución de la prueba

### a) Determinación de la densidad seca compacta

Se requiere un mínimo de tres determinaciones de la densidad seca en estado compacto. En cada caso se coloca el material en el molde Porter en cinco capas de la siguiente forma:

1. La muestra preparada se mezcla suficientemente para proporcionarle una distribución homogénea de partículas. Esto es para tener la menor segregación posible.
2. Se pesa el molde con su base y extensión y se anota en el registro de cálculo.
3. Con el cucharón se coloca la primera capa de suelo en el molde, se empareja con los dedos y se le dan 25 golpes con la varilla metálica, distribuidos uniformemente sobre su superficie.
4. Se coloca la placa circular para confinar la muestra y se gira lentamente varias veces, para asentarla uniformemente sobre la superficie del suelo colocado. Al mismo tiempo se golpea la pared externa del molde con el mazo de hule, debiéndose dar 25 golpes distribuidos uniformemente en todo el perímetro.
5. Se repiten los pasos 3 y 4 con la segunda, y hasta la quinta capa de suelo.
6. Se determina la altura del espécimen, al menos en cuatro puntos diametralmente opuestos, restando la altura entre la cara superior de éste y el borde del molde, de la altura total del molde, y con este dato se calcula la altura promedio del espécimen. Se pesa el espécimen con el molde, se le resta el peso del molde y se calcula la densidad seca compacta.



Título: COMPACIDAD RELATIVA

7. Se extrae el espécimen del molde, se integra a la muestra sobrante y se repiten los pasos 1 a 7 para una segunda y tercera determinación.
8. Para el cálculo de la compacidad relativa se usará el máximo valor obtenido de la densidad seca compacta, de acuerdo con el siguiente criterio de aceptación:

Seleccione las dos más altas densidades secas compactas obtenidas y calcule su promedio. Si la diferencia entre estas dos densidades, expresada en porciento de su promedio, es menor o igual que los valores que se muestran en la tabla 1, el máximo valor obtenido de la densidad seca compacta es aceptable. En caso contrario deberán efectuarse determinaciones adicionales de la densidad y repetir el proceso de aceptación.

#### Determinación de la densidad seca suelta

Se requiere un mínimo de tres determinaciones de la densidad seca suelta. Cada determinación se hará de acuerdo con el siguiente procedimiento:

1. La muestra preparada se mezcla suficientemente para proporcionarle una distribución homogénea de partículas. Esto es para tener la menor segregación posible.
2. Se pesa el molde con su base y se anota en el registro de cálculo.
3. Con el cucharón se vierte el suelo cuidadosamente en el interior del molde, distribuyéndolo uniformemente en toda su superficie con un movimiento circular, evitando en lo posible transmitirle vibraciones por impactos. Deberá tenerse cuidado de que en el suelo colocado no se tengan huecos sin llenar, sobre todo entre o debajo de las partículas de mayores dimensiones. Durante esta operación el cucharón deberá sostenerse un poco arriba de la superficie del suelo, para que el material por colocar resbale, evitando que caiga. Si fuera necesario, con la mano se quitarán del cucharón las partículas más grandes, para impedir que lleguen a rodar hacia el suelo colocado. El molde se llenará hasta rebasar su borde, pero no más arriba de 25 mm de dicho borde.

<p style="text-align: center;">COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD GERENCIA DE INGENIERIA EXPERIMENTAL Y CONTROL SUBGERENCIA DE GEOTECNIA Y MATERIALES DEPARTAMENTO DE MECANICA DE SUELOS</p>	<p>Proced. IGM-MS-019 Rev. 1 Fecha: Marzo 25, 1996 Hoja 5 de 5</p>
<p>Título: COMPACIDAD RELATIVA</p>	

4. Con la regla metálica se enrasa el exceso de suelo del molde, procurando transmitirle la menor vibración posible. Las partículas mayores que 3/4" se retirarán con la mano y la superficie del suelo se podrá enrasar con la regla metálica y, de necesitarse, con la ayuda de los dedos.
5. Se pesa el espécimen con el molde, se le resta el peso del molde y se calcula la densidad seca suelta.
6. Se extrae el espécimen del molde, se integra a la muestra sobrante junto con las partículas eliminadas y se repiten los paso 1 a 6 para una segunda y tercera determinación.
7. Para el cálculo de la compacidad relativa se usará el mínimo valor obtenido de la densidad seca suelta, de acuerdo con el siguiente criterio de aceptación.

Seleccione las dos más bajas densidades sueltas obtenidas y calcule su promedio. Si la diferencia entre estas dos densidades, expresada en porciento de su promedio, es menor o igual que los valores que se muestran en la tabla 1, el mínimo valor obtenido de la densidad seca suelta es aceptable. En caso contrario deberán efectuarse determinaciones adicionales de la densidad hasta cumplir con el criterio de aceptación.

#### 7. CALCULO DE LA COMPACIDAD RELATIVA

Conocidas las densidades secas del material al que se le está determinando su compacidad relativa, en su estado más compacto y en estado más suelto, se sustituyen en la ecuación 2 y se calcula dicho valor.

Si se conoce la densidad de sólidos del material, se podrá utilizar la ecuación 1, obteniendo previamente las relaciones de vacíos que corresponden para cada caso.

# ENSAYES DE COMPACIDAD RELATIVA EN SUELOS GRANULARES GRUESOS

## 1. OBJETIVO DE LA PRUEBA

Estas pruebas se realizan para determinar la relación de vacíos máxima y mínima que puede tener una masa de material granular.

### 1.1 Definición

Se define la compactación por la siguiente expresión:

$$C_r = \frac{\gamma_{d \text{ máx}}}{\gamma_d} \cdot \frac{\gamma_d - \gamma_{d \text{ mín}}}{\gamma_{d \text{ máx}} - \gamma_{d \text{ mín}}}$$

donde:

- $\gamma_{d \text{ máx}}$  = Peso volumétrico seco máximo obtenido en el laboratorio
- $\gamma_{d \text{ mín}}$  = Peso volumétrico seco mínimo del material
- $\gamma_d$  = Peso volumétrico seco del material compactado en la obra

## 2. ALCANCE

En la Gerencia de Ingeniería Experimental y Control (GIEC) la prueba se puede efectuar en dos diferentes cilindros; es decir, mediante probetas de 113 cm de diámetro y 90 cm de altura y con 30 cm de diámetro y 30 cm de altura.

## 3. DESCRIPCION DEL EQUIPO DE PRUEBA UTILIZADO

### 3.1 Probetas de 113 cm de diámetro y 90 cm de altura

Cilindro de acero de 113 cm de diámetro, 90 cm de altura y 0,8 cm de espesor; placa vibratoria de 1 m de diámetro, la cual produce impactos de una tonelada con frecuencia de 50 cps.

El cilindro se calibró pesando el agua introducida en etapas al mismo y midiendo los niveles del agua con un limnómetro, cuya precisión fue de 0,1 mm.

### **3.2 Probetas de 30 cm de diámetro y 30 cm de altura**

Cilindro de acero de 30 cm de diámetro, 30 cm de altura y 0,8 cm de espesor; placa vibratoria de 29 cm de diámetro, la cual produce impactos de 85 kg con frecuencia de 125 cps.

La calibración del cilindro se realizó, midiendo las dimensiones del mismo con un compás mecánico de precisión y una regla metálica que tiene una aproximación de 0,5 mm.

## **4. PROCEDIMIENTO DE ENSAYE**

Generalmente los materiales se reciben del campo a granel en camiones de volteo; por lo que antes de ensayarse se secan al sol, y una vez secos se procesan a través de mallas clasificadoras de tamaño.

### **4.1 Preparación de los especímenes**

#### **a) Probetas de 113 cm de diámetro**

Como preparación del molde, se colocan entre la probeta y la cara interior del mismo, tres placas de tiras de poliestireno de alto impacto de 1 mm de espesor. Cada placa se pega con resistol sobre una hoja de papel envoltura, entre las cuales y el interior del cilindro se embadurna grasa para que se peguen. Esto es con el fin de disminuir la fricción entre cilindro y espécimen.

Las probetas para este cilindro de prueba, se forman con cuatro capas de 22 cm de espesor, cada capa se prepara pesando acumulativamente cada una de sus fracciones componentes y una vez pesada se mezcla. A continuación se carga en tres botes con descarga de falso fondo, los cuales se izan dentro del molde uno a la vez, hasta apoyarlos sobre la placa de fondo del cilindro o bien sobre la superficie de la capa antes colocada. Enseguida se opera el mecanismo de cierre de la compuerta de fondo, permitiendo al material salir; al mismo tiempo se levanta un poco el bote imprimiéndole un lento movimiento horizontal para mejorar la distribución del material de la capa y disminuir la segregación del mismo.

Ya colocada la capa en el cilindro de prueba y dependiendo del grado de compactación de proyecto buscado; se coloca la placa vibratoria antes descrita. Se aplica a cada capa un tiempo de compactación, que para el estado suelto es de cero o cinco segundos y para el más compacto de cinco minutos.

#### **b) Probetas de 30 cm de diámetro**

También para este cilindro y con el mismo fin, se le colocan de la misma manera placas antifriccionantes, sólo varía el espesor del poliestireno que en este caso es de 1/3 mm.

En forma semejante se forman las probetas para el molde chico; el espesor de las capas en éste es de 7 cm. Cada capa ya pesada, se mezcla cuidadosamente en una charola y se deposita dentro del cilindro con un cucharón. De esta forma el material no se vierte, se permite fluir hacia afuera mientras se desplaza el cucharón, manteniéndolo con un pequeño ángulo respecto a la superficie de descarga.

Análogamente al molde grande, se compacta cada una de las capas por medio de la placa vibratoria mencionada en el inciso 3.2. Para el estado suelto no se compactan las capas, sólo se deposita el material de la forma antes descrita; y para el estado más compacto, se vibran las capas con la placa durante tres minutos.

## **5. MEDICIONES DEL VOLUMEN FINAL EN LOS CILINDROS DE PRUEBA**

### **5.1 Cilindro de 113 cm de diámetro**

- a) Colocación de un plástico de polietileno en la superficie final de la probeta formada.
- b) Agregar la cantidad de agua necesaria, hasta formar una superficie horizontal en toda la probeta.
- c) Medición de la altura final por medio del limnómetro antes escrito. El cálculo del volumen final de la muestra, se determina por diferencia de volúmenes.

### **5.2 Cilindro de 30 cm de diámetro**

La altura final de la probeta se mide directamente en seis puntos de la superficie, por medio de una regla metálica y un flexómetro. El volumen final también se determina por diferencia de volúmenes.

## **6. CURVA DE COMPACTACION**

Para la obtención de la curva de compactación del material granular ensayado, se aplica el siguiente procedimiento:

- a) Formación de la probeta (cualquiera de los dos cilindros de prueba).
- b) Compactación de las capas, aplicando a cada una el mismo tiempo de vibrado en cada probeta y con la placa vibratoria respectiva.
- c) Elaboración de varias probetas, variando el tiempo de vibrado para determinar los puntos necesarios de la curva de compactación.

C2Dm1

COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD GERENCIA DE INGENIERIA EXPERIMENTAL Y CONTROL SUBGERENCIA DE GEOTECNIA Y MATERIALES DEPARTAMENTO DE MECANICA DE SUELOS		Proced. IGM-MS-016 Rev. 1 Fecha: Marzo 18, 1996 Hoja 1 de 4
Título: ENSAYES DE COMPACIDAD RELATIVA EN SUELOS GRANULARES GRUESOS		
Preparó: <i>Fuentes</i> Ing. Armando Fuentes R.	Revisó: <i>J. Alemán</i> Ing. Juan de D. Alemán	Aprobó: <i>J. E. Castilla</i> Ing. Jorge E. Castilla

1. OBJETIVO DE LA PRUEBA

Estas pruebas se realizan para determinar la relación de vacíos máxima y mínima que puede tener una masa de material granular.

1.1 Definición

Se define la compacidad por la siguiente expresión:

$$CR (\%) = \frac{\gamma_{d_{\max}}}{\gamma_d} \cdot \frac{\gamma_d - \gamma_{d_{\min}}}{\gamma_{d_{\max}} - \gamma_{d_{\min}}}$$

donde:

- $\gamma_{d_{\max}}$  = Peso volumétrico seco máximo obtenido en el laboratorio
- $\gamma_{d_{\min}}$  = Peso volumétrico seco mínimo del material
- $\gamma_d$  = Peso volumétrico seco del material compactado en la obra

2. ALCANCE

En la Gerencia de Ingeniería Experimental y Control (GIEC) la prueba se puede efectuar en dos diferentes cilindros; es decir, mediante probetas de 113 cm de diámetro y 90 cm de altura y con 30 cm de diámetro y 30 cm de altura.

3. DESCRIPCION DEL EQUIPO DE PRUEBA UTILIZADO

3.1 Probetas de 113 cm de diámetro y 90 cm de altura

Cilindro de acero de 113 cm de diámetro, 90 cm de altura y 0,8 cm de espesor; placa vibratoria de 1 m de diámetro, la cual produce impacto de una tonelada con frecuencia de 50 cps.

Título: ENSAYE DE COMPACIDAD RELATIVA EN SUELOS GRANULARES GRUESOS

El cilindro se calibró pesando el agua introducida en etapas al mismo y midiendo los niveles del agua con un limnómetro, cuya precisión fue de 0,1 mm.

### 3.1 Probetas de 30 cm de diámetro y 30 cm de altura

Cilindro de acero de 30 cm de diámetro, 30 cm de altura y 0,8 cm de espesor; placa vibratoria de 29 cm de diámetro, la cual produce impactos de 85 kg con frecuencia de 125 cps.

La calibración del cilindro se realizó, midiendo las dimensiones del mismo con un compás mecánico de precisión y una regla metálica que tiene una aproximación de 0,5 mm.

## 4. PROCEDIMIENTO DE ENSAYE

Generalmente los materiales se reciben del campo a granel en camiones de volteo; por lo que antes de ensayarse se secan al sol, y una vez secos se procesan a través de mallas clasificadoras de tamaño.

### 4.1 Preparación de los especímenes

#### a) Probetas de 113 cm de diámetro

Como preparación del molde, se colocan entre la probeta y la cara interior del mismo, tres placas de tiras de poliestireno de alto impacto de 1 mm de espesor. Cada placa se pega con resistol sobre una hoja de papel envoltura, entre las cuales y el interior del cilindro se embadurna grasa para que se peguen. Esto es con el fin de disminuir la fricción entre cilindro y espécimen.

Las probetas para este cilindro de prueba, se forman con cuatro capas de 22 cm de espesor, cada capa se prepara pesando acumulativamente cada una de sus fracciones componentes y una vez pesada se mezcla. A continuación se carga en tres botes con descarga de falso fondo, los cuales se izan dentro del molde uno a la vez, hasta apoyarlos sobre la

Título: ENSAYE DE COMPACIDAD RELATIVA EN SUELOS GRANULARES GRUESOS

placa de fondo del cilindro o bien sobre la superficie de la capa antes colocada. Enseguida se opera el mecanismo de cierre de la compuerta de fondo, permitiendo al material salir; al mismo tiempo se levanta un poco el bote imprimiéndole un lento movimiento horizontal para mejorar la distribución del material de la capa y disminuir la segregación del mismo.

Ya colocada la capa en el cilindro de prueba y dependiendo del grado de compactación de proyecto buscado; se coloca la placa vibratoria antes descrita. Se aplica a cada capa un tiempo de compactación, que para el estado suelto es de cero o cinco segundos y para el más compacto de cinco minutos.

#### ) Probetas de 30 cm de diámetro

También para este cilindro y con el mismo fin, se le colocan de la misma manera placas antifriccionantes, sólo varía el espesor del poliestireno que en este caso es de 1/3 mm.

En forma semejante se forman las probetas para el molde chico; el espesor de las capas en éste es de 7 cm. Cada capa ya pesada, se mezcla cuidadosamente en una charola y se deposita dentro del cilindro con un cucharón. De esta forma el material no se vierte, se permite fluir hacia afuera mientras se desplaza el cucharón, manteniéndolo con un pequeño ángulo respecto a la superficie de descarga.

Análogamente al molde grande, se compacta cada una de las capas por medio de la placa vibratoria mencionada en el inciso 3.2. Para el estado suelto no se compactan las capas, sólo se deposita el material de la forma antes descrita; y para el estado más compacto, se vibran las capas con la placa durante tres minutos.

### 5. MEDICIONES DEL VOLUMEN FINAL EN LOS CILINDROS DE PRUEBA

#### 5.1 Cilindro de 113 cm de diámetro

- a) Colocación de un plástico de polietileno en la superficie final de la probeta formada.



COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD  
GERENCIA DE INGENIERIA EXPERIMENTAL Y CONTROL  
SUBGERENCIA DE GEOTECNIA Y MATERIALES  
DEPARTAMENTO DE MECANICA DE SUELOS

Proced. IGM-MS-016  
Rev. 1  
Fecha: Marzo 18, 1996  
Hoja 4 de 4

Título: ENSAYE DE COMPACIDAD RELATIVA EN SUELOS GRANULARES GRUESOS

- b) Agregar la cantidad de agua necesaria, hasta formar una superficie horizontal en toda la probeta.
- c) Medición de la altura final por medio del limnómetro antes escrito. El cálculo del volumen final de la muestra, se determina por diferencia de volúmenes.

## 5.2 Cilindro de 30 cm de diámetro

La altura final de la probeta se mide directamente en seis puntos de la superficie, por medio de una regla metálica y un flexómetro. El volumen final también se determina por diferencia de volúmenes.

## CURVA DE COMPACTACION

Para la obtención de la curva de compactación del material granular ensayado, se aplica el siguiente procedimiento:

- a) Formación de la probeta (cualquiera de los dos cilindros de prueba).
- b) Compactación de las capas, aplicando a cada una el mismo tiempo de vibrado en cada probeta y con la placa vibratoria respectiva.
- c) Elaboración de varias probetas, variando el tiempo de vibrado para determinar los puntos necesarios de la curva de compactación.

Tabla 1. Criterio de aceptación en la obtención de las densidades suelta y compacta para el cálculo de la Compacidad Relativa

Tipo de material	Diferencia aceptable entre dos resultados, expresada en porcentaje de su promedio
Arenas finas a medias	2,5
Arenas con grava	4,0

# **ANEXO**

**Forma de registro de datos de la prueba**

# C. F. E. PRUEBA DE COMPACIDAD RELATIVA

Proyecto \_\_\_\_\_ Prueba N# \_\_\_\_\_ Fecha \_\_\_\_\_  
 Banco \_\_\_\_\_ Operador \_\_\_\_\_  
 Sondeo \_\_\_\_\_ Muestra N# \_\_\_\_\_ Localización \_\_\_\_\_  
 Profundidad \_\_\_\_\_ m Descripción del suelo \_\_\_\_\_

Molde N# \_\_\_\_\_ Peso molde + base \_\_\_\_\_ kg  
 Diámetro \_\_\_\_\_ cm Peso molde + base + ext. \_\_\_\_\_ kg  
 Altura \_\_\_\_\_ cm Densidad en el lugar \_\_\_\_\_ kg/l  
 Alt. ext. \_\_\_\_\_ cm Compacidad relativa \_\_\_\_\_ %  
 Area \_\_\_\_\_ cm<sup>2</sup>  
 Volumen \_\_\_\_\_ cm<sup>3</sup>

## Obtención de la densidad seca compacta

Deter- minac.	Altura del espécimen (cm)					Molde, base y ext. * (kg)	Suelo seco y molde (kg)	Volumen suelo en molde (l)	Densidad seca (kg/l)
	1	2	3	4	Prom.				
1									
2									
3									
4									
5									

\* incluye el peso del suelo

PVS: peso volumétrico seco

## Densidad seca suelta

Determi- nación	Peso mol- de y base con suelo (kg)	Peso del suelo seco (kg)	Densidad seca (kg/l)
1			
2			
3			
4			
5			

## Criterio de aceptación:

$$200(PVSi - PVSj) / (PVSi + PVSj)$$

Determinaciones elegidas  
para aceptación:

Estado compacto <sup>i</sup> <sup>j</sup>  
 Cumple: SI  NO   
 Estado suelto <sup>i</sup> <sup>j</sup>  
 Cumple: SI  NO

Fig. \_\_\_\_\_

# VALOR RELATIVO DE SOPORTE

## 1. PROPOSITO

Este procedimiento tiene como propósito establecer una guía para determinar la calidad de los suelos en cuanto a valor de soporte se refiere, midiendo la resistencia a la penetración de un suelo compactado y sujeto a un determinado periodo de saturación.

## 2. ALCANCE

La prueba es aplicable a suelos compactados con su contenido de agua óptimo, utilizando el método Porter de compactación.

## 3. REFERENCIAS

3.1 SCT Normas de construcción. Muestreo y pruebas de materiales, Tomo IX, Parte primera. Capítulo 2. Edición 1981.

## 4. DEFINICIONES

**Valor Relativo de Soporte (VRS).** Es la relación que existe entre la resistencia que ofrece un suelo para ser penetrado una distancia de 2,54 mm, por un vástago rígido de 5,0 cm de diámetro y el valor de la carga estándar de 13,34 kN (1360 kg).

La relación entre la resistencia a la penetración y el valor de la carga estándar es adimensional y usualmente se expresa en por ciento.

Los laboratoristas, como ejecutores, son los responsables de su aplicación y el encargado o jefe del laboratorio es el responsable de la verificación de su aplicación en el laboratorio.

## 5. INSTRUCCIONES

### 5.1 Equipo mínimo requerido

El equipo empleado es el mismo que se utiliza para la prueba de compactación Porter. Además:

- Placa metálica circular perforada, con un vástago desplazable colocado al centro, sobre el cual se apoya el pie de un extensómetro.

- Un tripié metálico para sostener el extensómetro durante la saturación.
- Dos placas de carga con un diámetro ligeramente menor que el diámetro interior del molde Porter, con un orificio central de 5,2 cm de diámetro y una masa total de 6 kg.
- Un cilindro de acero para la prueba de penetración, de 5,0 cm de diámetro, que pueda sujetarse a la cabeza de carga de la máquina de compresión de la prueba Porter.
- Un tanque de lámina o mampostería de 30 cm de altura.
- Un extensómetro de carátula graduado en centésimos de milímetro (o milésimos de pulgada) con carrera de 25 mm (una pulgada).
- Hojas de papel filtro de 15,7 cm de diámetro.

## 5.2 Preparación de la muestra

Consiste en seleccionar, preparar y compactar una muestra de suelo a su densidad máxima y con su contenido de agua óptimo, utilizando el procedimiento Porter de compactación. Esta parte queda referida por tanto a la prueba Porter.

## 5.3 Ejecución de la prueba

1. Al espécimen compactado según el inciso anterior se le colocan, en la cara superior, una o dos hojas de papel filtro, la placa perforada y las placas de carga, y se introduce en el tanque de saturación. Sobre los bordes del molde se coloca el tripié con el extensómetro y se anota la lectura inicial de éste: Se mantiene al espécimen dentro del agua y se hacen lecturas diarias del extensómetro. Cuando se observa que cesa la expansión, se anota la lectura final del extensómetro y se retira del tanque el molde con el espécimen. El periodo de saturación varía por lo general entre tres y cinco días. La diferencia de lecturas final e inicial del extensómetro dividida entre la altura del espécimen antes de saturarlo y este cociente multiplicado por cien expresará el valor de la expansión en porciento.
2. Se retira el espécimen del tanque de saturación, se le quitan el tripié y el extensómetro y con todo cuidado se acuesta, sin quitar las placas, dejándolo en esta posición durante tres minutos para que escurra el agua. Se retiran las placas y el papel filtro y a continuación se colocan las placas (placas de carga) nuevamente.
3. El espécimen se lleva a la prensa y se le coloca el cilindro de acero para la prueba de penetración, el cual debe pasar a través de los orificios de las placas de carga hasta tocar la superficie de la muestra. Se aplica una carga inicial no mayor que 98 N (10 kg) e inmediatamente después, sin retirar la carga, se ajusta el extensómetro de carátula para registrar el desplazamiento del cilindro.

4. Se procede a la aplicación de las cargas en pequeños incrementos continuos, procurando que la velocidad de desplazamiento del cilindro sea de 1,25 mm/min. Las cargas correspondientes a las penetraciones de: 1,27, 2,54, 3,81, 5,08, 7,62, 10,16 y 12,70 mm se anotan en la hoja de registro.

5. La carga registrada para la penetración de 2,54 mm se debe expresar en porciento de la carga estándar de 13,34 kN. Si la prueba estuvo bien ejecutada, el porciento así obtenido es el valor relativo de soporte correspondiente a la muestra ensayada.

6. Con el fin de saber si la prueba estuvo bien ejecutada, se dibuja la curva carga-penetración, anotando en las abscisas las penetraciones y en las ordenadas las cargas correspondientes registradas. Si esta curva es defectuosa, como la mostrada en la fig 1, ello es debido probablemente a que la carga inicial para empezar la prueba fue mayor que 98 N. En este caso, la prueba deberá repetirse. Si la curva de resistencia presenta en su inicio una concavidad hacia arriba, como se indica en la fig 2, deberá hacerse la siguiente corrección:

Dibújese una tangente a la curva en el punto de máxima pendiente (punto A), hasta cortar el eje de las abscisas en el punto B, que se tomará como nuevo origen. Márquense los puntos C, D, y E, que se tomarán como las penetraciones de 2,54, 5,08 y 7,62 milímetros, respectivamente; por lo tanto, las ordenadas C'C, D'D y E'E representarán las cargas corregidas para dichas penetraciones. El valor relativo de soporte de la muestra será el calculado con el valor de la ordenada C'C, expresado como porciento de la carga estándar de 13,34 kN.

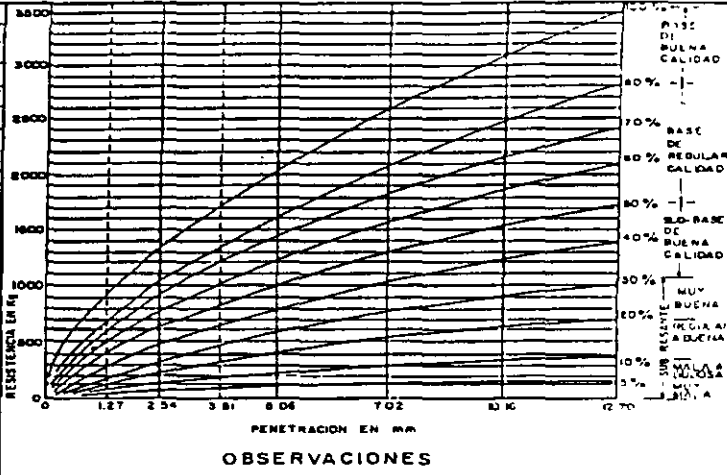
**CFE**

**PRUEBA DE COMPACTACION  
PORTER Y V.R.S.**

1010 UC

OBRA \_\_\_\_\_ FECHA \_\_\_\_\_  
 BANCO \_\_\_\_\_ MUESTRA \_\_\_\_\_  
 LOCALIZACION \_\_\_\_\_ OPERADOR \_\_\_\_\_

VOLDE No. \_\_\_\_\_  
 ESTACION KILOMETRO \_\_\_\_\_  
 MOLDE + WH \_\_\_\_\_  
 PESO MOLDE \_\_\_\_\_  
 PESO W.H. \_\_\_\_\_  
 ALTURA MOLDE \_\_\_\_\_  
 ALTURA FALTANTE \_\_\_\_\_  
 ALTURA ESPECIMEN \_\_\_\_\_  
 AREA DEL MOLDE \_\_\_\_\_  
 VOL. EL ESPECIMEN \_\_\_\_\_  
 P. VOL. H. \_\_\_\_\_  
 P. VOL. S.M. \_\_\_\_\_  
 % DE V.R.S. \_\_\_\_\_  
 NR DE CAPSULA \_\_\_\_\_  
 W.H. + CAP. \_\_\_\_\_  
 W.S. + CAP. \_\_\_\_\_  
 PESO DE CAP \_\_\_\_\_  
 % DE HUMEDAD \_\_\_\_\_  
 PENETRACIONES  
 1.27 PRESION \_\_\_\_\_  
 2.54 \_\_\_\_\_  
 3.81 \_\_\_\_\_  
 5.08 \_\_\_\_\_  
 7.62 \_\_\_\_\_  
 10.16 \_\_\_\_\_  
 2.70 \_\_\_\_\_  
 1.27 Kgs. \_\_\_\_\_  
 2.54 \_\_\_\_\_  
 3.81 \_\_\_\_\_  
 5.08 \_\_\_\_\_  
 7.62 \_\_\_\_\_  
 10.16 \_\_\_\_\_  
 2.70 \_\_\_\_\_



OBSERVACIONES

LECTURA INICIAL \_\_\_\_\_ ALTURA ESPECIMEN \_\_\_\_\_  
 LECTURA FINAL \_\_\_\_\_ % DE EXPANSION \_\_\_\_\_  
 DIFERENCIA - \_\_\_\_\_  
 OBSERVACIONES \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_



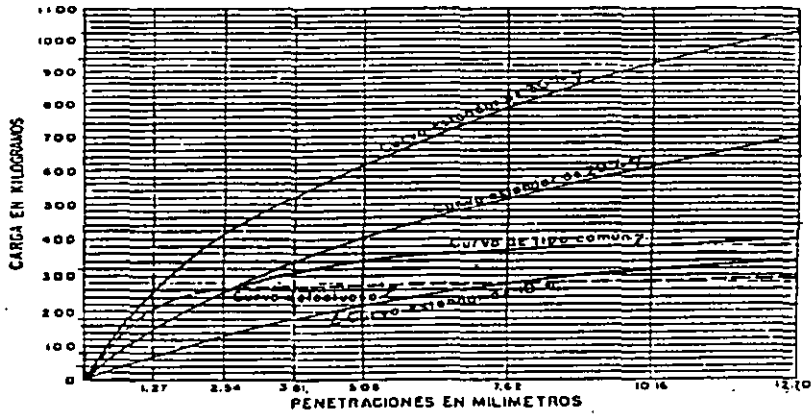


Fig. 1

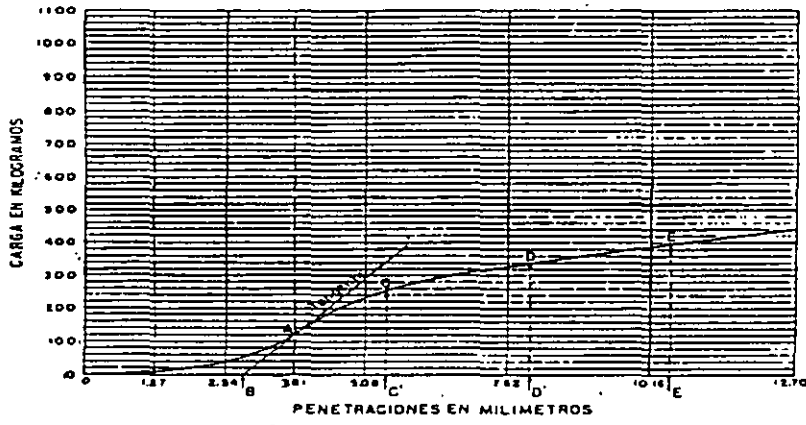


Fig. 2

# CALAS VOLUMETRICAS CON CONO DE ARENA

## 1. PROPOSITO

El procedimiento del cono de arena permite determinar el peso volumétrico seco de un suelo en el sitio.

La prueba consiste en excavar una cala (pozo) en el suelo y obtener el peso de los sólidos secos contenidos en ella, determinándose al mismo tiempo el contenido de agua del material.

## 2. ALCANCE

Con el ensaye se podrá determinar en campo el peso volumétrico seco de suelos compactados artificialmente, de depósitos de suelos naturales, de mezclas de suelos y de otros materiales similares.

Los materiales deberán tener suficiente cohesión o atracción entre partículas de manera que se mantengan estables las paredes de la cala. Esta prueba se utiliza generalmente en suelos no saturados.

## 3. REFERENCIAS

- SARH, "Manual de Mecánica de Suelos", Ed. Gráfica Panamericana, 3a. ed., 1978.
- ASTM, "Parte 19, Soil and Rock; Building Stones", ASTM, 1982, Easton, Md., USA.

## 4. DEFINICIONES

Se denomina peso volumétrico seco al peso de las partículas sólidas y secas por unidad de volumen.

El peso volumétrico seco se calcula dividiendo el peso de los sólidos secos contenidos en la cala, entre el volumen de la misma.

Frecuentemente el peso volumétrico obtenido se utiliza como base de aceptación respecto a un peso volumétrico especificado. Este último se determina conforme a un ensaye estándar de laboratorio.

## 5. PROCEDIMIENTO

### 5.1 Equipo y materiales

1. Ochenta N de arena estándar de Ottawa (que pasa la malla No. 20 y es retenida en la malla No. 30), o cualquiera arena uniforme de granos redondeados, cuya granulometría sea parecida a la arena de Ottawa.
2. Dispositivo para determinación de volúmenes con el procedimiento del cono de arena que consiste de lo siguiente:
  - Cono, molde cilíndrico
  - Recipiente, con capacidad aproximada de 4 litros, al que se adapta el cono
  - Placa base perforada

Los detalles del dispositivo se muestran en la fig 1. Las dimensiones indicadas en ella son las mínimas aceptables para materiales que tienen un tamaño máximo de partículas de 50 mm y para una cala de 3000 cm<sup>3</sup> de volumen, aproximadamente.

Cuando el tamaño de las partículas es mayor a 50 mm se necesitan dispositivos y volúmenes de cala más grandes.

3. Balanza con capacidad mínima de 100 N y 0,050 N de precisión.
4. Balanza con capacidad de 20 N y 0,010 N de precisión.
5. Recipiente de 3 litros de capacidad, con tapa hermética.
6. Horno y desecador.
7. Molde metálico para la calibración de la arena.
8. Varios: papel de envoltura grueso, cápsulas grandes, charola de lámina, regla metálica para enrasar la superficie del suelo, cincel, martillo, espátula de cuchillo, nivel de burbuja, pico y pala.

## **5.2 Calibración**

### **5.2.1 Calibración del cono y de la placa base**

1. Se secan al horno 80 N de arena limpia.
2. Se llena el recipiente de vidrio con la arena seca y se pesa el conjunto con precisión mínima de 0,05 N. Se atornilla el cono al recipiente.
3. Se coloca el papel de envoltura sobre una superficie horizontal, plana y fija, y se pone la placa-base en el centro del mismo.
4. Se invierte el recipiente, y se coloca el cono en la escotadura de la placa-base.

5. Se abre rápidamente la válvula del cono y se espera a que la arena llene la perforación de la placa-base y el cono.
6. Se cierra la válvula. Aunque se abra o se cierre la válvula rápido, no se debe golpear el frasco ni el cono. Se invierte la posición del recipiente. Se desatornilla el cono y se pesan el recipiente y la arena que contengan.
7. Se calcula el peso de la arena utilizada para llenar el cono y la perforación de la placa-base.
8. Se repiten los pasos 2 a 7 las veces que sean necesarias hasta obtener resultados consistentes.

### **5.2.2 Calibración de la arena**

1. Se llena el recipiente de 4 litros de capacidad con arena limpia y secada al horno. Se pesa el conjunto, con una precisión mínima de 0,05 N. Se atornilla el cono al recipiente.
2. Se coloca la placa-base sobre un molde metálico de calibración, aproximadamente del mismo tamaño y forma que las de la cala en el campo.
3. Se invierte el recipiente, y se coloca el cono en la escotadura de la placa-base. Se abre rápidamente la válvula del cono y se espera a que la arena llene el molde de calibración, la perforación de la placa-base y el cono.
4. Se cierra la válvula y se invierte la posición del recipiente. Se desatornilla el cono del recipiente.
5. Se pesa el recipiente y la arena que contenga.
6. Se calcula el peso de la arena requerido para llenar el molde de calibración, y el peso volumétrico seco de la arena, tal como se colocó en el molde de calibración.
7. Se repiten los pasos 1 al 6, el número de veces que sea necesario para verificar que la arena pueda ser colocada con el mismo peso volumétrico en calibraciones sucesivas.

Los resultados de la calibración se anotan en la Tabla 1.

### **5.3 Determinación del peso volumétrico en campo**

1. Se llena el recipiente de 4 litros de capacidad con arena limpia y secada al horno, y se pesa con precisión mínima de 0,05 N. Se tapa el recipiente para evitar pérdidas de material durante el transporte.

2. Enrase a nivel la superficie del suelo en el sitio donde se va a hacer la determinación del peso volumétrico. Deberá cuidarse de remover la capa superficial de suelo, cuyo peso volumétrico no sea representativo del obtenido con el procedimiento de compactación.
3. Se coloca la placa-base sobre la superficie del suelo nivelada y enrasada.
4. Se excava el suelo a través de la perforación de la placa-base. La cavidad debe tener, aproximadamente, las mismas dimensiones que el molde utilizado para calibrar la arena. El volumen de la cavidad debe ser tan grande como sea práctico para minimizar el efecto de los errores y en ningún caso deberá ser menor que el volumen indicado en la Tabla 2.

TABLA 2

Tamaño máximo de partículas	Volumen mínimo de la cala, cm <sup>3</sup>	Muestra mínima para contenido de agua, N
Malla No. 4	710	1,00
1/2"	1420	3,00
1"	2120	5,00
2"	2830	10,00

5. El material que se va extrayendo de la cala se deposita con cuidado en un recipiente hermético, el cual se tapa enseguida para evitar pérdida de humedad.
6. Se desatornilla la cubierta del recipiente con la arena calibrada y se atornilla en su lugar el cono. Se invierte el recipiente y se coloca el cono en la escotadura de la placa-base.
7. Se abre rápidamente la válvula del cono y se deja que la arena llene la cavidad en el suelo, la perforación de la placa-base y el cono.
8. Se cierra la válvula y se invierte el recipiente. Se reemplaza el cono por la tapa roscada del recipiente.
9. Se extrae la arena de la cavidad, y se rellena ésta con el material probado. La porción de la arena que no se haya ensuciado puede recuperarse para usarla en otras pruebas.
10. En el laboratorio, se desatornilla la tapa del recipiente y se pesa con la arena que contenga. Por diferencia de pesos se obtiene el del material que llena la cavidad, la placa y el cono. Con los datos de calibración se calcula el volumen de la cavidad.

11. Se pesa el suelo de la cala contenido en el recipiente hermético.
12. Se mezcla el material extraído y se separa una muestra para determinar su contenido de agua. El peso mínimo de la muestra para determinar su contenido de agua se indica en la Tabla 2.
13. Se calcula el peso volumétrico seco del material siguiendo la secuencia de la Tabla 3.

SUBGERENCIA DE GEOTECNIA Y MATERIALES  
 DEPARTAMENTO DE MECANICA DE SUELOS  
 OFICINA DE CIMENTACIONES  
 CALAS VOLUMETRICAS CON CONO DE ARENA  
 TABLA 1  
CALIBRACIÓN DE LA ARENA

Descripción de la arena por calibrar: \_\_\_\_\_

VOLUMEN CONO Y PERFORACION PLACA

DETERMINACIONES  
 PRIMERA                  SEGUNDA

Peso del recipiente + arena antes de llenar:	_____	_____ N
Peso del recipiente + arena después	_____	_____ N
Peso arena en cono y perforación de placa:	_____	_____ N

PESO VOLUMETRICO SECO ARENA

Peso recipiente + arena	_____	_____ N
Peso recipiente + arena después de llenar:	_____	_____ N
Peso arena en cono, placa y molde:	_____	_____ N
Peso arena contenida en el molde:	_____	_____ N

DIMENSIONES DEL MOLDE

Altura: \_\_\_\_\_ m

Diámetro interior: \_\_\_\_\_ m

Volumen: \_\_\_\_\_ m<sup>3</sup>

PESO VOLUMETRICO SECO ARENA: \_\_\_\_\_ N/m<sup>3</sup>

SUBGERENCIA DE GEOTECNIA Y MATERIALES  
DEPARTAMENTO DE MECANICA DE SUELOS  
OFICINA DE CIMENTACIONES  
CALAS VOLUMETRICAS CON CONO DE ARENA  
TABLA 3  
DETERMINACION EN CAMPO DEL PESO VOLUMETRICO

DATOS DE LOCALIZACION: \_\_\_\_\_

DESCRIPCION DEL MATERIAL: \_\_\_\_\_

VOLUMEN DE LA CAJA

Peso del recipiente + arena antes de llenar cala: \_\_\_\_\_ N  
Peso del recipiente + arena después de llenar cala: \_\_\_\_\_ N  
Peso arena en cala: \_\_\_\_\_ N  
Volumen en cala: \_\_\_\_\_ m<sup>3</sup>

SUELO EXCAVADO

Peso suelo húmedo + tara: \_\_\_\_\_ N  
Peso de la tara: \_\_\_\_\_ N  
Peso suelo húmedo: \_\_\_\_\_ N

CONTENIDO DE AGUA

Peso suelo húmedo + tara: \_\_\_\_\_ N  
Peso suelo seco: \_\_\_\_\_ N  
Peso de la tara: \_\_\_\_\_ N  
Contenido de agua: \_\_\_\_\_ N

RESULTADOS

Peso Volumétrico Seco: \_\_\_\_\_ N/m<sup>3</sup>  
Peso Volumétrico Húmedo: \_\_\_\_\_ N/m<sup>3</sup>

OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_



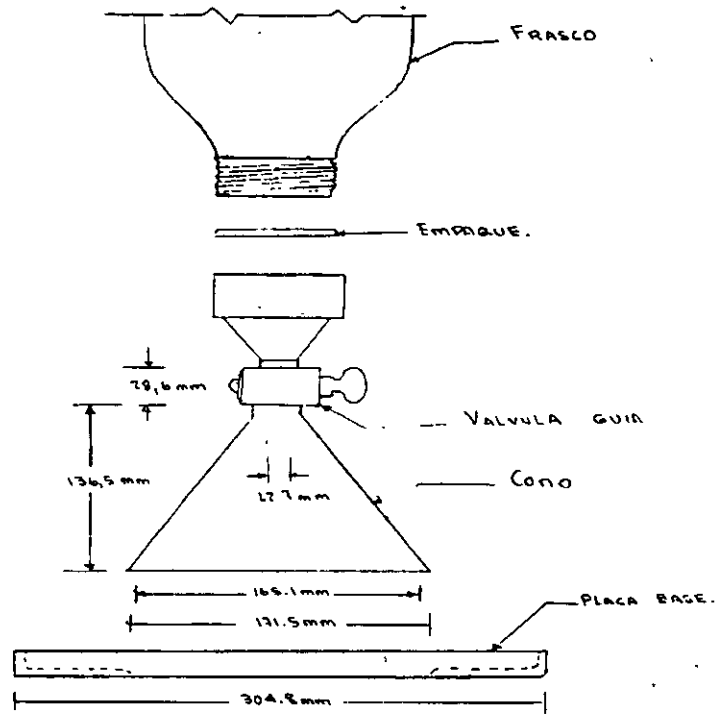


FIG. 1 DISPOSITIVO CONO DE ARENA.

## PROCEDIMIENTO PARA EL USO Y MANEJO DEL DENSIMETRO NUCLEAR CPN, MC-S-24

### 1. PROPOSITO

Establecer los lineamientos para el uso y manejo seguro del densímetro nuclear marca CPN, modelo MC-S-24, de tal manera que se cumplan estrictamente las normas de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS).

### 2. ALCANCE

El método del densímetro nuclear permite determinar el peso volumétrico y el contenido de agua "in situ" a suelos y agregados de suelos de 5 a 60 cm de profundidad en incrementos de 5 cm.

### 3. REFERENCIAS

- 3.1 Manual de Aseguramiento de Calidad de la Gerencia de Ingeniería Experimental y Control
- 3.2 Procedimiento PGIE-001 "Procedimiento para la preparación, emisión y revisión de procedimientos e instructivos.
- 3.3 Notas de curso de "Seguridad radiológica en el uso de medidores industriales con fuente radiactiva a nivel de encargado", Capacitación Avanzada, S.C.
- 3.4 Campbell Pacific Nuclear (CPN) Corporation, 1988 "MC-3 Portaprobe Operating Manual", Martinez, California, USA.

### 4. DEFINICIONES

Para fines de este procedimiento se proporcionan las siguientes definiciones:

**Densímetro nuclear:** Equipo para medir peso volumétrico y contenido de agua de materiales téreos, utilizando para ello dos fuentes radiactivas.

**Radiactividad:** Emisión, por parte de un átomo, de partículas subnucleares o radiación electromagnética.

**Ión:** Electrones, átomos o grupos de átomos que tienen carga eléctrica.

**Fuente Radiactiva:** Todo aquel material que posee radiactividad, que emite radiaciones.

**POE. Personal Ocupacionalmente Expuesto:** Aquel personal que en razón de su trabajo está expuesto a las emisiones de una fuente radiactiva.

**Peso volumétrico total (Dn wet):** Peso del suelo total, incluye sólidos, agua y aire, contenido en una unidad de volumen, se expresa en  $\text{g/cm}^3$ .

**Peso volumétrico seco (Dn Dry):** Peso del suelo una vez secado por 24 horas a  $105^\circ\text{C}$ , contenido en una unidad de volumen, en  $\text{g/cm}^3$ .

**Peso volumétrico seco máximo (Md):** Peso volumétrico seco que se obtiene al aplicar al suelo una energía especificada de compactación con el contenido de agua óptimo.

**Contenido de agua óptimo (OMC):** Es el contenido de agua del suelo con el que se obtiene el peso volumétrico seco máximo del mismo.

## 5. EQUIPO

El equipo opera por la emisión de radiación de dos fuentes radiactivas protegidas con doble sello de seguridad: una fuente de Cesium-137, emite rayos gamma para medición del peso volumétrico y la otra de Americium-241:Berilium, emite neutrones para la medición del contenido de agua.

El densímetro tiene dos vástagos. El vástago izquierdo contiene un detector GM. En el fondo del vástago derecho están localizadas las dos fuentes radiactivas. Inmediatamente arriba de las fuentes está el detector de neutrones lentos para la medición de contenidos de agua.

A continuación se relacionan los datos técnicos del aparato:

Marca	CPN
Modelo	MC-S-24

**Fuente Radiactiva:**

Rayos gamma	Cesio-137, con intensidad de 10 mCi (370 Mbq)
Neutrones	Americio 241/Berilio, con una intensidad de 50 mCi (1,85GBq)

Encapsulación	Cápsula de doble sello
Embarque	Material radiactivo Forma especial, NOS, UN2974 Índice de transporte 0,5 Etiqueta amarilla II

**Rango:**

Densidad	0,96 a $2,88 \text{ t/m}^3$
Contenido de agua	0 a 40% en volumen (0 a 26% en peso)

**Precisión:**

Densidad	0,011 t/m <sup>3</sup>
Contenido de agua	0,3% en peso
Temperatura de operación	0 a 70°C
Potencia	Paquete de ocho baterías AA recargables.
Vida de las baterías	500 a 1000 ciclos de carga-descarga
Tiempo de recarga	14 horas
Pantalla	160 caracteres
Almacenamiento de datos	128 registros de resultados
Microprocesador	Proporciona lectura y almacenamiento directo de los datos.

## **6. SEGURIDAD**

### **6.1 Almacenamiento**

- a) El lugar para el almacenamiento del densímetro nuclear deberá estar dedicado exclusivamente para este fin.

Esto implica que no deberán almacenarse junto con el densímetro equipos y/o herramientas de otro tipo.

- b) El cuarto-almacén deberá contar con un sistema de seguridad apropiado que impida el acceso de personal no autorizado.

Únicamente el personal autorizado deberá tener la llave de acceso a este cuarto.

- c) En la puerta del cuarto-almacén deberá permanecer un rótulo con el símbolo internacional que indica la presencia de radiación y la siguiente leyenda:

**"Prohibido el acceso a personal no autorizado"**

Deberá explicarse al personal que labora en esa área las razones de las medidas de seguridad, de tal manera que se cree conciencia al respecto, pero sin que se llegue a una alarma infundada.

- d) El Encargado de Seguridad Radiológica deberá medir con el equipo portátil medidor de radiaciones los niveles de radiación radiológica en los alrededores del cuarto-almacén al menos cada tres meses. Estas mediciones se registrarán por escrito.

El nivel de radiación deberá ser menor que 2 mR/h. El medidor de radiaciones deberá calibrarse al menos cada doce meses. La calibración deberá hacerla una compañía autorizada por la CNSNS.

- e) Después de cada utilización del equipo, y antes de guardarlo en el almacén; el operador deberá medir las radiaciones alrededor del contenedor, para asegurarse de que no existen fugas de material radiactivo.

El resultado de estas mediciones deberá registrarse en una bitácora expofeso.

## 6.2 Transporte

- a) El densímetro nuclear se deberá transportar dentro de un contenedor que cumpla con la categoría II amarilla.

El contenedor que viene de fábrica con el equipo cumple con esta norma. No deberá utilizarse otro tipo de contenedor. Deberá añadirse al contenedor un letrero que diga:

**PELIGRO**  
**"NO PERMANEZCA INNECESARIAMENTE CERCA DE ESTE EQUIPO"**  
**"EL MANTENIMIENTO DE ESTE EQUIPO REQUIERE DE PERSONAL**  
**CALIFICADO Y PREVIAMENTE AUTORIZADO"**

- b) Antes de subir el equipo al vehículo que lo transportará deberá verificarse lo siguiente:

- 1) Que en la superficie del contener no existan niveles de radiación superiores 50 mR/h.
- 2) Que el vehículo que lo transportará esté autorizado para hacerlo.
- 3) Que el vehículo tenga en un lugar visible el siguiente letrero:

**"ESTE VEHICULO TRANSPORTA MATERIAL RADIATIVO"**  
**"NO PERMANEZCA CERCA DEL VEHICULO INNECESARIAMENTE"**

- 4) Que dentro del vehículo se encuentre la hoja con la lista de qué hacer en caso de accidente.
  - 5) Que dentro del vehículo se encuentren las siguientes herramientas:
    - Extinguidor
    - Banderolas
    - Señales luminosas
    - Seis postes porta-cordón de 1,1 m de altura
    - Cordón rojo para delimitar áreas
    - Dos letreros con la leyenda "PELIGRO, RADIACION"
    - Herramientas y llantas de refacción
- c) El contenedor deberá asegurarse perfectamente dentro del vehículo de tal manera que no exista riesgo de que se mueva por los movimientos de éste.
- d) Verifique, antes de que se vaya a iniciar el transporte, que en la cabina del vehículo no existan niveles de radiación superiores a 2 mR/h.

- e) El transporte del equipo sólo podrá ser hecho por personal autorizado por la CNSNS.

### **6.3 Uso del equipo**

- a) El densímetro nuclear sólo podrá ser utilizado, manejado y transportado por personal debidamente autorizado por la CNSNS. Este personal deberá haber recibido un curso de seguridad radiológica.
- b) El operador deberá evitar el estar innecesariamente cerca del equipo. Cuando no requiera manipular al equipo deberá alejarse al menos a 1 m.
- c) Todo operador deberá portar un dosímetro termoluminiscente personal cada vez que vaya a manejar, almacenar o transportar el equipo.

El operador contará con dos dosímetros. Mensualmente enviará al encargado de seguridad radiológica (ESR) el dosímetro que haya utilizado durante el mes. Este se ocupará de enviarlo a un laboratorio autorizado para que se obtenga la dosis recibida en el periodo.

Llevará un registro con las dosis parciales y acumuladas de cada operario.

- d) El ESR vigilará que ningún operario sobrepase las dosis equivalentes admisibles (LDE), estas son:

- 50 mSv (5 rem) por año
- 4 mSv (400 mrem) por mes
- 0,2 mSv ( 20 mrem) por día
- 2,5 mSv (2,5 mrem) por hora

En caso de que en un mes se supere el LDE, el operario deberá dejar de trabajar con el equipo hasta que su dosis equivalente acumulada promediada al mes esté dentro de los límites.

## **7. PROCEDIMIENTO DE PRUEBA**

### **7.1 Funciones de tecla**

En la fig 1 se muestra el teclado de densímetro nuclear. En lo que sigue se explican las funciones de la diferentes teclas:

Fig. 1

	ID	RECALL	CLEAR	
ENTER	-	7 D	8 E	9 F
	%COMP	MAX	D BIAS	M BIAS
CLEAR	STEP			
	4	5	6	
	TIME	UNIT	STD	CALIB
START	0	1	2	3

Tecla	Función
START	Inicia un conteo
STEP	Actúa como tecla de cambio. Da el siguiente parámetro o pantalla.
CLEAR	Borra la entrada de datos si se presiona antes que ENTER. Detiene las mediciones en proceso. Muestra la pantalla anterior o las más recientes mediciones.
ENTER	Almacena los datos en la memoria. Da la exposición siguiente.
ID	Proporciona identificación de archivo a los datos registrados.
RECALL	Muestra los registros almacenados en memoria.
PRINT	Muestra el menú PRINT.
% COMP	Selecciona % de compactación para los cálculos de: Mw: Peso volumétrico máximo total Md: Peso volumétrico seco máximo
MAX	Pregunta los valores máximos de compactación en g/cm <sup>3</sup>

<b>D BIAS</b>	Pregunta el valor de la desviación del peso volumétrico ( $\pm$ , en $\text{g/cm}^3$ )
<b>M BIAS</b>	Pregunta el valor de la desviación del peso del agua por unidad de volumen ( $\pm$ , en $\text{g/cm}^3$ )
<b>TIME</b>	Pregunta el ambiente de conteo: - Modo de tiempo fijo o de precisión constante - Nuevos valores de tiempo o precisión
<b>STD</b>	Muestra conteos estándares de peso volumétrico y peso del agua y pregunta por los nuevos conteos. Toma los nuevos conteos estándares.
<b>CALIB</b>	Una vez seleccionado el modo Profundidad Fija, pregunta la profundidad de prueba.

Las siguientes funciones se inician presionando la tecla STEP y sosteniendo la presión mientras se presiona la segunda tecla:

<b>STEP+TIME</b>	Pregunta la hora y fecha.
<b>STEP+UNIT</b>	Muestra el menú para seleccionar las unidades de medición y seccionar entre la pantalla de pesos volumétricos y la de conteos por minuto.
<b>STEP+CALIB</b>	Muestra el menú para seleccionar los coeficientes de autocalibración, o ambiente fijo o profundidad automática de las mediciones.
<b>STEP+CLEAR</b>	Limpieza maestra. Restituye directamente la pantalla principal.
<b>ID, luego STEP+ID</b>	Borra los registros de los datos almacenados

## 6.2 Configuración del aparato

El densímetro nuclear muestra las siguientes mediciones después de cada prueba:

1. **Dn wet**      Peso volumétrico total,  $\text{g/cm}^3$
2. **Dn H2O**    Peso del agua por unidad de volumen,  $\text{g/cm}^3$
3. **Dn dry**       $\text{Dn wet} - \text{Dn H2O}$ ,  $\text{g/cm}^3$
4. **%H2O**         $(\text{Dn H2O}/\text{Dn dry}) * 100$



- 5. Mw           Peso volumétrico máximo total
- 6. Md           Peso volumétrico seco máximo, g/cm<sup>3</sup>

El densímetro calculará ahora el % de compactación:

- 7. %Mw           (Dn wet/Mw)\*100
- 8. %Md           (Dn dry/Md)\*100

El operador puede meter desviaciones de peso volumétrico y peso del agua si es necesario.

- 9. +/-           Valores de peso volumétrico, g/cm<sup>3</sup>
- 10. +/-          Valor de peso del agua, g/cm<sup>3</sup>

Los parámetros siguientes se pueden configurar en el densímetro según la necesidad.

<b>Parámetro</b>	<b>Rango</b>
Unidades	pcf, g/cm <sup>3</sup> , o cpm.
precisión	Tiempo o precisión, y el valor: +/- g/cm <sup>3</sup>
% compactación	Md o Mw
Md	
Mw	0 a 999,9
Desviación	
Peso volumétrico	
Peso del agua	+99,9 a -99,9

La entrada de los parámetros al densímetro se realizarán conforme a las instrucciones que siguen:

<b>Acción</b>	<b>Resultado</b>
1. Presione STEP+UNIT	Muestra el menú de unidades
2. Presione ENTER	Escoja unidades entre g/cm <sup>3</sup> o pcf
3. Presione CLEAR	Muestra las unidades seleccionadas
4. Presione ENTER	Escoja entre la pantalla de pesos volumétricos o conteos por minuto
5. Presione CLEAR	Exhibe la opción seleccionada

### Parámetros de tiempo y precisión

1. Apriete TIME Se mueve el cursor al campo de tiempo en la pantalla.
2. Presione STEP Modo de tiempo o precisión se muestra en la pantalla.
3. Tecleé el nuevo valor Se almacena y muestra el nuevo valor.

### Parámetros de % compactación y máximos.

1. Presione %COMP Se mueve en los campos de compactación Mw o Md.
2. Presione MAX Pregunta el nuevo máximo
3. Tecleé el valor y presione ENTER Muestra el valor y lo almacena.

### Parámetros de desviación de peso volumétrico y peso del agua.

1. Presione D BIAS Mueve el cursor al campo de desviación de PV
2. Tecleé la desviación del PV y ENTER Muestra el valor y lo almacena.
3. Presione M BIAS El cursor se mueve al campo de desviación de peso del agua
4. Tecleé el nuevo valor y ENTER Muestra el nuevo valor y lo almacena.

## 7.3 Conteo estándar

Un conteo estándar se deberá realizar diariamente antes de iniciar las mediciones.

Para realizar un conteo estándar coloque el bloque de calibración en una esquina del contenedor cuidando de que queden perfectamente horizontales. Siente el densímetro en el bloque de calibración y verifique que sus cuatro patas entren en las guías del bloque. Ahora proceda como sigue:

<b>Acción</b>	<b>Resultado</b>
1. Presione STD	Muestra en pantalla los últimos datos de conteos estándar.
2. Presione la tecla START	El densímetro inicia un conteo de 256 muestras de un segundo. Un conteo toma aproximadamente 4,4 minutos.

Al finalizar el conteo, el medidor muestra y almacena los datos del conteo estándar. Verifique que los valores  $X_i$  del conteo estén entre 0,75 y 1,25 y que los cambios entre los valores anteriores y los actuales sean pequeños. Si los valores  $X_i$  están fuera de los límites antes señalados, repita el conteo hasta que estos valores sean aceptables.

#### 7.4 Tomando una prueba

Antes de iniciar una prueba se deben cumplir los siguientes requisitos:

- a) Acordone el sitio donde se vaya a trabajar en un área de al menos 3 x 3 y coloque los letreros de advertencia.

Esto evitará que personal ajeno se acerque innecesariamente al equipo. Además lo protegerá del tránsito de camiones y demás equipo pesado.

- b) Con el contador **geiger** verifique que en la superficie del equipo no haya niveles de radiaciones por arriba de los 2 mR/h. En caso contrario, se llevará el equipo a su almacén y se avisará de inmediato al Encargado de Seguridad Radiológica.

- c) En caso de que los niveles de radiación estén por debajo de los admisibles se procederá a realizar las pruebas.

Para tomar una prueba haga lo siguiente:

<b>Acción</b>	<b>Resultado</b>
1. Configure el medidor	Densímetro configurado.
2. Haga los dos agujeros en el sitio a probar.	Sitio preparado para la prueba.
3. Coloque el aparato en el sitio y baje los vástagos a la profundidad deseada.	Densímetro preparado para la prueba.
4. Presione START	Muestra la última profundidad de calibración.

5. Tecleé la nueva profundidad y ENTER

Inicia el conteo de la prueba.

#### Pantalla típica de una prueba

<b>R1</b>	<b>1</b>	<b>225</b>	<b>1327</b>
<b>SF</b>	ET 00:30		T0 1:00
<b>gcc</b>	wet	H20	dry
<b>Dn</b>	2,100	0,100	2,000
<b>Pr</b>	0,008	0,006	0,005
<b>%</b>		5,00	95,00
<b>Md</b>			2,105
<b>Bi</b>	0,0	0,0	

### 7.5 Almacenamiento y revisión de resultados

El aparato puede almacenar 128 registros de pruebas. La información puede ser revisada posteriormente o transferida a una computadora o impresora. Para almacenar los resultados de las pruebas proceda como se indica a continuación:

#### Acción

#### Resultado

1. Seleccione el número de registro entre 0 y 65535

2. Presione ID, introduzca el número de registro.

3. Al finalizar la prueba presione ENTER

4. Para limpiar el espacio de almacenamiento presione ID y luego sosteniendo abajo STEP, presione ID.

Queda registrado el número.

Los resultados son almacenados en un nuevo registro o agregados al registro

El espacio del registro es completamente borrado.

Para revisar los resultados:

## **Acción**

1. Presione RECALL. Con STEP puede moverse al siguiente registro.
2. Introduzca el número de registro deseado y presione ENTER.
3. Con STEP va de prueba en prueba dentro del registro.
4. Para moverse al siguiente registro presione CLEAR.

## **Resultado**

Está en el registro deseado y muestra el resultado de la primera prueba.

Los resultados de las pruebas se muestran en el orden que fueron tomadas.

Ahora puede cambiarse al siguiente registro con STEP.

# PROCEDIMIENTO DE CONO HOLANDES

## 1. OBJETIVO

- 1.1 Este procedimiento describe cómo determinar la resistencia de punta y fricción lateral que son componentes de la resistencia a la penetración que desarrolla una barra con punta al ser hincada en el suelo.
- 1.2 Este procedimiento es aplicable en penetrómetros de punta y de punta-fricción del tipo mecánico y eléctrico. No se incluye la interpretación de resultados.
- 1.3 Los penetrómetros mecánicos que se describen en este procedimiento operan de manera incremental utilizando un penetrómetro telescópico lo cual resulta en una medición de la resistencia en una posición estática. Las restricciones de diseño de los penetrómetros mecánicos impiden una completa separación de la resistencia de punta y la fricción lateral. Los penetrómetros eléctricos avanzan continuamente y se puede medir por separado la resistencia de punta y lateral.

Las diferencias en forma y método de avance entre distintos tipos de cono influyen de manera significativa en los resultados obtenidos.

## 2. ALCANCE

- 2.1 Este procedimiento proporciona información sobre las propiedades ingenieriles del suelo que ayudarán en el diseño y construcción de obras de tierra y cimentaciones de estructuras.
- 2.2 Este procedimiento prueba al suelo *in situ* y no obtiene muestras. la interpretación de resultados de este procedimiento requiere conocimiento previo del tipo de suelo penetrado. Generalmente, los ingenieros obtienen esta información de perforaciones paralelas con muestreo y a veces la información o experiencia local evitan hacer sondeos con recuperación.
- 2.2 Los ingenieros frecuentemente correlacionan los resultados de esta prueba con resultados de laboratorio u otro tipo de pruebas de campo, o directamente con el comportamiento de la estructura. La exactitud de las correlaciones dependerán del tipo de suelo involucrado.
- 2.4 La mayoría de los ingenieros con experiencia en trabajos fuera de costa encuentran este procedimiento adecuado para la exploración en el fondo marino.

## 3. REFERENCIAS

3.1 **ASTM 3441-86.** Standar Test Method for Deep, Quasi-Static, cone and friction-cone penetration test of soil.

#### 4. DEFINICIONES

4.1 **Cono.** La punta en forma de cono de penetrómetro, sobre la cual se desarrolla la resistencia por punta.

4.2 **Penetrómetro de punta.** Instrumento en forma de barra cilíndrica con punta cónica diseñada para penetrar suelo y roca suave y medir la resistencia de punta.

4.3 **Resistencia de punta- $q_c$ .** La resistencia a la penetración desarrollada por el cono, igual a la fuerza vertical aplicada al cono dividida entre el área horizontal proyectada.

4.4 **Sondeo de cono.** La serie entera de penetraciones del cono en un sitio cuando se usa un penetrómetro.

4.5 **Penetrómetro eléctrico.** Un penetrómetro que utiliza transductores de fuerza eléctricos dentro de la punta no telescópica del penetrómetro.

4.6 **Penetrómetro de punta y fricción.** Un penetrómetro de punta con la capacidad adicional de poder medir fricción lateral.

4.7 **Relación de fricción  $R_f$ .** El cociente entre la resistencia lateral y la resistencia de punta expresada en por ciento.

4.8 **Resistencia por fricción  $f_s$ .** La resistencia a la penetración desarrollada por la funda de fricción, igual a la fuerza vertical aplicada a la funda entre su área.

4.9 **Funda de fricción.** Una sección de la punta del penetrómetro sobre la cual se desarrolla la fricción local.

4.10 **Barras interiores.** Barras que deslizan dentro de las barras de hincado para extender la punta de los penetrómetros mecánicos.

4.11 **Penetrómetro mecánico.** Un penetrómetro que utiliza un juego de barras interiores para operar la punta telescópica y transmitir la fuerza a la superficie para ser medida.

4.12 **Punta de penetrómetro.** La sección final del penetrómetro que contiene los elementos activos que miden la resistencia del suelo de punta y fricción.

4.12.1 **Punta de penetrómetro.** La sección final del penetrómetro que contiene los elementos activos que miden la resistencia del suelo de punta y fricción.

- 4.13 **Barras de hincado.** Los tubos de pared gruesa que se usan para avanzar el penetrómetro a la profundidad requerida.

## 5. INSTRUCCIONES

### 5.1 Equipo

#### 5.1.1 Generalidades

- 5.1.1.1 **Cono.** El cono debe tener un ángulo en la punta de  $60^{\circ} (\pm 5^{\circ})$  y un diámetro en la base de  $33,7 \pm 0,4$  mm, lo que resulta en un área horizontal proyectada de  $10 \text{ cm}^2$ . La punta del cono debe tener un radio menor que 3 mm.

**Nota:** Se pueden usar conos con áreas más grande para incrementar la sensibilidad en suelos blandos. La experiencia con conos eléctricos de  $5 \text{ cm}^2$  y  $20 \text{ cm}^2$  muestra que se obtienen datos similares que los conos de  $10 \text{ cm}^2$  cuando se tiene la misma geometría.

- 5.1.1.2 **Funda de fricción.** Tiene el mismo diámetro exterior ( $\pm 0,5$  a  $-0,0$  mm) que la base del cono. Ninguna parte de la punta del cono debe proyectarse fuera del área del diámetro de la funda. La superficie de la funda será de  $150 \text{ cm}^2 \pm 2\%$ .

- 5.1.1.3 **Acero.** La punta y la funda de fricción del cono deben ser hechas con un acero de tipo y dureza adecuados para resistir la abrasión del suelo. La funda de fricción debe tener y mantener en uso una rugosidad de  $0,5 \mu\text{m}$ , AA,  $\pm 50\%$ .

- 5.1.1.4 **Barras de hincado.** Hechas de acero adecuado, estas barras deben tener una sección adecuada para sostener sin pandearse la carga requerida para hincar el penetrómetro. Éstas deben tener un diámetro exterior no mayor que el diámetro de la base del cono en una longitud de al menos 0,4 m arriba de la base, o, en el caso del penetrómetro de punta y fricción al menos 0,3 m arriba de la parte superior de la funda de fricción. Cada una de las barras de hincado debe tener el diámetro interior constante. Deben acoplarse una a otra de modo de formar una sarta rígida de varillaje con un eje recto continuo.

- 5.1.1.5 **Barras interiores.** Los penetrómetros mecánicos requieren una sarta de barras adicional, de acero u otra aleación dentro de las barras de hincado. Las barras interiores debe tener un diámetro exterior constante con una rugosidad, excluyendo ondulamiento,

menor de  $0,25 \mu\text{m}$  AA. Deben tener la misma longitud que las barras de hincado ( $\pm 0,1$  mm) y una sección adecuada para transmitir la resistencia del cono sin



pandearse o algún otro daño. El espacio entre las barras interiores y las barras de hincado debe estar entre 0,5 y 1,0 mm.

**5.1.1.6 Exactitud de las mediciones.** Es necesario tener la instrumentación de medición de fuerza adecuada para obtener medidas dentro del 5% de valores correctos.

**Nota:** En trabajos fuera de costa es recomendable tener sistemas adicionales de instrumentación para asegurar la exactitud mencionada y el buen funcionamiento de los sistemas remotos involucrados.

## **5.1.2 Penetrómetros mecánicos**

**5.1.2.1** El mecanismo deslizante en la punta del penetrómetro mecánico debe permitir un movimiento descendente del cono en relación con las barras de hincado al menos de 30,5 mm.

**Nota:** A ciertas combinaciones de profundidad y resistencia de punta, la compresión elástica de las barras interiores puede exceder la carrera descendente que la máquina puede aplicar a las mismas.

En este caso, la punta no se extenderá y la lectura de cargas aumentará elásticamente hasta el final de la carrera del gato y tendrá un salto abrupto cuando se haga el contacto con las barras de hincado.

**5.1.2.2** El diseño de la punta del penetrómetro mecánico debe incluir alguna protección contra la penetración del suelo al mecanismo deslizante y afectar los componentes de la resistencia.

**5.1.2.3 Penetrómetro de punta.** En la fig 1 se muestra el diseño y accionamiento de una punta de penetrómetro mecánico. Arriba de la punta se añade una capa de diámetro reducido para evitar la intrusión de suelo.

**NOTA.** Se puede desarrollar una cantidad importante de fricción lateral en esa capa e inclinarse en la resistencia de punta.

**5.1.2.4 Penetrómetro de fricción y punta.** En la fig 2 se muestra el diseño y accionamiento de la punta de un penetrómetro de fricción y punta. La parte inferior de la punta incluye una capa a la cual se pega el cono, avanza primero hasta que el flanco embona en la funda de fricción y entonces ambos avanzan.

**5.1.2.5 Equipo de medición.** Mida la resistencia a la penetración en la superficie con un aparato adecuado tal como una celda hidráulica o eléctrica o un anillo de carga.

## **5.1.1 Penetrómetros eléctricos**

**5.1.3.1 Penetrómetro de punta.** La fig 3 muestra un diseño para la punta de un penetrómetro eléctrico. La resistencia en la punta se mide a través de un transductor de fuerza colocado en la misma. Un cable eléctrico u otro sistema adecuado transmite las señales del transductor al sistema de almacenamiento de datos. Los penetrómetros eléctricos permiten el avance continuo y almacenamiento de datos en cada intervalo de hincado de las barras.

**5.1.3.2 Penetrómetro de fricción y punta.** La funda de fricción no debe estar más de 10 mm arriba de la base del cono. En la fig 4 se muestra un diseño de este tipo de penetrómetros.

**5.1.3 Otros penetrómetros.** Los penetrómetros eléctricos pueden incluir otros transductores además de los de medición de la fricción en la funda. De los más comunes son los inclinómetros para ayudar en la determinación de la verticalidad del cono y piezómetros para proporcionar información adicional sobre el comportamiento del subsuelo.

**5.1.4 Máquina de hincado.** La máquina debe proveer una carrera continua, de preferencia con una longitud mayor a la de una barra de hincado. La máquina debe avanzar la barra a una velocidad constante mientras la magnitud de la fuerza requerida fluctúa.

**NOTA.** Los sondeos profundos requieren una capacidad de al menos 5 toneladas. Las máquinas modernas tienen capacidades hasta de 20 toneladas.

**NOTA:** El tipo de reacción que se utilice puede afectar la resistencia a la penetración medida, particularmente en la superficie o en estratos cercanos a ésta.

## 5.2 Ejecución

**5.2.1** Coloque la máquina en posición vertical lo más prácticamente posible.

**5.2.2** Velocidad de penetración. Mantenga una velocidad de penetración de 10 a 20 mm/s  $\pm$  25% cuando se obtengan datos de resistencia. Entre las pruebas se pueden utilizar otras velocidades.

**NOTA.** La velocidad de 10 mm/s permite al operador leer correctamente los valores de resistencia cuando se utiliza el penetrómetro mecánico de fricción-punta, la velocidad de 20 mm/s es adecuada cuando se utiliza el penetrómetro mecánico de punta y permite una correcta operación del cono eléctrico. El estándar europeo requiere 20 mm/s.

**NOTA:** Velocidades de penetración mayores o menores que la estándar se pueden utilizar en circunstancias especiales, tales como cuando se mide la presión de poro. En estos casos debe anotarse en el registro de la prueba.

**NOTA:** Las presiones de poro que se generan adelante o alrededor de la punta pueden influir de manera importante en la medición de  $q_c$  y  $f_s$ . El piezocono con capacidad de hacer ambas mediciones ha mostrado ser útil en estos casos.

### **5.2.3 Penetrómetro mecánico**

**5.2.3.1 Penetrómetro mecánico de punta.** (1) Avance la punta del penetrómetro hasta la profundidad de prueba requerida aplicando la suficiente carga sobre las barras de hincado; y (2) aplique la carga en las barras interiores para extender la punta del penetrómetro. Obtenga la resistencia de punta en un punto especi-

fico durante el movimiento descendente relativo de las barras interiores respecto a las barras de hincado estacionarias. Repita el paso 1. Aplique suficiente carga en las barras de hincado para retraer la punta extendida y avance hasta la nueva profundidad de prueba. Repitiendo este ciclo de dos pasos obtenga la resistencia a distintas profundidades. Los incrementos en la profundidad no deben exceder en general 203 mm.

**5.2.3.2 Penetrómetro de punta y fricción.** Utilice este penetrómetro como se describió anteriormente, pero obtenga dos valores de resistencia durante el paso (2) (figs 2 y 5). Primero obtenga la resistencia durante la fase inicial de extensión. Cuando la parte inferior de la punta alcance y sale la funda de fricción, obtenga una segunda medida de la resistencia total de la punta más la funda de fricción. Al restar se tiene la resistencia de la funda.

**NOTA.** Debido a la estratificación del subsuelo, la resistencia de la punta puede variar durante el movimiento adicional descendente de la misma para obtener la resistencia de la funda.

**NOTA.** La fricción del suelo a lo largo de la funda proporciona una carga adicional arriba del cono y puede incrementar la resistencia por arriba de la medida durante la fase inicial de extensión de la punta de una cantidad desconocida, pero probablemente en pequeña cantidad. Ignore este efecto.

**5.2.3.3 Recopilación de datos.** Para obtener resultados reproducibles en pruebas de cono, deben utilizarse sólo las lecturas que se realicen en un punto definido durante el movimiento descendente de la parte superior de las barras interiores respecto a la parte superior de las barras de hincado. Debido a la compresión elástica de las barras interiores, este punto, comúnmente, no debe encontrarse a menos de 25 mm del movimiento aparente de las barras interiores. Cuando se utilicen penetrómetros de punta y fricción, el punto debe ser justo antes de que la punta enganche la funda de fricción.

**Nota.** En la fig 5 se muestra cómo la carga en la celda hidráulica puede variar durante la extensión de la punta del penetrómetro de punta y fricción.

5.2.3.4 Obtenga las lecturas de punta y fricción tan rápido como sea posible después del brinco que se muestra en la fig 5. El operador no debe reportar datos de punta y fricción cuando sospeche que la resistencia de la punta está cambiando abrupta o erráticamente.

5.2.4 **Penetrómetros eléctricos.** Cuando se utilicen penetrómetros eléctricos, inserte el cable eléctrico a través de la barras de hincado.

5.2.4.1 Obtenga las primeras lecturas del cono con la punta del penetrómetro colgando libremente en aire o agua y a la sombra y después de una pequeña penetración inicial. Pruebe que la temperatura en el fondo de la perforación sea la misma que la de la punta del cono.

5.2.4.2 Obtenga la resistencia de la punta y fricción continuamente o a intervalos no mayores de 203 mm.

5.2.4.3 Al final del sondeo, obtenga una serie de datos como se menciona en 6.2.4.1 para verificar con las lecturas iniciales. Si esta verificación no es correcta, deseche los resultados del sondeo.

### 5.3 Reporte de Resultados

5.3.1 **Gráfica de la resistencia de punta  $q_c$ .** Todos los sondeos de cono deben presentarse con la gráfica de variación de resistencia con las distintas profundidades, estos puntos pueden unirse con líneas rectas como una aproximación para una gráfica continua.

5.3.2 **Gráfica de la resistencia por fricción  $f_s$ .** Además de la gráfica de la resistencia por punta, el reporte puede incluir una gráfica adyacente o superpuesta de la resistencia por fricción o la relación de fricción o ambas con la profundidad. Utilice la misma escala para todas las gráficas.

5.3.3 **Gráfica de la relación de fricción.** Si el reporte incluye descripción del subsuelo estimada a partir de la relación de fricción la gráfica de esta relación necesariamente tendrá que presentarse.

5.3.4 Si se utilizan piezoconos también deberá incluirse la gráfica de la variación de presión de poro con la profundidad.

5.3.5 El operador debe incluir dentro de su reporte, su nombre, localización y nombre del trabajo, fecha del sondeo, número del sondeo, coordenadas de localización, y elevación del piso y nivel de agua (si se tiene). El reporte también debe incluir notas respecto al tipo de máquina utilizada, tipo de penetrómetro utilizando información de la calibración, verificación del cero, el método utilizado para

proporcionar la reacción, si se utilizó un reductor de fricción, condiciones de las barras y punta antes y después de la prueba. Asimismo si por alguna razón la prueba se ejecuta de manera diferente a lo descrito en este procedimiento también deberá reportarse.

Personal familiarizado con este tipo de prueba estima su precisión de la siguiente manera:

**Penetrómetros mecánicos.** Desviación estándar de 10% en  $q_C$  y 20% en  $f_S$ .

**Penetrómetros eléctricos.** Desviación estándar de 5% en  $q_C$  y 10%  $f_S$ .

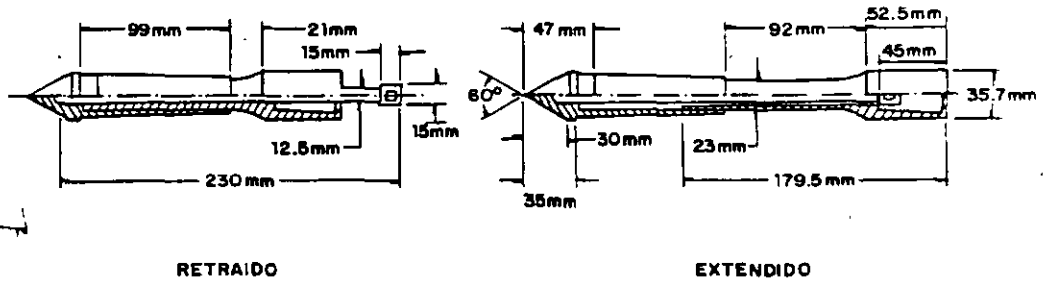


FIG. 1.- EJEMPLO DE UN PENETROMETRO MECANICO DE PUNTA

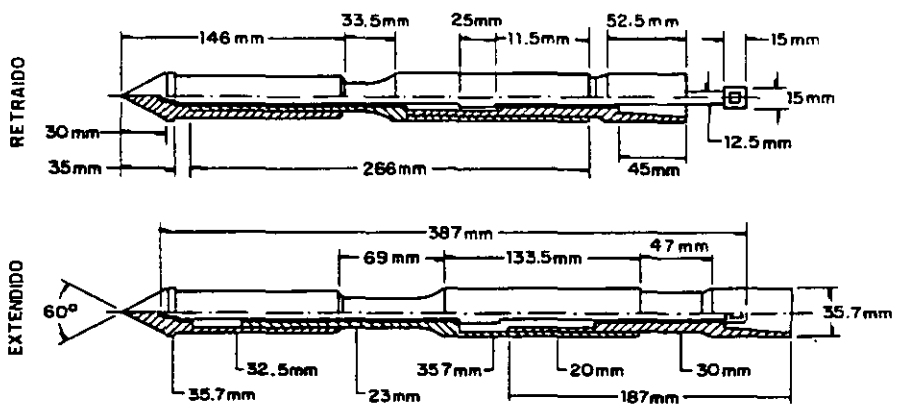
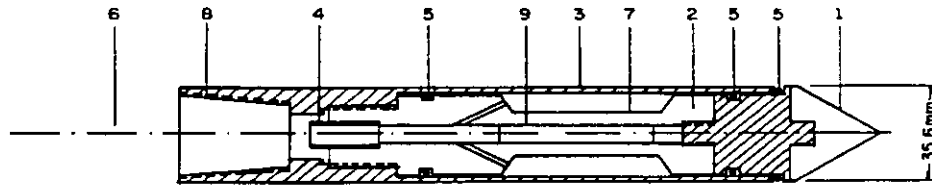
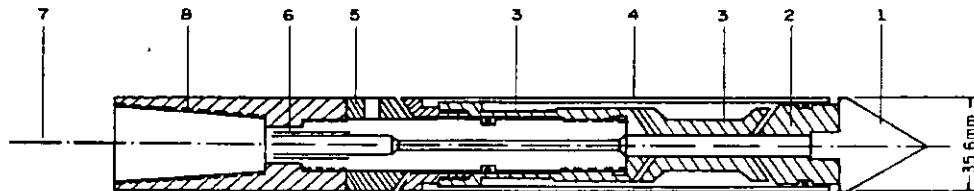


FIG. 2.- EJEMPLO DE UN PENETROMETRO MECANICO DE PUNTA Y FRICCION



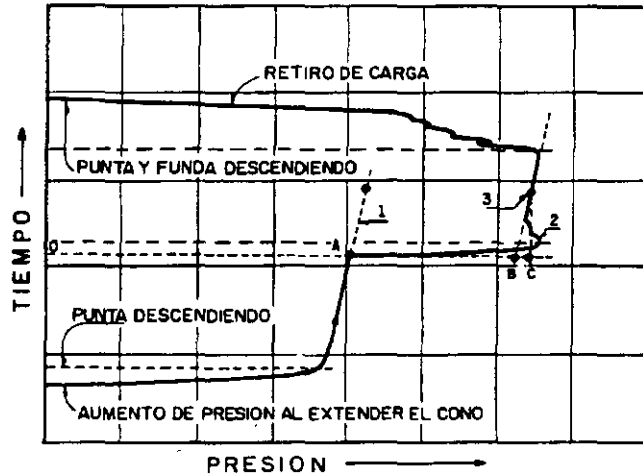
- |   |                          |   |                         |
|---|--------------------------|---|-------------------------|
| 1 | PUNTA CONICA             | 5 | AROSSELLO               |
| 2 | CELDA DE CARGA           | 6 | CABLE                   |
| 3 | CAPA PROTECTORA          | 7 | TRANSDUCTORES           |
| 4 | EMPAQUE A PRUEBA DE AGUA | 8 | CONEXION CON LAS BARRAS |
|   |                          | 9 | INCLINOMETRO            |

FIG. 3.- PENETROMETRO ELECTRICO DE PUNTA



- |   |                   |   |                          |
|---|-------------------|---|--------------------------|
| 1 | PUNTA CONICA      | 5 | AROSSELLO                |
| 2 | CELDA DE CARGA    | 6 | EMPAQUE A PRUEBA DE AGUA |
| 3 | TRANSDUCTORES     | 7 | CABLE                    |
| 4 | FUNDA DE FRICCION | 8 | CONEXION CON LAS BARRAS  |

FIG. 4.- PENETROMETRO ELECTRONICO DE PUNTA Y FRICCION



- 1.- PROBABLE CAMBIO EN LA RESISTENCIA DE PUNTA PASANDO EL PUNTO A
- 2.- BRINCO TEMPORAL EN LA PRESION DEBIDO A LA ACELERACION DE LA FUNDA DE FRICCION Y LA CONVERSION DE FRICCION ESTATICA A FRICCION CINEMATICA
- 3.- PRIMER PUNTO DONDE EL OPERADOR PUEDE OBTENER LECTURAS

NOTA: "0-A" REPRESENTA LA LECTURA CONCRETA DE LA PUNTA ANTES DEL BRINCO EN LA PRESION ASOCIADA CON EL ENGANCHE DE LA FUNDA DE FRICCION DURANTE LA EXTENSION CONTINUA DESCENDENTE DE LA MISMA. "A-B" ES RESISTENCIA DE FRICCION CORRECTA SI LA FUNDA PUDIERA ENGANCHAR INSTANTANEAMENTE. SIN EMBARGO, EL OPERADOR NO PUEDE LEER NINGUNA LECTURA HASTA EL PUNTO "C". DEBIDO A ESTA ESPERA FORZADA, EL OPERADOR INTRODUCE UN ERROR DE "B-C" EL OPERADOR DEBE TOMAR LECTURA TAN PRONTO COMO SEA POSIBLE DESPUES DEL BRINCO PARA MINIMIZAR ESTE ERROR CAMBIOS ABRUPTOS EN LA RESISTENCIA DE PUNTA PUEDEN HACER ESTE ERROR INACEPTABLE.

FIG. 5.- CAMBIOS DE PRESION EN CELDA DE CARGA HIDRAULICA EN LA PARTE SUPERIOR DE LAS BARRAS INTERIORES DURANTE UN EJEMPLO DE EXTENSION DE UN PENETROMETRO MECANICO DE PUNTA Y FRICCION.



# PRUEBA DE PENETRACION UTILIZANDO EL CONO DINAMICO

## 1. OBJETIVO

Se describe aquí el procedimiento general de hincado dinámico de un cono de acero no recuperable con objeto de medir resistencia a la penetración del suelo.

## 2. ALCANCE

- 2.1 Este método de exploración no proporciona muestras de suelo para ensayos de laboratorio.
- 2.2 Este método de exploración se utiliza conjuntamente con el método de penetración estándar y ha mostrado ser de gran utilidad sobre todo en materiales granulares por su buena correlación con el valor N de penetración estándar.

## 3. REFERENCIAS

- 3.1 ASTM D 1586. Prueba de penetración estándar y muestreo de suelos con tubo partido.

## 4. DEFINICIONES

- 4.1 **Yunque.** Parte del sistema de hincado a través de la cual el martinete golpea y transmite su energía a las barras de perforación.
- 4.2 **Malacate.** Tambor rotatorio en el sistema cuerda-malacate alrededor del cual el operador enrolla una cuerda Para levantar y dejar caer el martinete apretando o aflojando alrededor del mismo.
- 4.3 **Barras de perforación.** Barras que se usan para transmitir la fuerza hacia abajo y la torsión a la broca de perforación durante la ejecución de sondeos.
- 4.4 **Sistema de hincado.** Compuesto por el martinete, guía de caída del martinete, yunque y sistema de caída del martinete.
- 4.5 **Martinete.** Parte del sistema de hincado que consiste en una masa golpeadora de  $64,7 \pm 1$  kg que continuamente es levantada y soltada para proporcionar la energía que lleva a cabo el muestreo y la penetración.

- 4.6 **Sistema de caída del martinete.** Parte del sistema de hincado con el cual el operador lleva a cabo el levantamiento y la caída del martinete para producir el golpe.
- 4.7 **Guía de caída del martinete.** Parte del sistema de hincado usada para guiar el martinete.
- 4.8 **NC.** El número de golpes obtenidos en cada intervalo de 15 cm.
- 4.9 **Valor de NC.** El número de golpes representando la resistencia del suelo a la penetración. Este valor se reporta en número de golpes necesario para hincar el cono cada 30 cm.
- 4.10 **Número de vueltas del cable.** El ángulo de contacto total ente el cable y el malacate cuando el operador suelta el cable, dividido entre  $360^{\circ}$ .

## 5. INSTRUCCIONES

### 5.1 Equipo

- 5.1.1 **Barras de perforación.** Se deben utilizar barras de acero machimbradas ras a ras para conectar el cono al sistema de hincado. La barra deberá tener una rigidez (momento de inercia) igual o mayor que una barra de acero, la cual tiene un diámetro exterior de 41,2 mm y un diámetro interior de 28,5 mm).
- 5.1.2 **Cono de acero no recuperable.** El cono que se hinca es de acero y se pierde después de cada perforación. Sus dimensiones y geometría se muestran en la fig 1.
- 5.1.3 **Martinete y yunque.** El martinete debe pesar  $635 \pm 10$  N, y debe ser de una masa rígida y sólida. El martinete golpeará el yunque y hará contacto de acero con acero cuando éste se suelte. Se debe usar una guía para la caída libre del martinete. Por razones de seguridad se recomienda el uso de martinetes con el yunque interno, fig 1.

### 5.2 Ejecución

- 5.2.1 Se conectará el cono de acero a las barras de perforación firmemente previo al hincado. Deberá contarse con la información previa de sondeos de penetración estándar para realizar las correlaciones.
- 5.2.2 El sondeo se avanzará gradualmente para permitir el ensaye continuo o intermitente. Se contará el número de golpes requerido para avanzar cada tramo de 15 cm y se reportará el valor NC y NC similar al valor N y N de la prueba de penetración estándar.

**5.2.3** Hincar el cono con golpes del martinete con una altura de caída de  $0,76 \text{ m} \pm 25 \text{ mm}$ .  
Conviene tener marcada de manera permanente la altura de caída.

**5.2.4** La prueba se suspende hasta que ocurra cualquiera de las siguientes situaciones:

**5.2.4.1** Se han aplicado 50 golpes en cualquiera de los 3 tramos de 15 cm.

**5.2.4.2** Se han aplicado un total de 100 golpes sin penetrar 45 cm.

**5.2.4.3** El cono no se hinca apreciablemente con la aplicación de 10 golpes consecutivos.

**5.2.5** El malacate debe estar libre de óxido, aceite o grasa, tener un diámetro en el rango de 150 a 250 mm. Este debe operarse a una velocidad mínima de rotación de 100 rpm.

**5.2.6** No se pueden utilizar más de  $2 \frac{1}{4}$  vueltas de cable durante la ejecución de la prueba.

**5.2.7** Al terminar el sondeo retirar las barras de perforación y proceder a realizar un nuevo sondeo. El cono queda perdido en el subsuelo.

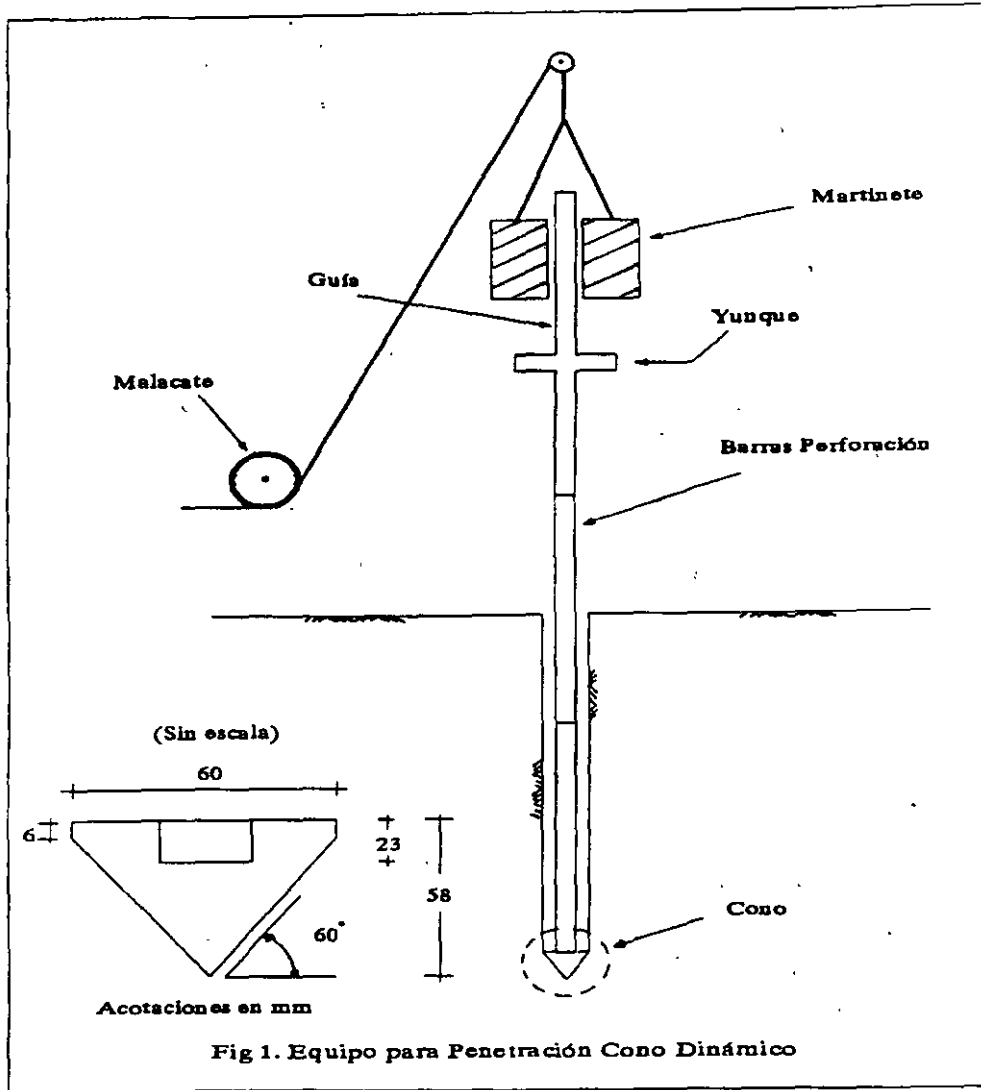
### **5.3 Presentación**

**5.3.1** En general la información en el registro de campo debe incluir lo siguiente:

- nombre y localización del trabajo
- condiciones ambientales
- fecha y hora de inicio y terminación del sondeo
- localización y número del sondeo
- elevación de la superficie
- tamaño, tipo y longitud de la barras de perforación.

Se anexa hoja de registro.

**5.3.2** Cabe señalar que este procedimiento es recomendable cuando ya se tienen establecidas las condiciones generales del subsuelo mediante otros métodos (SPT específicamente) y se quiere dar rapidez a la exploración en otras partes del predio y/o ampliación del proyecto, por ello los resultados de la prueba de cono dinámico se pueden extrapolar a otros sitios sólo después de haber hecho una correlación con resultados de sondeos SPT realizados en el mismo sitio y se considera que el tipo de suelo no cambia apreciablemente.







**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**“ DIPLOMADO EN SISTEMAS DE CALIDAD  
EN INGENIERÍA DE PROYECTO  
Y CONSTRUCCIÓN ”**

**MODULO II**

**CONTROL DE CALIDAD DE MATERIALES Y OBRAS**

**PARTE 2**

**SUPERVISION Y CONTROL DE CALIDAD DE OBRAS**

**TEMA:**

**PROPIEDADES Y PRUEBAS DE ACEPTACION DE MATERIALES**

**EXPOSITOR: M. en I. CARLOS GOMEZ TOLEDO  
1997**

# **DIPLOMADO EN SISTEMAS DE CALIDAD EN INGENIERIA DE PROYECTO Y CONSTRUCCION**

## **MODULO II**

**CONTROL DE CALIDAD DE MATERIALES Y OBRAS**

## **PARTE 2**

**SUPERVISION Y CONTROL DE CALIDAD DE OBRAS**

**INSTRUCTOR: M.I. CARLOS GOMEZ TOLEDO**

## **TEMA**

### **PROPIEDADES Y PRUEBAS DE ACEPTACION DE MATERIALES**

Concretos simple, reforzado, presforzado, compactado, lanzado y ciclópeo.

### **NOTAS DEL INSTRUCTOR**

(Apoyo gráfico a colores)

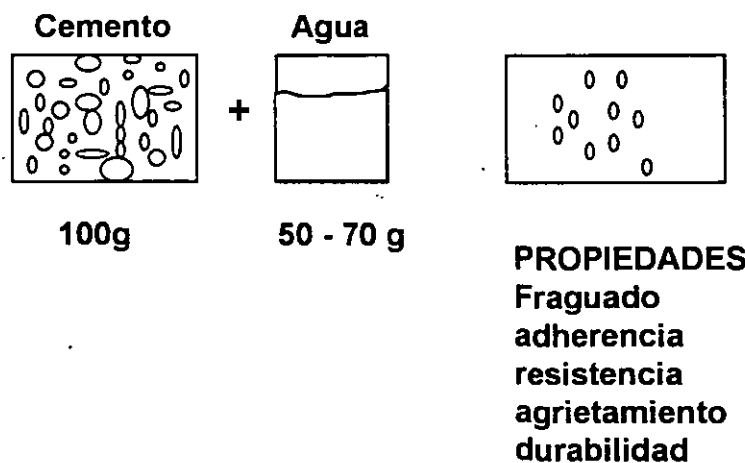
Octubre de 1997

## Control de Calidad de los Materiales

CTC Toluca, Méx.

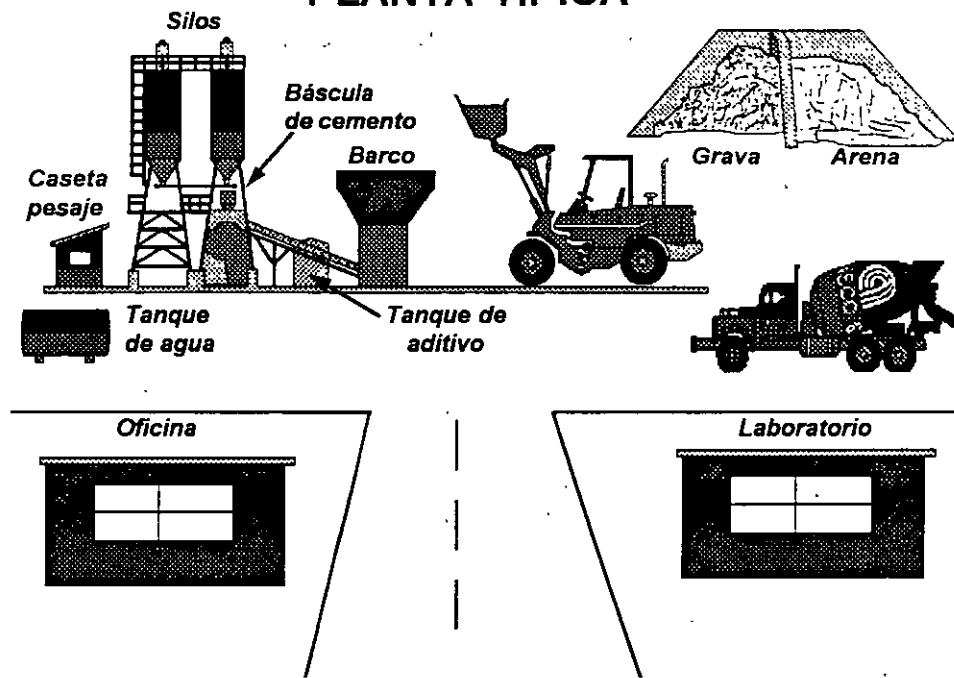
Octubre, 1997

### PASTA DE CEMENTO TIPICA





## PLANTA TIPICA

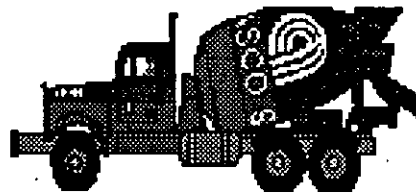


## MEZCLADO DEL CONCRETO

### OBJETIVO:

Producir una mezcla homogénea de los materiales ingredientes

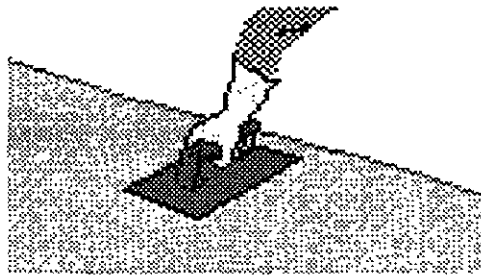
- ⊙ Cemento
- ⊙ Agua
- ⊙ Arena
- ⊙ Grava
- ⊙ Otros



## TRABAJABILIDAD

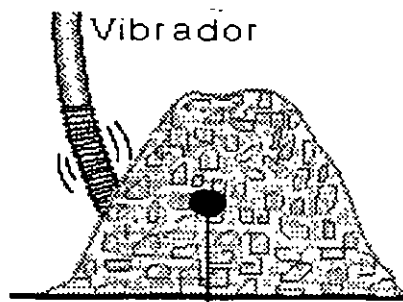
Parámetro que pretende describir la facilidad o dificultad que tiene el concreto tierno para ser transportado, compactado, acabado

Ejemplos: Bombeable, áspero, no cohesivo

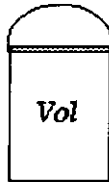


## CONSOLIDACION

Acciones tendientes a lograr que el concreto colocado alcance la mayor densidad posible



# PESO VOLUMETRICO

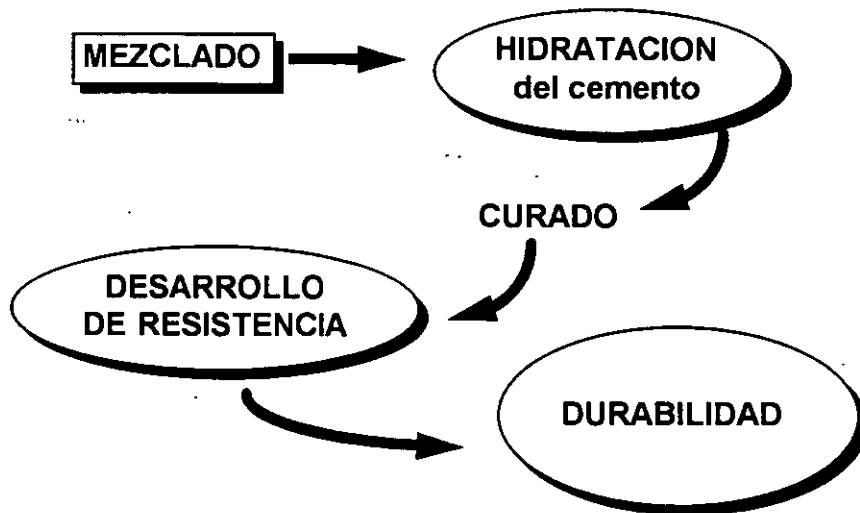


↓  
Peso Concreto = P

$$PV = \frac{P}{V}$$

Densidad  
concreto  
tierno

# ENDURECIMIENTO DEL CONCRETO



## PROPIEDADES DEL CONCRETO ENDURECIDO



- ⊙ Resistencia  $f_c$
- ⊙ Módulo de elasticidad
- ⊙ Impermeabilidad
- ⊙ Resistencia a la abrasión
- ⊙ Durabilidad

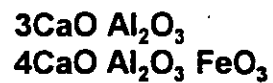
## PROPIEDADES DEL CONCRETO ENDURECIDO



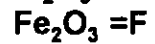
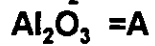
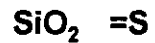
- Agrietamientos
- Desgaste
- Cacarizos
- Resistencia débil
- Filtraciones

## COMPUESTOS QUIMICOS DE LOS CEMENTOS

### ⊙BASICOS



### ABREVIATURAS



### BASICOS



## COMPUESTOS QUIMICOS DE LOS CEMENTOS

### ⊙SECUNDARIOS

Alcalis de sodio y de potasio

MgO

SO<sub>3</sub>

Residuo insoluble

## PROPIEDADES DEL CEMENTO PORTLAND

- ⊙ FINURA
- ⊙ SANIDAD
- ⊙ CONSISTENCIA
- ⊙ TIEMPO DE FRAGUADO
- ⊙ FRAGUADO FALSO



## PROPIEDADES DEL CEMENTO PORTLAND

- ⊙ RESISTENCIA A COMPRESION
- ⊙ CALOR DE HIDRATACION
- ⊙ PERDIDA POR IGNICION
- ⊙ RESIDUO INSOLUBLE
- ⊙ CONTENIDO DE ALCALIS



**FINURA  
BLAINE (ASTM C 204)**

**Forma de medir la superficie específica. A través de medir la cantidad de aire que pasa a través de una muestra de cemento compactada de manera estándar**

**FINURA  
MALLA No. 325 (ASTM C 430)**

**Cantidad de cemento que pasa dicha malla; en % respecto al peso de la muestra valores: 85 - 95%**

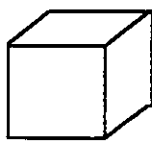
## SUPERFICIE ESPECIFICA

Es la cantidad de área expuesta,  
por unidad de masa

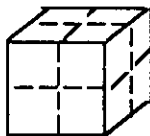
Cemento normal:  $3600 \text{ cm}^2/\text{g}$

Puzolánico:  $4500 \text{ cm}^2/\text{g}$

## SUPERFICIE ESPECIFICA PARA MATERIAL CON DENSIDAD $3.0 \text{ g/cm}^3$



2 cm



2 cm

área exp. =  $2 \times 2 \times 6 = 24 \text{ cm}^2$   
masa =  $8 \times 3 = 24\text{g}$  SEsp =  $1 \text{ cm}^2/\text{g}$

1 cm



área =  $6 \times 8 = 48 \text{ cm}^2$   
SEsp =  $48 / 24\text{g} = 2 \text{ cm}^2/\text{g}$

masa = 3g  
área =  $6 \text{ cm}^2$

**SEsp =  $2 \text{ cm}^2/\text{g}$**



## **SANIDAD (ASTM C 151)**

Capacidad de una pasta para conservar su volumen después del fraguado

MgO

CaO  
libre

valores: < 0.02%

## **CONSISTENCIA NORMAL**

Mezcladora: mostrar

Aparato de Vicat (mostrar)

Resistencia a la penetración el vástago vicat:  $10 \pm 1$  mm en pasta recién mezclada

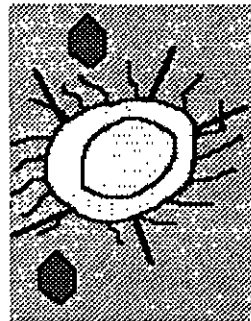
## FRAGUADO DEL CEMENTO

Pérdida de fluidez en la pasta que se manifiesta como endurecimiento. Causada por las reacciones entre el agua y el cemento (hidratación)

## PRODUCTOS DE HIDRATACION

Son los diversos productos que se forman al evolucionar la hidratación del cemento. Ejemplos:

C-S-H  
Portandita  
Ettringita



## **TIEMPOS DE FRAGUADO (ASTM C 191)**

**INICIAL:** productos de hidratación desarrollaron suficientes contactos; granitos de cemento en posición

**FINAL:** desarrollo de suficiente resistencia, para no dejar huellas fácilmente.

**VALORES:** FI: 150 min; FF: 360 min

## **CONCEPTO BASICO DE TIEMPO DE FRAGUADO DE CONCRETO**

**ES SIMILAR AL DE LA PASTA. El método de ensaye es diferente**

## FRAGUADO FALSO (ASTM C 359)



Considerable pérdida de fluidez en la pasta, poco después de mezclada.

Posible causa: deshidratación del yeso en la fabricación del cemento

Valor:  $\leq 50\%$  respecto al original

## RESISTENCIA A COMPRESION

MORTERO

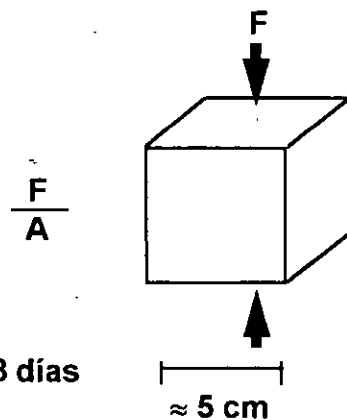
1: 2.75

A/C = 0.5

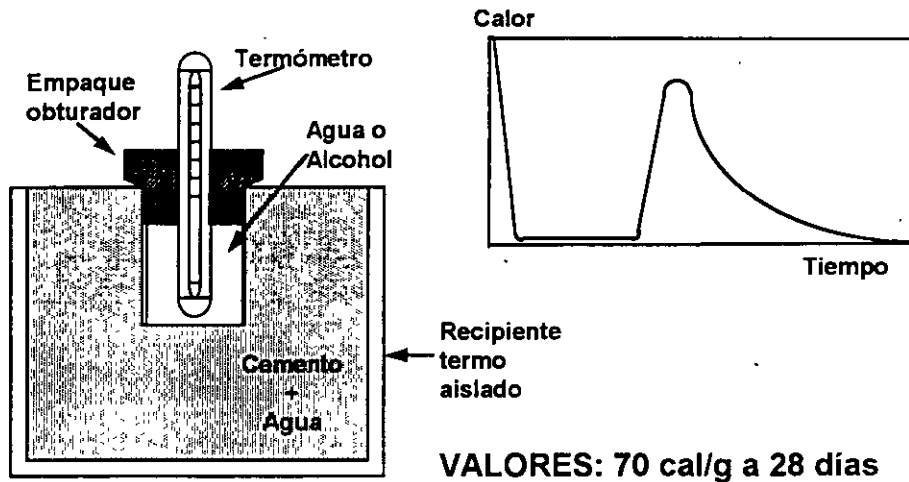
CURADO POR

INMERSION

VALORES: 390 kg/cm<sup>2</sup> a 28 días



## CALOR DE HIDRATACION



## PERDIDA POR IGNICION (ASTM C 114)

Material que se pierde al calentar el cemento a unos 1000° C

Indica prehidratación y/o carbonatación



## **RESIDUO INSOLUBLE**

**Cantidad no soluble en ácido clorhídrico**

**Indica presencia de material silíceo en el cemento, p. ej. puzolánico**

## **CONTENIDO DE ALCALIS (ASTM C 114)**

**Na<sub>2</sub>O**

**K<sub>2</sub>O**

**⇒ Na<sub>2</sub>O + 0.658 K<sub>2</sub>O**  
**VALOR REFERENCIA: 0.60%**

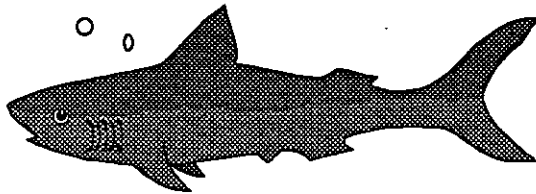


## AGUA PARA CONCRETO (ASTM C 94)

Evaluación de la calidad

- ANALISIS QUIMICO
- ANALISIS FISICO

fc; t. fraguado; durabilidad



## IMPUREZAS EN EL AGUA

⊙ Cloruros

⊙ Sulfatos

⊙ Carbonatos

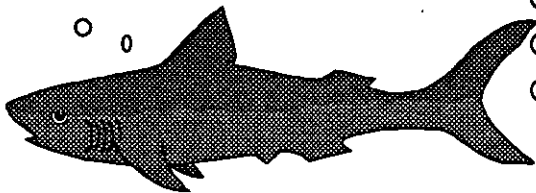
⊙ Desperdicio industrial

⊙ Materia orgánica

⊙ Azúcar

⊙ Aceite

⊙ Sólidos



## TIPOS DE CEMENTO

Tipo	Características distintivas	Usos Principales
I	$C_3S \approx 55\%$ , $C_3A > 8\%$ Blaine $\gg 3600 \text{ cm}^2/\text{g}$	General; estructuras <u>no</u> requieren cuidados
II	Menor $C_3S$ , $C_3A < 8\%$	Cimentaciones; estructuras semimasivas; vs presencia moderada de sulfatos
III	Mayor $C_3S$ y Blaine	Acelerar desarrollo fc

## TIPOS DE CEMENTO

Tipo	Características distintivas	Usos Principales
IV	Bajo $C_3S$ y $C_3A$	Concretos masivos
V	$C_3A < 5.0\%$	Presencia de sulfatos: mar, cimentaciones
Blanco	$C_4AF$ cerca de 0%; molienda especial	Concretos arquitectónicos
Adiciones	Puzolana, escoria, otros	General; en algunos casos, alternativa



## AGREGADOS PETREOS

Ocupan  $\approx$  70% del volumen del concreto

Influyen mucho en la \$ economía

**Propiedades físicas básicas**

- Resistencia, densidad
- Forma y textura
- Limpieza

**Requisitos mineralógicos**

- Inertes o no negativos con pasta de cemento

## ORIGEN DE LAS ROCAS... Y EJEMPLOS

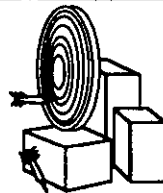
IGNEAS	SEDIMENTARIAS	METAMORFICAS
Basalto	Caliza	Mármol
Riolita	Arenisca	Esquisto
Andesita	Conglomerado	Pizarra
Toba	Argilita	Metacuarcita
Granito	Grauvaca	Gneiss

## MINERALES EN LAS ROCAS

- ⊙ SILICE
- ⊙ CARBONATO
- ⊙ SULFATO
- ⊙ OXIDO DE HIERRO
- ⊙ SILICATOS
- ⊙ ARCILLAS

## LOCALIZACION DE BANCOS DE AGREGADOS

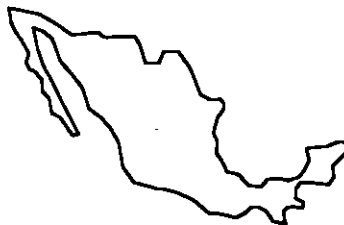
⇒ Localización del proyecto



⇒ Volúmenes requeridos

$V=215,000\text{m}^3$

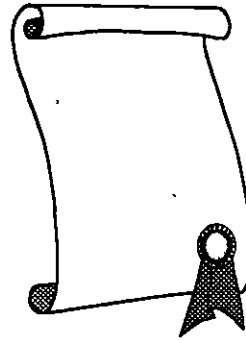
⇒ Estudios de planos a  
DEtalle del  
TErritorio  
NAcional



## **LOCALIZACION DE BANCOS DE AGREGADOS**

### **⇒ Investigación de Bancos**

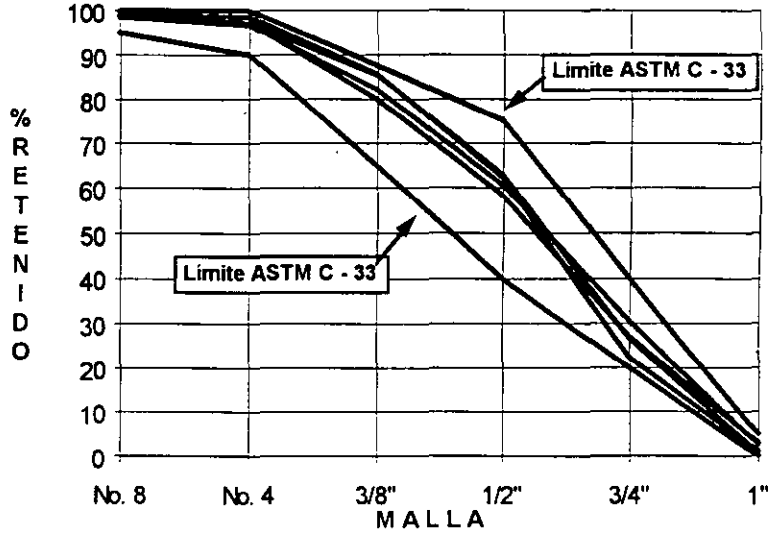
- planeación en gabinete
- localización de depósitos
- muestras y pozos
- determinación de volúmenes
- ensayos de laboratorio
- **INFORME RESULTADOS**
  - ⊙ localización, accesos
  - ⊙ volúmenes
  - ⊙ calidad



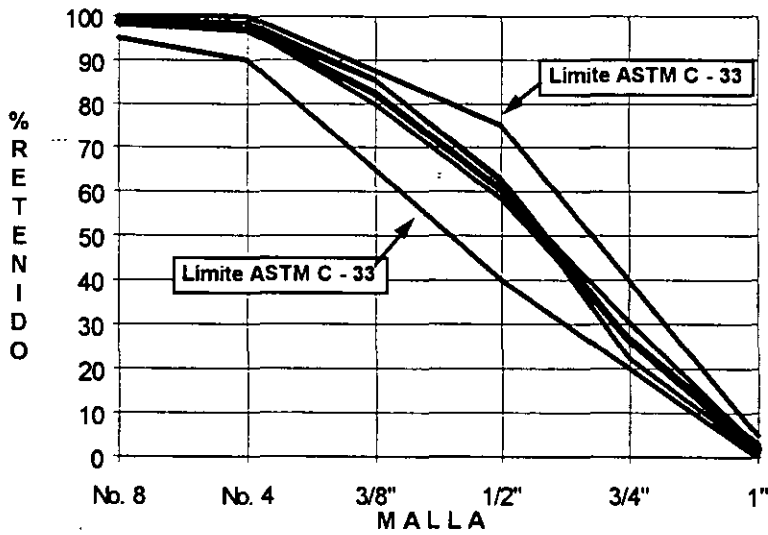
## **AGREGADOS PARA CONCRETO propiedades básicas**

- ✓ granulometría y límites
- ✓ forma y textura
- ✓ resistencia
- ✓ reactividad álcali-agregado
- ✓ otras

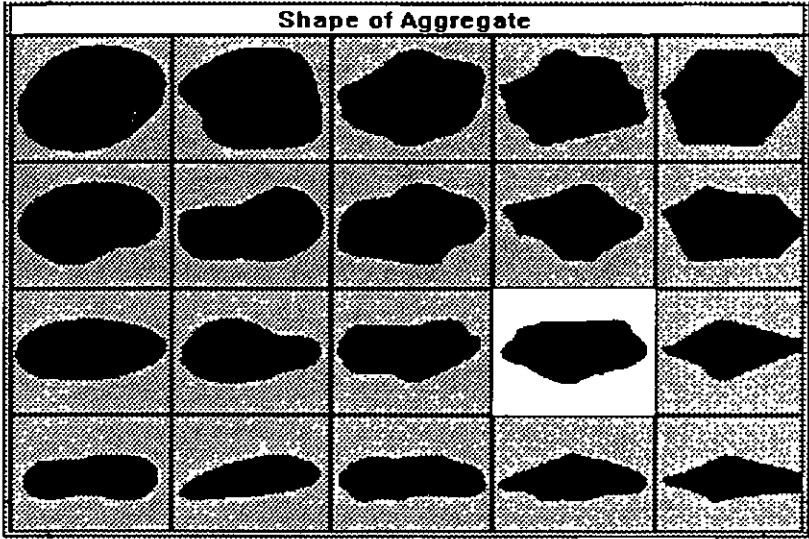
# GRANULOMETRIAS



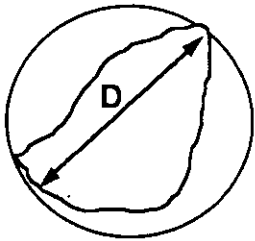
# GRANULOMETRIAS



# FORMA PARTICULA



# COEFICIENTE DE FORMA, EN GRAVAS



- 100 - 200 partículas ↙ diámetros  
volumen total
- $\Sigma$  volúmenes esferas individuales

$$C.F. = \frac{\text{Vol. gravas}}{\text{Vol. esferas}} \times 100$$

valores típicos:	grava de rio	0.34
	grava triturada	0.22

# TEXTURA DE AGREGADOS

Descripción cualitativa de la irregularidad superficial del agregado. Importante relación con la adherencia pasta-agregado



# HUMEDAD EN LOS AGREGADOS



## DENSIDAD Y ABSORCION

$$\text{Absorción} = \frac{\text{Peso agua agregado SSS}}{\text{Peso seco del agregado}} \times 100$$

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa del agregado}}{\text{Volumen del agregado}}$$

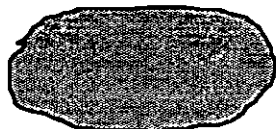
### Valores típicos

< 2% B  
> 4% R,M

> 2.5 g/cm<sup>3</sup> B  
< 2.4 g/cm<sup>3</sup> R,M

## RESISTENCIA A HUMEDECIMIENTO Y SECADO

Capacidad del agregado de permanecer inalterado al ser sometido a ciclos de humedecimiento -saturación- y secado en horno ... (y en campo)



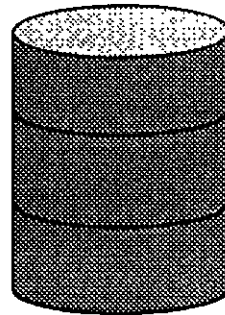
mat'l estratificado



terrón

## RESISTENCIA AL IMPACTO Y ABRASION (ASTM C 131)

- Gravas en cilindro metálico, girando, con bolas de acero golpeándolas
- 500 revoluciones
- Determinar mat'l pasa malla No. 12



$$\text{Pérdida por abrasión} = \frac{\text{Pasa No. 12}}{\text{Peso inicial}} \times 100$$

VALOR TIPICO: < 40% B > 40% M

## MATERIALES INDESEABLES EN AGREGADOS (ASTM C 33)

- IMPUREZAS ORGANICAS
  - POLVO (pasa malla No. 200)
- PARTICULAS LIGERAS
  - TERRONES Y PARTICULAS DESMENUZABLES





## IMPUREZAS ORGANICAS (ASTM C 40)

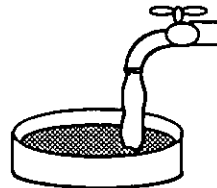
- DESECHOS DE PLANTAS Y ANIMALES
- AFECTAN: FRAGUADO  
RESISTENCIA



SOLUCION: LAVAR; MEZCLAR CON ARENA BUENA

## POLVO EN AGREGADOS

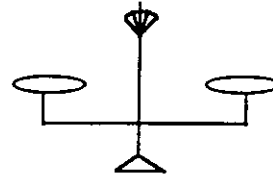
- ⊙ Incrementa demanda de agua
- ⊙ Efectos: aumenta agrietamiento  
baja resistencia  
disminuye durabilidad



SOLUCION: Reducir polvos en los áridos

## **PARTICULAS LIGERAS**

- ⊙ Afectan durabilidad
- ⊙ Con frecuencia se refiere a material cuya **DENSIDAD RELATIVA < 2.0**



**SOLUCION:** Mezclar con agregado denso;  
reducir % de ligeros, por preparar

## **TERRONES Y PARTICULAS DESMENUZABLES (ASTM C 142)**

**Efectos:** trabajabilidad, erupciones, durabilidad

- ⊙ Partículas sensibles a la humedad y al secado



**SOLUCION:** lavar; disminuir %, combinarlo con  
otro agregado

## **REACTIVIDAD ALCALI-AGREGADO**

**Reacción entre la pasta de cemento y ciertos agregados cuya composición químico-mineralógica NO es inerte**

**Efecto: expansión interna en el concreto, que lo destruye paulatinamente**

**Ocurrencia: al coincidir agregados reactivos + altos álcalis en concreto + agua**

## **REACTIVIDAD ALCALI-AGREGADO**

### **Agregados y minerales potencialmente reactivos**

- ⊙ **Andesitas**
- ⊙ **Riolitas**
- ⊙ **Calizas dolomíticas**
- ⊙ **Dolomías con caliza**
- ⊙ **Calizas y dolomías silíceas**
- ⊙ **Cuarzo criptocristalino**
- ⊙ **Opalo**
- ⊙ **Obsidiana**

## REACTIVIDAD ALCALI-AGREGADO

Algunas posibles soluciones:

- Evitar uso de agregados reactivos/reducir % de árido nocivo
- Selección del cemento adecuado
- Reducir consumo de cemento (léase álcalis) por m<sup>3</sup>
- Ensayes lab para demostrar resultados  
ASTM C 227, C289, C 1057



## ALGUNAS DE LAS PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS Y SU RELACION CON EL CONCRETO

- Granulometría
- Forma de partícula
- Densidad
- Textura superficial

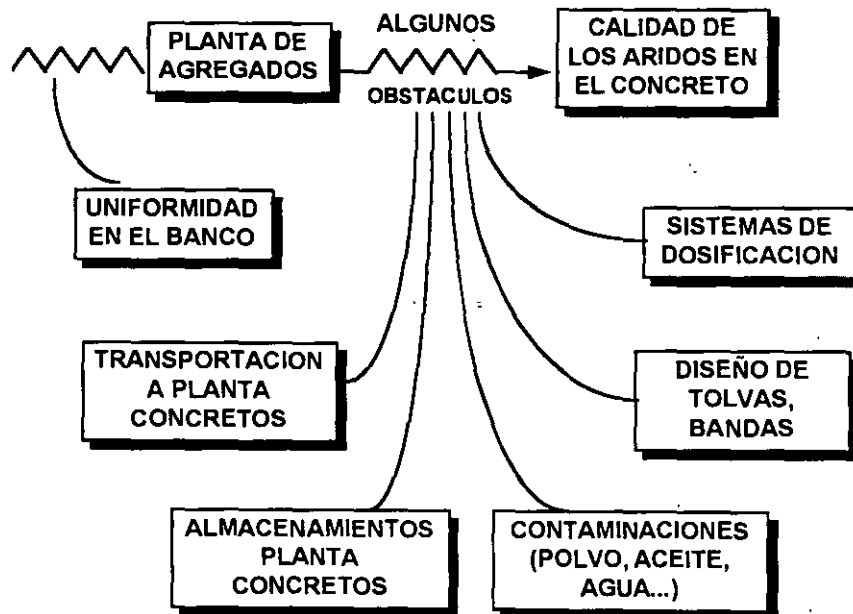
- Economía, durabilidad
- Demanda de agua, módulo de ruptura
- Peso volumétrico, módulo de elasticidad
- Adherencia

## **ALGUNAS DE LAS PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS Y SU RELACION CON EL CONCRETO**

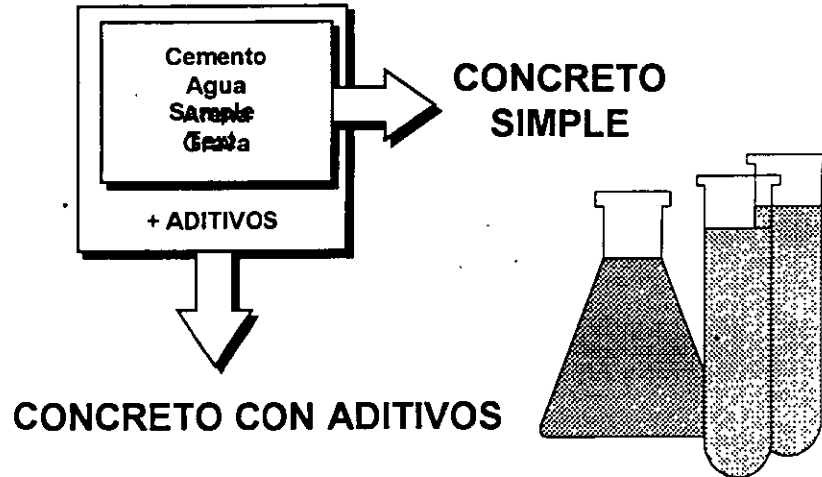
- Humedad
- Composición mineralógica
- Limpieza superficial
- Resistencia al impacto y la abrasión
- Resistencia durabilidad
- Resistencia durabilidad
- Economía, adherencia, durabilidad
- Durabilidad

# MANEJO, ALMACENAMIENTO Y USO DE AGREGADOS

**OBJETIVO:** Conservar las características de los áridos, ya aceptadas para el proyecto, hasta elaborar los concretos



## ADTIVOS PARA CONCRETO



## OBJETIVO DEL USO DE ADITIVOS

- **Economía**
- **Solución técnica de requerimientos de desempeño del concreto, en estado fresco y endurecido**
- **Cumplir especificaciones**

## CLASIFICACION DE LOS ADITIVOS DE USO MAS COMUN EN LOS CONCRETOS

REDUCTORES DE AGUA  
RETARDANTES DE FRAGUADO  
ACELERANTES DE RESISTENCIA  
REDUCTOR Y RETARDANTE  
REDUCTOR Y ACELERANTE

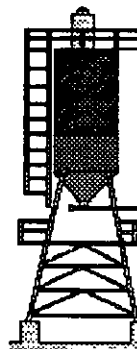
A  
B  
C  
D  
E

SUPERREDUCTOR DE AGUA  
SUPRERREDUCTOR Y RETARDANTE

F  
G

## CLASIFICACION DE LOS ADITIVOS DE USO MAS COMUN EN LOS CONCRETOS

- ASTM C 494
- ADITIVOS MINERALES
  - ⊙ puzolana
  - ⊙ escoria
  - ⊙ ceniza volante
  - ⊙ humo de sílice
- INCLUSORES DE AIRE





## DEFINICIONES BASICAS DE ADITIVOS

**ASTM C 494** Define desempeño en función de **AGUA, RESISTENCIA, FRAGUADO**

**ASTM C 260** establece los requisitos de desempeño en función de

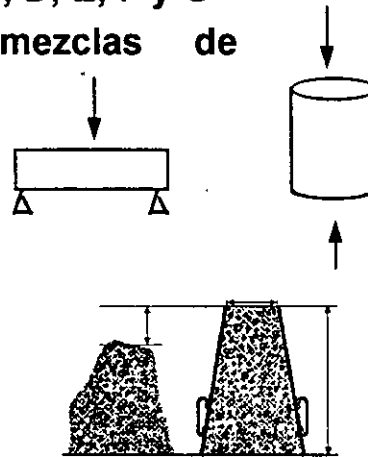
- ⊙ reducción del sangrado
- ⊙ "inerte" respecto a fraguado
- ⊙ resistencia mecánica, compresión/flexión,  $\geq 90\%$
- ⊙ estabilidad dimensional

## EVALUACION DE CALIDAD DE ADITIVOS

⊙ **ASTM C 494**, tipos A, B, C, D, E, F y G

⇒ **Pruebas físicas en mezclas de concreto:**

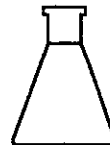
- demanda de agua
- tiempos de fraguado
- resistencia
- estabilidad volumétrica
- pérdida de revenimiento



## EVALUACION DE CALIDAD DE ADITIVOS

### ⇒ Pruebas complementarias

- contenido de cloruros
- pH
- densidad
- sólidos en suspensión
- uniformidad entre partes de un lote



## BREVE DESCRIPCION PRACTICA DE ADITIVOS DE USO COMUN PARA CONCRETO Y APLICACIONES

- ⇒ **Reductor con menor cantidad de agua alcanza el revenimiento objetivo. Permite reducir cemento en el concreto** Usos: general
- ⇒ **Retardante de fraguado. Su uso permite prolongar +1:30 á +3:30 h la ocurrencia del tiempo de fraguado** Aplicaciones: obras con áreas de colado grandes o de considerable volumen: losas de cimentación, concretos masivos en presas, etc.
- ⇒ **Fluidizante. Aditivo que con menor cantidad de agua permite obtener el revenimiento buscado** Usos: general

## BREVE DESCRIPCION PRACTICA DE ADITIVOS DE USO COMUN PARA CONCRETO Y APLICACIONES

- ⇒ **Acelerante.** Aditivo cuyo objetivo principal es acelerar el desarrollo de las resistencias del concreto a temprana edad
- Usos: obras con presión de tiempo en el programa de construcción. O para reuso económico de cimbras costosas
- ⇒ **Superfluidizante.** se obtienen altos revenimientos(>20 cm) al añadirlo a concretos "normales"
- Usos: estructuras con alta densidad de armado y/o de difícil colocación

## BREVE DESCRIPCION PRACTICA DE ADITIVOS DE USO COMUN PARA CONCRETO Y APLICACIONES

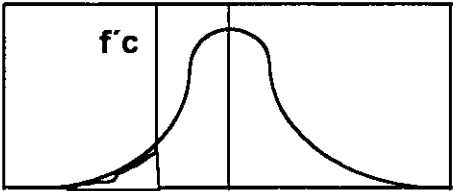
- ⇒ **Superreductor.** Permite alta reducción de agua para mezclado, y bajar de manera significativa el consumo unitario de cemento
- Usos: edificios altos. Minimizar consumos de cemento. Concretos con baja relación A/C especificada
- ⇒ **Incluser de aire.** Incluye gran número de burbujas  $\leq 0.5$  mm  $\varnothing$ , dispersas en toda la masa
- Usos: Corregir deficiencias granulométricas en arena. Mejorar trabajabilidad y reducir sangrado de concretos

# DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO

➤ relación  $\frac{\text{agua}}{\text{cemento}}$   $\frac{A}{C}$

valores típicos: 0.45 - 0.75

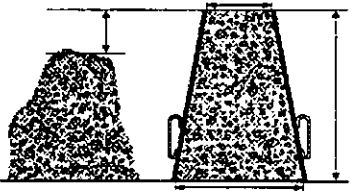
➤  $f'_c$ ,  $f_{cr}$   % de resultados inferiores a  $f'_c$



# DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO

➤ GRADO DE CALIDAD A= 80% / 20%  
B= 90% / 10%

➤ REVENIMIENTO (ASTM C 143)  
 VALORES TÍPICOS 10, 14, 18 cm



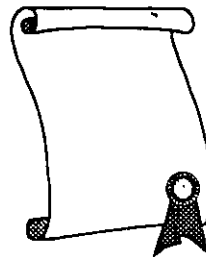
➤ T.M.A.

➤ PROPORCION  $\frac{\text{GRAVA}}{\text{ARENA}}$  VALORES TIPICOS: 60/40, 55/45  
65%/35%

➤ AGUA DE MEZCLADO  
 ➤ AGUA DE ABSORCION

## Requisitos frecuentes incluidos en las ESPECIFICACIONES PARA CONCRETO

- Relación agua/cemento
- Tipo de cemento
- Contenido mínimo de cemento
- Bombeabilidad
- No segregación
- Módulo de elasticidad
- Peso volumétrico



## DISEÑO DE MEZCLAS METODO ACI

• <b>CEMENTO</b>	ejemplo
- densidad	3.15 g/cm <sup>3</sup>
• <b>AGUA</b>	
- densidad	1.0 g/cm <sup>3</sup>
• <b>ARENA NATURAL</b>	
- densidad	2.64 g/cm <sup>3</sup>
- módulo de finura	2.8
- absorción	0.7%
- humedad	6.0%
• <b>GRÁVA TRITURADA</b>	
- densidad	2.68 g/cm <sup>3</sup>
- PVC	1602 kg/m <sup>3</sup>
- TMA	20 mm
- absorción	0.5%
- humedad	2.0%

## **EJEMPLO NUMERICO REAL DE DISEÑO DE MEZCLAS**

**Se pide:**

- ⊙  $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$ ; G.C. B (90%)
- ⊙ revenimiento 10 cm
- ⊙ contenido mínimo de cemento  $320 \text{ kg/m}^3$
- ⊙ utilizar grava TMA 25 mm
- ⊙ uso: colado losas uso industrial; espesor 30 cm, concreto reforzado
- ⊙ no se permite el uso de aditivos

## **SECUENCIA DE DISEÑO ACI**

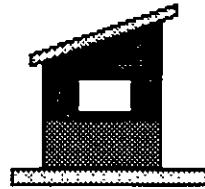
1. Elección de revenimiento
2. Cantidad de agua y contenido de aire
3. Relación A/C
4. Cantidad de cemento
5. Contenido de grava
6. Arena
7. Ajustes por humedad
8. Ajustes a mezcla de prueba

## DOSIFICACION DEL CONCRETO

**BASE:** diseños de mezclas

⇒ **Práctica:** TABLAS de proporcionamiento

**DOSIFICACION:** acción de pesar cada ingrediente, de acuerdo con el diseño



## DOSIFICACION CONFIABLE

⇒ **CALIBRACION DE BASCULAS**

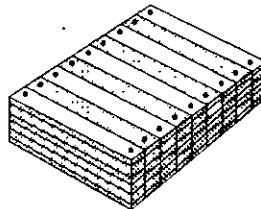
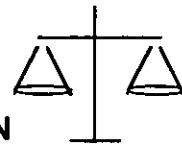
- SATISFACER REQUISITOS DE TOLERANCIA ESPECIF.

⇒ **VERIFICACION DISPOSITIVOS DE MEDICION**

- AGUA  
- ADITIVOS

⇒ **REGISTROS**

- PESADAS  
- CALIBRACIONES  
- VERIFICACIONES



## MEZCLADO DEL CONCRETO

OBJETIVO: uniformidad, \$ min



Mezclado en planta central } premezclado  
mezclado en camión revolvedora }

mezclado en obra

## REQUISITOS PARA EL MEZCLADO DEL CONCRETO

	M	A
VOLUMEN DE MEZCLADO	63%	80%
REVOLUCIONES: 70 - 100 vel. mezclado		
TROMPO: sin costras limpio		
PRUEBAS DE UNIFORMIDAD	NMX C 155	



## REQUISITOS DE UNIFORMIDAD DE MEZCLADO (NMX C 155)

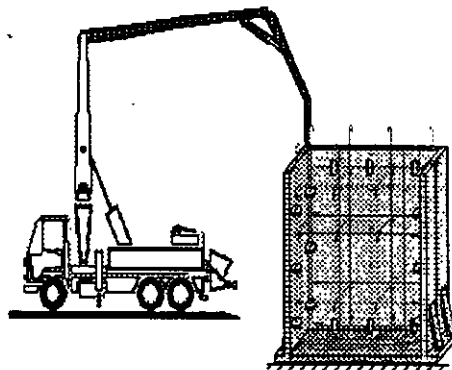
DIFERENCIAS ENTRE DOS MUESTRAS:  $\approx$  15% Y 85% V

MASA:	< 15kg/m <sup>3</sup>
CONT. AIRE:	< 1 %
REVENIMIENTO	< 2.5 cm para rev 6-12 cm
GRAVA	< 6%
fc 7 días	< 10%

## TRANSPORTE DEL CONCRETO

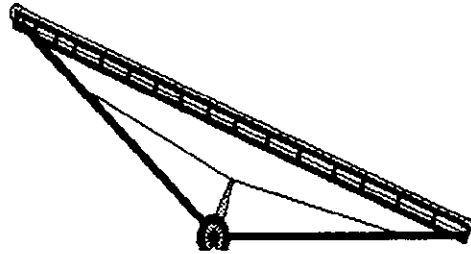
CONCEPTOS BASICOS:

- ⊙ Trabajabilidad
- ⊙ Segregación
- ⊙ Tiempo transcurrido
- ⊙ Temperatura en el concreto
- ⊙ Retemplado VS aditivos



## EQUIPO COMUN PARA TRANSPORTAR CONCRETO

- Ollas revolvedoras
- Canales
- Grúas y bachas
- Bandas transportadoras
- Camiones de volteo
- Carretillas, boogies



## FACTORES PARA INFLUIR LA ELECCION:

**\$, ESPECIFICACIÓN**

**DISPONIBILIDAD**

**ACCESOS**

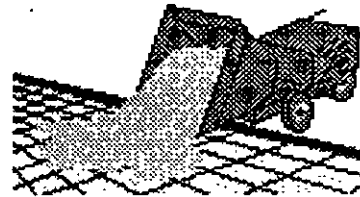
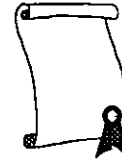
**CARACTERISTICAS DEL CONCRETO**



## COLOCACION Y ACABADO DEL CONCRETO

### Conceptos básicos:

- Importancia de las especificaciones
- Preservar calidad del concreto producido
- Preparación tramo de colado
- Planeación de colados
- Compactación - resistencia
- Acabado - durabilidad



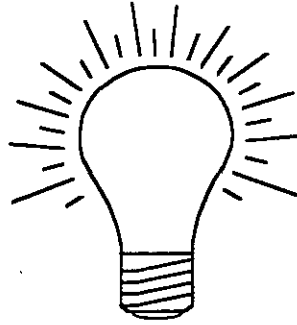
## PREPARACION DE COLADOS

- DISEÑO DE UN FORMATO PARA AUTORIZACION DE COLADOS
- COMUNICACION AUTORIDADES
- IMPLANTACION
- SISTEMATIZACION

## PLANEACION DE COLADOS

### FACTORES RELEVANTES:

- Volumen requerido
- Area de colocación
- Condiciones ambientales
- Especificaciones
- Equipo y accesorios
- Personal
- Necesidades de ensayos



## COLOCACION Y ACABADO DEL CONCRETO

### Conceptos básicos complementarios:

- Junta fría
  - Sistema de juntas
  - Acabado
  - DURABILIDAD

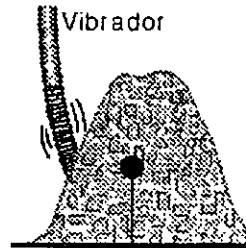


JUNTA DE CONTROL

- Unión concreto viejo - nuevo
  - Congruencia análisis estructural - obra real
  - Embebidos
    - Limpieza de tramo
    - SUPERVISION

## DISTRIBUCION Y COMPACTACION DEL CONCRETO

- Compactación
- Capas de colado
- Segregación / cohesión
  - ⇒ vibradores
  - ⇒ reglas
  - ⇒ vibr. forma
- ventanas

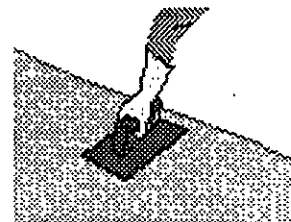


**EJEMPLO ESPECIAL:** clave túnel; tremie

## ACABADO DEL CONCRETO

**Conceptos fundamentales:**

- Superficies
  - cimbradas
  - no cimbradas
- Uso de las superficies.(estructuras)
- Las especificaciones
- Tiempos de fraguado
- Planeación de los acabados
  - tiempo
  - recursos
  - verificación
  - protección
- Acabados estéticos vs competentes



## **IMPORTANCIA DE LAS ESTRUCTURAS**

- ⇒ **casa habitación concreto no arquitectónico**
- ⇒ **muros fachada principal del banco, concreto arquitectónico**
- ⇒ **losa piso industrial uso rudo**
- ⇒ **pavimento carretera interestatal**
- ⇒ **banquetas y andadores en importante zona comercial**
- ⇒ **canal vertedor de concreto simple; alta velocidad del agua**

## **EQUIPO Y HERRAMIENTAS DE USO COMUN PARA DISTRIBUCION Y ACABADO DEL CONCRETO**

- **CANALONES, BOMBAS, BACHAS, ETC.**
- **TORNILLOS SINFIN, REGLAS, POLINES, PALAS, TRAXCAVOS**
- **planas madera**
- **llana metálica**
- **flota (llana de mango largo)**
- **bordeador**
- **helicóptero**
- **cepillo**
- **rastrillo**
- **moldes especiales**

# FORMACION DE JUNTAS

Congruencia con ingeniería de proyecto

➤ machihembradas (molde)

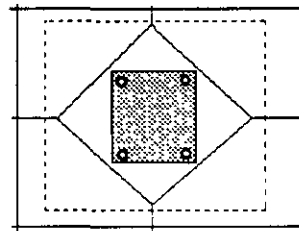


JUNTA DE CONTROL

➤ aserradas

➤ preformadas: inserta material

➤ aislamiento estructural



# RESANES

-Estético

lo común

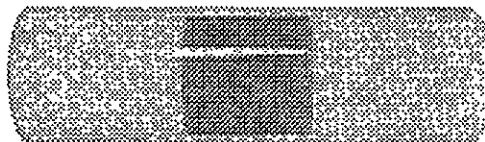
-Estructural

inspección

remoción defectos

restauración

verificación



## **CURADO DEL CONCRETO**

### **Conceptos fundamentales:**

- Hidratación del cemento**
- Desarrollo de resistencia y de “impermeabilidad”**
- Madurez**

## **METODOS Y MATERIALES PARA CURADO**

- ⇒ **Inundación**
- ⇒ **Aspersión**
- ⇒ **Cubiertas húmedas**
- ⇒ **Rollos de plástico**
- ⇒ **Otros: atomización, membranas, etc.**





## CURADOS ESPECIALES PARA CONCRETO

- Curado a vapor T
- Curado en autoclave (T+P)
- Cubiertas aislantes (T)
  
- Otros: objetivo (T + tiempo)

## CONTROL DE CALIDAD DEL CONCRETO

### Conceptos fundamentales

☒ Definición de la calidad

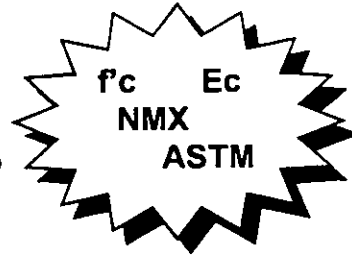
☒ Administración de la calidad

- ⇨ LABORATORIO
- ⇨ PLANTA DE CONCRETO
- ⇨ CAMPO
- ⇨ INFORMES



## LA CALIDAD EN LAS ESPECIFICACIONES

- Parámetros de calidad
- Frecuencia de ensayos
- Métodos de prueba
- Criterios de aceptación o rechazo



### CONTROL DE CALIDAD VS VERIFICACION

## CALIDAD DE LOS MATERIALES

**CEMENTO:** informes fábrica o específicos

**AGUA:** fraguado, resistencia

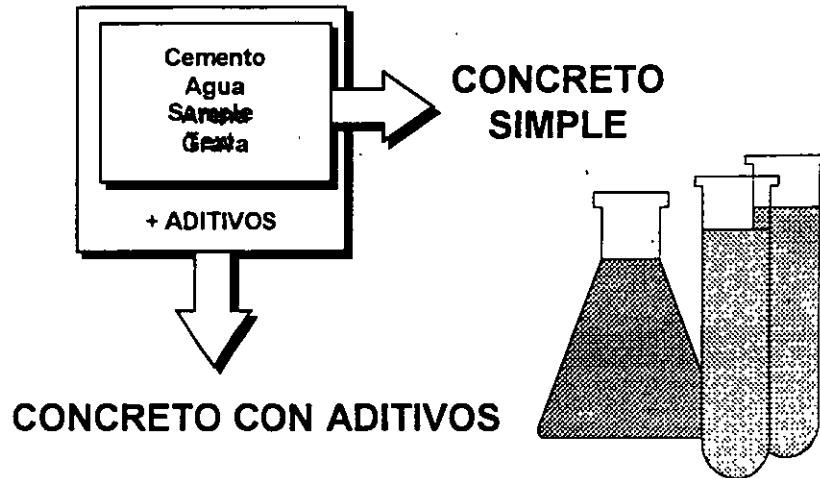
**AGREGADOS:** pr. físicas; en ocasiones,  
mineralógicas/químicas

**ADITIVOS:** verificación, control

**MEMBRANAS:** juntas, resinas, etc.: verificación

**CONCRETO:** diseño de mezclas

## ADTIVOS PARA CONCRETO



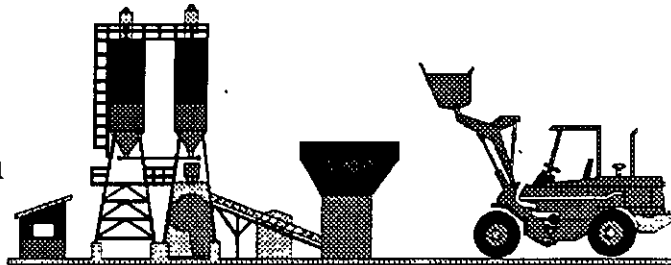
## OBJETIVO DEL USO DE ADITIVOS

- **Economía**
- **Solución técnica de requerimientos de desempeño del concreto, en estado fresco y endurecido**
- **Cumplir especificaciones**

## CALIDAD EN LA PLANTA

Producción, Mezclado, Transporte:

- Recepción, almacenamiento y manejo de materiales
- Básculas
- Tablas
- Dosificación



## CALIDAD EN LA PLANTA

- Mezclado
- Inspección / verificación
- Registros



## CALIDAD DEL CONCRETO EN CAMPO

- Supervisión antes de colados
  - ✓ Recepción del concreto
  - ✓ Aprobación de tramos



## CALIDAD DEL CONCRETO EN CAMPO

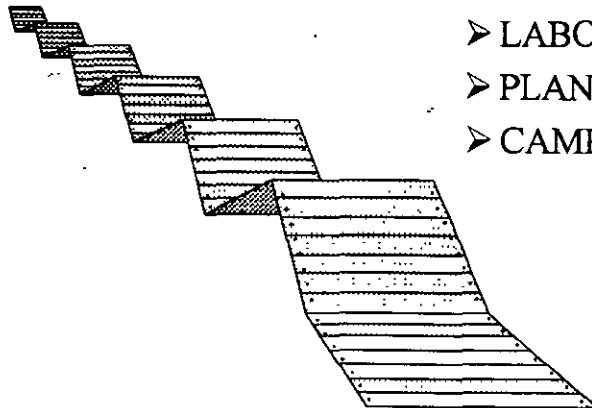
- Distribución, colocación y acabado
  - ✓ Equipo y accesorios
  - ✓ Personal
  - ✓ Prácticas constructivas
  - ✓ Registros

## CALIDAD DEL CONCRETO EN CAMPO

- Curado y Protección
  - ✓ Materiales. Calidad de membranas
  - ✓ Verificación de H.R. y temperaturas
  - ✓ Desarrollo de resistencia
  - ✓ Protección del concreto
  - ✓ Registros

## INFORMES DE CALIDAD DE CONCRETO

- LABORATORIO
- PLANTA
- CAMPO

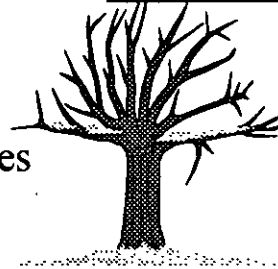


# CONCRETO EN CLIMAS EXTREMOSOS

- **Clima cálido**  
Definición y especificaciones



- **Clima frío**  
Definición y especificaciones

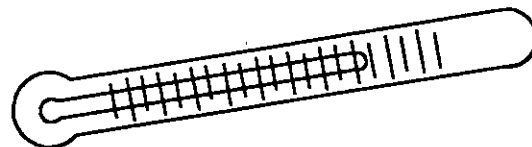


# CONCRETO EN CLIMAS CALIDOS

**CLIMA CALIDO**



**TEMPERATURA AMBIENTE  
TEMPERATURA CONCRETO  
HUMEDAD RELATIVA  
VIENTO  
NMX - C - 155**

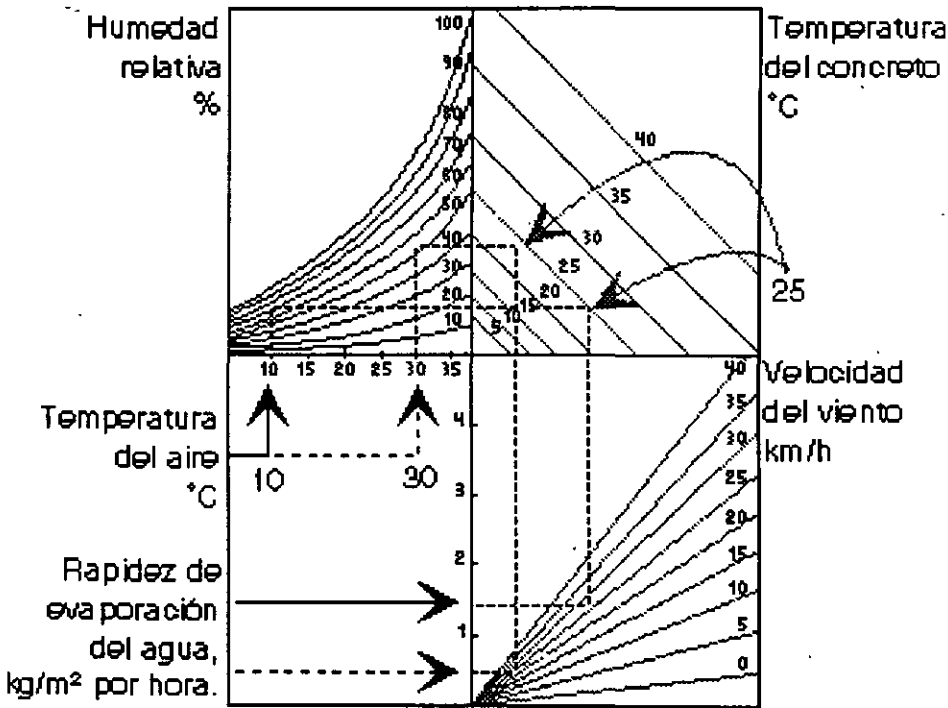
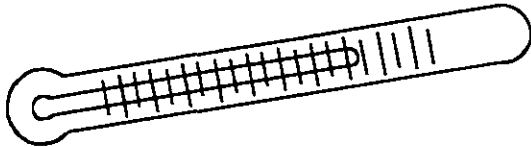


# CONCRETO EN CLIMAS CALIDOS

CLIMA CALIDO

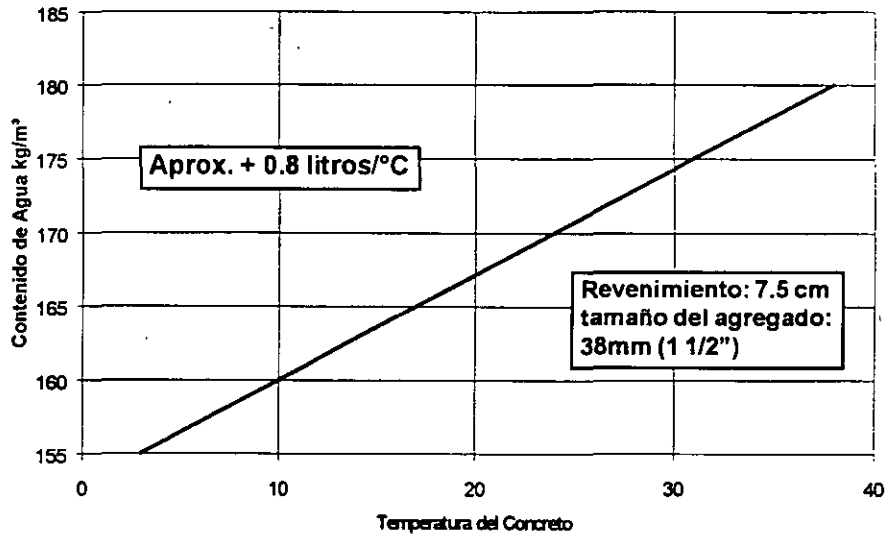


TEMPERATURA AMBIENTE  
 TEMPERATURA CONCRETO  
 HUMEDAD RELATIVA  
 VIENTO  
 NMX - C - 155



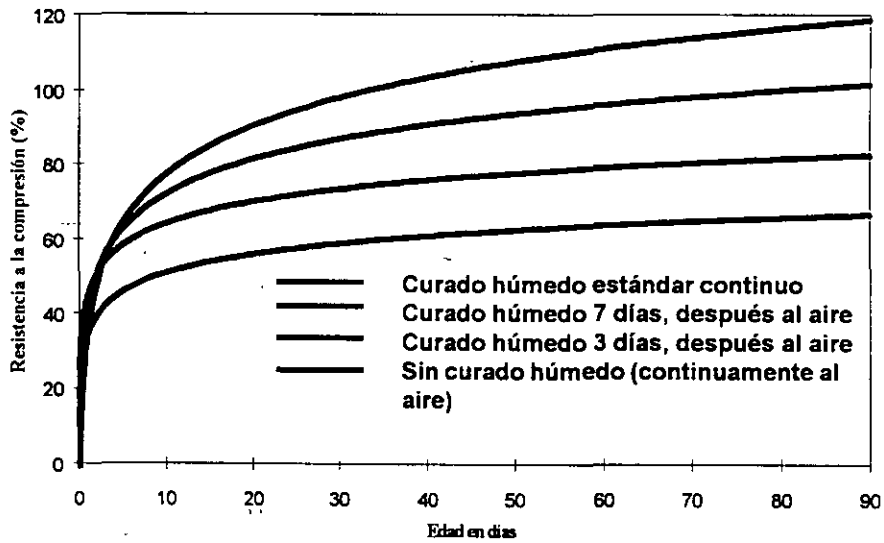


### EFFECTO DE TEMPERATURA AMBIENTE



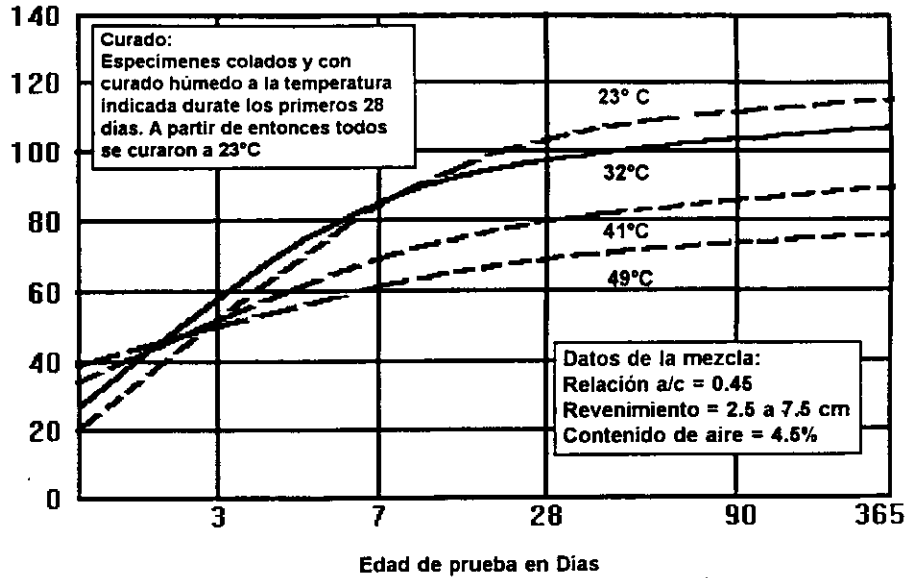
La cantidad necesaria de agua en una mezcla de concreto aumenta con el incremento en la temperatura del concreto

### DESARROLLO DE RESISTENCIA



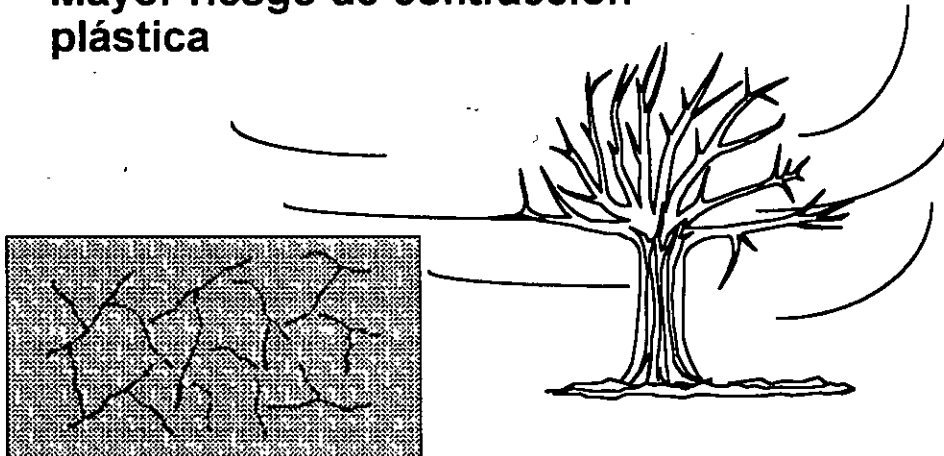
## RESISTENCIA VS TEMPERATURA

Resistencia a la Compresión %



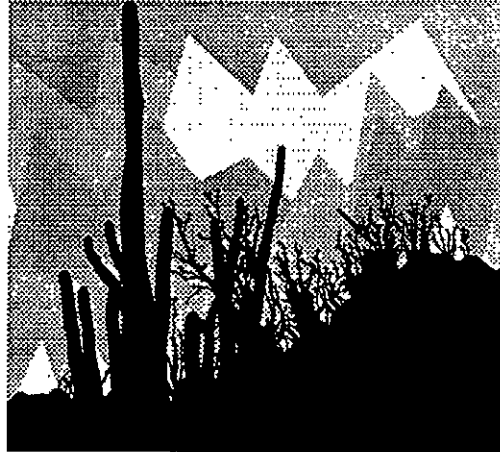
## EFFECTOS DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO

- Mayor riesgo de contracción plástica



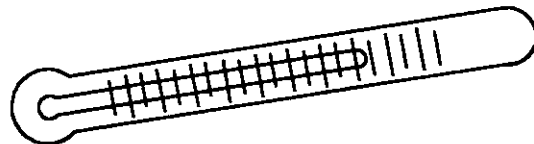
## PROBLEMAS TÍPICOS DEL CONCRETO EN CLIMAS CALIDOS... Y SOLUCIONES

- Acelerada pérdida de (reventamiento) trabajabilidad
- Mayor demanda de agua
- Reducción del tiempo de fraguado
- Mayor tendencia al agrietamiento plástico y contracción por secado
- Riesgo de resistencias reducidas
- Disminución de la impermeabilidad y de la durabilidad



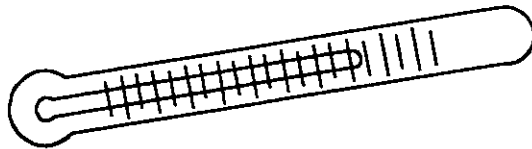
## SOLUCIONES

- Minimizar cemento/m<sup>3</sup> **B** Resistencia de proyecto  
Diseño de mezclas
- Precauciones en planta de producción de concretos
  - Bajar temperatura de agregados
  - Selección del tipo de cemento
  - Disminuir temperatura del agua de mezclado
  - Uso de aditivos



## SOLUCIONES

- **Minimizar cemento/m<sup>3</sup>**      Resistencia de proyecto  
Diseño de mezclas
- **Precauciones en planta de producción de concretos**
  - Bajar temperatura de agregados
  - Selección del tipo de cemento
  - Disminuir temperatura del agua de mezclado
  - Uso de aditivos



## SOLUCIONES

- **Prácticas de construcción en obra:**
  - Decisión sobre días/horas de colado
  - Precauciones en el tramo vs resecamiento, aumento de temperatura, velocidad viento
  - Preparativos para colado eficiente, incl. acabado
  - Curado
  - Capacitación del personal

## CONCRETO EN CLIMA FRIO

Conceptos fundamentales:

- Madurez = f (temperatura + tiempo)  
    < Temp => < fc  
    > permeabilidad
- Agua al volverse hielo aumenta de volumen
- Es exotérmica la reacción cemento - agua
- La difusividad térmica del concreto es relativamente baja

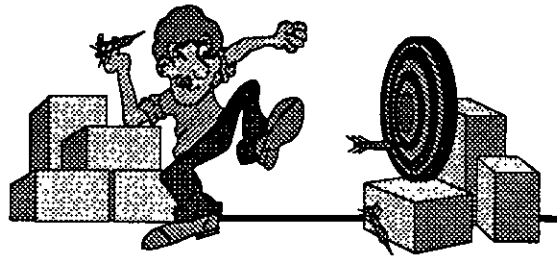
## PROBLEMAS TIPICOS DEL CONCRETO ASOCIADOS A CLIMA FRIO

- ⊙ Retraso en el tiempo de fraguado del concreto. Afecta a las actividades de acabado
- ⊙ Menor desarrollo de resistencia y de "impermeabilidad" en el concreto. Afecta al descimbrado y otros esfuerzos a temprana edad
- ⊙ Posibilidad de daño por congelamiento del agua interna/externa. Daño irreversible a la resistencia

## DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO PARA CLIMAS FRIOS

**Objetivos:**

- ✓ Evitar retrasos en tiempos de fraguado
- ✓ Proteger al concreto de sofreesfuerzos
- ✓ Generación de mayor cantidad de calor por efectos de hidratación del cemento



## ALGUNAS ALTERNATIVAS PARA DISEÑO DE MEZCLAS PARA CLIMA FRIO

- ⇒ Seleccionar el cemento que presente el mayor calor de hidratación, p. ej. tipo III
- ⇒ Acelerar la hidratación del cemento, utilizando un aditivo químico
- ⇒ Añadir un aditivo inclusor de aire

## **APOYOS ADICIONALES DURANTE LA PRODUCCION DE CONCRETO EN CLIMA FRIO**

- ⇒ Calentar el agua de mezclado
- ⇒ Calentar agregados, evitando pesar hielo en vez de grava/arena
- ⇒ Secuencia de carga



## **COMPLEMENTOS UTILES EN OBRAS EN COLADOS BAJO CLIMA FRIO**

- Calentar área de colado
- Construcción de recintos temporales
- Uso de materiales aislantes para retener el calor de hidratación del cemento
- Retrasar los colados hasta tener mejores condiciones de temperatura
- Precalentar cimbras
- Monitoreo de temperatura: concreto / ambiente
- Evitar shocks térmicos en el concreto



## CAMBIOS DE VOLUMEN EN LOS CONCRETOS

### ➤ Por temperatura

- en el concreto
- en el ambiente

... límite 20° C  
c.d.t.=10 X 10<sup>-6</sup>/° C

### ➤ Por humedad

interna { mojado  
          seco

expansión  
contracción

externa: humedad relativa  
- alta  
- baja



fisuras, grietas

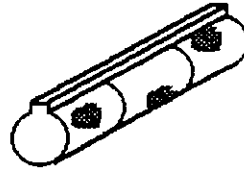
## CAMBIOS POR CARGAS AL CONCRETO

◆ Módulo de elasticidad	$14000\sqrt{f'c}$
◆ Relación de poisson	0.20 - 0.21
◆ Fluencia	$15 \times 10^{-6}$



## CAMBIOS POR EFECTOS QUIMICOS

- **Ataque por sulfatos presentes en**
  - suelo
  - aguas freáticas
- **Reactividad álcali-agregado**
  - agregados reactivos
  - cemento alto en álcalis
  - alta H.R. o agua
- **Corrosión del acero de refuerzo**
  - recubrimiento del acero y pH
  - presencia de cloruros en el concreto... y humedad



## CONCRETOS ESPECIALES

**Concepto básico:**

**Son aquellos concretos cuyos requerimientos de desempeño en estado fresco o endurecido NO pueden lograrse variando**

- **Tipo de cemento**
- **Cantidades de materiales**
- **O utilizando el equipo o métodos constructivos convencionales**

**O simplemente se aplica el término a concretos "poco comunes"**

## **CONCRETO AUTONIVELANTE**

**Tiene  $\geq 20$  cm de revenimiento. Se utiliza aditivo superfluidizante**

**Ventajas: trabajabilidad sin incrementar contenido de pasta; economía**

**Desventajas: Tiende a segregación**

**Aplicación típica: colado de obras con mucho armado, elementos delgados y/o de difícil acceso al concreto**

## **CONCRETO REVENIMIENTO CERO**

**Aquél cuyo revenimiento  $\leq 0.5$  cm; por disminución de contenido de agua**

**La consistencia se mide con otros métodos: Vebe, factor de compactación**

**Ventajas: menor consumo de cemento; menor calor de hidratación**

**Desventajas: Requiere equipo especial para distribución y compactación**

**Aplicación: Colado de grandes volúmenes, en áreas importantes, p. ej. presas, fabricación de tubos y otros productos prefabricados vibrocomprimidos, p. ej. blocks**

## **CONCRETO PRESFORZADO/POSTENZADO**

**El que se produce para la fabricación de elementos estructurales**

- presforzados
- postensados

**Típicamente son concretos con rev.  $\approx$  3-5 cm ya incluido el aditivo reductor; resistencia a compresión 350-400 kg/cm<sup>2</sup>, T.M.A. 13 ó 19 mm. Utiliza curado a vapor para rápido reuso de cimbras**

## **CONCRETO MASIVO**

**Suele denominarse así a los concretos cuyo**

- contenido y tipo de cemento
- espesor del elemento por colar
- condiciones ambientales locales
- contenido y características térmicas del agregado
- Procedimiento de fabricación

**inducirían tal cantidad de calor en la masa, que de no adoptarse medidas preventivas, provocarían el agrietamiento y degradación de la masa**

## **CONCRETO MASIVO**

**Aplicaciones típicas: pilas de puentes, cimentaciones de grandes equipos, presas**

**Suele caracterizarse el concreto por utilizar:**

- cemento con reducido calor de hidratación
- bajos consumos de cemento
- agregado T.M.A. 75 mm
- aditivo reductor y retardante
- hielo como sustituto de agua de mezclado
- bajos revenimientos

## **CONCRETO ALTA RESISTENCIA**

**Típicamente concretos con  $f'c \geq 500 \text{kg/cm}^2$**

**Requerimientos particulares del concreto:**

- Agregados densos, resistentes, gravas trituradas o semitrituradas. Estricto control de la uniformidad
- Uso de aditivo superreductor
- Uso de humo de sílice
- Alto grado de control de calidad en producción y campo

**Aplicaciones: edificios altos, estructuras marinas**

## **CONCRETO BAJO AGUA (Tremie)**

**El que se utiliza para efectuar colados bajo agua.**

**Párametros y aspectos relevantes:**

- Alto revenimiento**
- Uso de aditivos: superfluidizantes + antideslave**
- Cemento resistente a sulfatos**
- Requiere de tubería-embudo para ser colocado**
- Control de profundidad del tubo (descarga)**

## **OTROS CONCRETOS ESPECIALES**

- Reforzado con fibras**
- Con color**
- Lanzado**
- Arquitectónico**
- Poroso**
- Celular**
- C.C.R. (rodillos)**

## **NORMATIVA APLICABLE A CONCRETOS**

- ◆ **Especificaciones**
- ◆ **Normas Mexicanas**
- ◆ **Reglamentos de construcción**
  - Nacionales
  - Extranjeros
- ◆ **SINALP - Laboratorios**

---

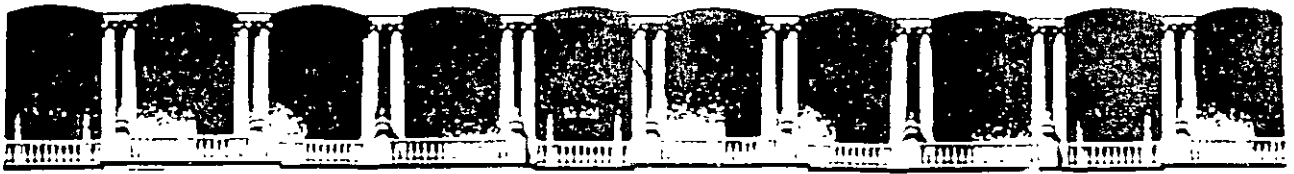
**EJEMPLOS:**

---



# **PREGUNTAS**





**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**“ DIPLOMADO EN SISTEMAS DE CALIDAD  
EN INGENIERÍA DE PROYECTO  
Y CONSTRUCCIÓN ”**

**MODULO II**

**CONTROL DE CALIDAD DE MATERIALES Y OBRAS**

**PARTE 2**

**SUPERVISION Y CONTROL DE CALIDAD DE OBRAS**

**TEMA:**

**PROPIEDADES Y PRUEBAS DE ACEPTACION DE MATERIALES  
(ASFALTOS)**

**EXPOSITOR: ING. RAFAEL ANGEL LIMON LIMON  
1997**

# **DIPLOMADO EN SISTEMAS DE CALIDAD EN INGENIERIA DE PROYECTO Y CONSTRUCCION**

## **MODULO II**

CONTROL DE CALIDAD DE MATERIALES Y OBRAS

## **PARTE 2**

SUPERVISION Y CONTROL DE CALIDAD DE OBRAS

**INSTRUCTOR:** ING. RAFAEL ANGEL LIMON LIMON

## **TEMA**

### **PROPIEDADES Y PRUEBAS DE ACEPTACION DE MATERIALES**

Asfaltos, cementos asfálticos, asfaltos rebajados, emulsiones, Polímeros Hule-asfalto.  
Programa SHRP (Strategic Highway Research Program)

## **NOTAS DEL INSTRUCTOR**

### **Sinopsis**

- 1 Métodos tradicionales
- 2 Nuevos criterios de evaluación
- 3 Conclusiones
- 4 Apéndices

Octubre de 1997

## SINOPSIS

Los métodos convencionales empleados para la evaluación de los ligantes asfálticos, conducen a resultados de escaso valor calificativo y de importancia dudosa como distintivo de calidad. En la mayoría de los casos no gozan de la sensibilidad necesaria para diferenciar a los distintos cementos asfálticos de un modo satisfactorio. Dichos resultados se dan en unidades arbitrarias, lo que dificulta la comparación adecuada de datos. Si esta afirmación es cierta en los asfaltos puros, lo es más en los modificados, que ya constituyen de por sí un nuevo material de propiedades notablemente distintas de los betunes originales.

En el presente trabajo se pasa revista a los métodos de ensayo utilizados para la evaluación de las características de los ligantes asfálticos, que consideramos completan la información que nos dan los métodos tecnológicos convencionales y pueden agruparse en los siguientes:

- Ensayos reológicos.
- Envejecimiento en película delgada.
- Susceptibilidad térmica; y
- Análisis de componentes.

### 1. METODOS TRADICIONALES.

Tradicionalmente, la identificación de los ligantes asfálticos se ha llevado a cabo determinando ciertas características de los mismos como la penetración, el punto de reblandecimiento, el punto de rotura Fraass, la ductilidad, etc.

Aunque todas estas características informan, en mayor o menor escala, sobre el tipo de betún objeto de examen, poco dicen sobre su calidad. Los resultados de los ensayos convencionales a que actualmente se someten los ligantes bituminosos no sirven para definir la calidad de los mismos. En este sentido la penetración, el punto de reblandecimiento, el punto de rotura Fraass y la ductilidad son constantes físicas de escaso valor calificativo y de dudosa importancia como distintivo de calidad.

### 1.1. Ensayo de penetración.

El resultado de este ensayo, tal como se aplica a los materiales asfálticos, se expresa por la distancia, en décimas de milímetro, a que una aguja, de dimensiones dadas, penetra verticalmente en la muestra del material, fijadas las condiciones de peso, tiempo y temperatura.

Fundamentalmente pretende ser una medida de la viscosidad, donde la tensión cortante viene dada por la carga dividida por la superficie de la punta de aguja en contacto con el betún, en momento dado. En consecuencia, disminuye al penetrar la aguja en el betún.

Para los materiales newtonianos que poseen una misma viscosidad para cualquier valor de la tensión cortante aplicada, se ha establecido una relación entre la penetración y la viscosidad (1):

$$\eta = \frac{5.3 \eta \cdot 10^9}{\text{pen.}^{1.93}}$$

donde:

$\eta$  = viscosidad, en poises; y

pen. = penetración (100 g, 5 s), en décimas de mm.

Si el material no es newtoniano, la viscosidad aparente o consistencia del mismo en función de la tensión cortante empleada en la medida. Durante el ensayo de penetración, la viscosidad aparente cambia constantemente y el valor de la penetración hallado no tiene la misma interpretación física que en los materiales puramente viscosos. El valor de este ensayo, pues, es sólo de orientación relativa, pese a los esfuerzos de correlacionarlo con la viscosidad. Los resultados obtenidos en él, pueden conducir a interpretaciones erróneas si no se conoce, previamente, el comportamiento reológico del material, ya que betunes de igual penetración pueden tener características muy diferentes.

### 1.2. Ensayo del punto de reblandecimiento.

Como los cementos asfálticos no son sólidos cristalinos, con un punto de fusión bien determinado, se ha definido un punto de reblandecimiento entre la serie de estados por los que pasa el pseudosólido hasta llegar a fundir, precisando perfectamente las condiciones de ensayo y las características del estado de pastosidad que se toman por el punto citado.

La forma lineal de la relación viscosidad-temperatura, de la que se hablará más tarde, indica, en general, que el punto de reblandecimiento no representa una temperatura crítica en la que haya un cambio brusco en la viscosidad del material

### **1.3. Ensayo del punto de rotura Fraass.**

El valor de este ensayo es sumamente problemático. Numerosos investigadores, entre ellos J.P. PFEIFFER (2) dicen que la facilidad de reproducción del mismo es francamente deficiente. Lógicamente, un método de ensayo cuya reproducibilidad se considera insuficiente, no puede servir para caracterizar un material.

### **1.4. Ensayo de ductilidad.**

Mide el alargamiento, antes de la rotura, de una probeta de cemento asfáltico estirada por sus extremos a velocidad constante. Normalmente el ensayo se realiza a 25°C y la velocidad de alargamiento es de 5 cm/min.

En relación con el aspecto reológico del ensayo, se ha demostrado (3) que los betunes que poseen un carácter reológico complejo tienen ductilidades más bajas que los que se aproximan a la fluencia newtoniana. Parece ser que la ductilidad mide una combinación de propiedades de fluencia del asfalto, pero ningún de un modo específico. En cualquier caso, no es variable una irreprochable diferenciación de los distintos tipos de betunes basándose en su ductilidad a 25°C

## **2. NUEVOS CRITERIOS DE EVALUACION.**

Se plantea, pues, el problema de la selección de los métodos de ensayo que aseguren la idoneidad de un determinado ligante para una mezcla asfáltica y garanticen la durabilidad del betún en servicio.

“Si se estudia a través del tiempo, el origen y desarrollo de las especificaciones y métodos de ensayo de los materiales asfálticos para uso vial, se encuentra que hace cincuenta años el número de ensayos propuestos era comparativamente pequeño. Seguramente dicho número y tipo de ensayo bastó para el control de esa época. En efecto, el número de asfaltos naturales y de residuo de petróleo disponibles en esos años era reducido y el buen comportamiento de los mismos no exigió otros requisitos que los especificados. La expansión de la construcción bituminosa a través de los últimos cuarenta años determinó la aparición en el

mercado mundial de nuevos tipos de asfaltos derivados de petróleos, cuyo comportamiento no está conocido y caían fuera de los tradicionales de México, California y Venezuela”.

Abundando en este criterio estamos empleando, en nuestras investigaciones sobre materiales bituminosos, métodos de evaluación que completan las clásicas características tecnológicas (penetración, punto de reblandecimiento, etc.). Estos métodos pueden clasificarse en:

- Ensayos físico-mecánicos: propiedades reológicas y diagramas fuerza-alargamiento, en los casos que sea posible.
- Ensayo de envejecimiento en película delgada.
- Caracterización de la susceptibilidad térmica: índice de penetración y coeficiente logarítmico de temperatura, y
- Ensayos químicos: análisis de componentes.

## **2.1. Ensayos físico-mecánicos.**

### **2.1.1. Propiedades Reológicas.**

Se define Reología como la Ciencia de la deformación y del flujo de la materia. Cualquier material sometido a un esfuerzo cortante suficientemente grande es capaz de deformarse y fluir. Mientras la mecánica racional considera los cuerpos como elementos indeformables y la mecánica elástica los asimila a sólidos perfectamente elásticos, consecuentes con la ley de Hooke, la Reología trata del caso más general en que las deformaciones producidas por un agente exterior o por un proceso intrínseco aparecen íntimamente ligadas al factor tiempo.

Los betunes asfálticos, por ser sistemas coloidales, tienen propiedades reológicas especiales que les hace adaptables a una gran variedad de usos. El conocimiento de dichas propiedades hace posible una clasificación racional de los mismos y nos proporciona un criterio para la elección del material adecuado.

El comportamiento Reológico de un cuerpo puede definirse en función de las variables temperatura, presión, tiempo, tensión cortante y gradiente de velocidad o velocidad de deformación. Si suponemos constantes las tres primeras se obtienen unos diagramas denominados “curvas de consistencia”, que

representan el gradiente de velocidad en función de la tensión que hace fluir al líquido a la mencionada velocidad.

Cuando un fluido se somete a la acción de una fuerza, se deforma y fluye; pero solamente una parte de la energía aplicada se transforma en energía cinética, puesto que una fracción más o menos notable se disipa en forma de frotamientos internos generadores de energía calorífica. Se dice que el fluido es más o menos viscoso, según que esta fracción sea más o menos grande.

NEWTON, en 1729, fue el primero en definir cuantitativamente el concepto de **viscosidad**. Su hipótesis básica es que una lámina de líquido en movimiento que se desliza a una velocidad constante ejerce una fuerza  $f$  sobre otra situada a una distancia  $dy$  y cuya velocidad difiera en  $dv$ , dada por la ecuación:

$$f = \eta S \frac{dv}{dy}$$

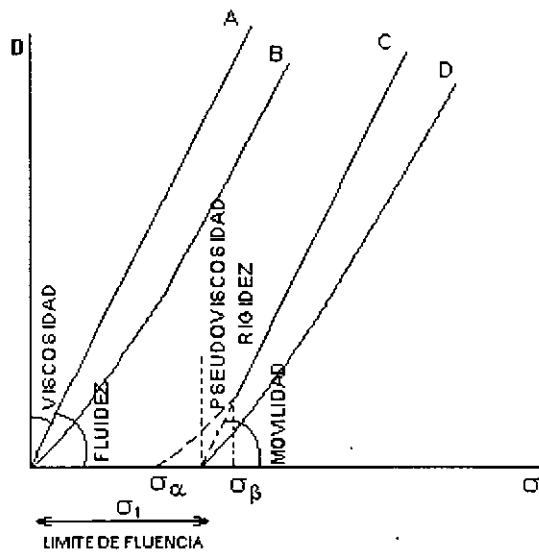
siendo  $S$  la superficie de las capas y  $\eta$  una constante característica del fluido, llamada coeficiente de frotamiento interno o viscosidad, que se define como "la fuerza necesaria, por unidad de superficie, para mantener la unidad de diferencia de velocidad entre dos planos paralelos separados por la unidad de distancia". Su inversa  $\phi = 1/\eta$  se llama **fluidez**.

Al incremento de velocidad,  $dv$ , de un plano con respecto al otro, situado a distancia  $dy$ , medida perpendicularmente a la dirección de la velocidad  $dv/dy = D$ , se le denomina **gradiente de velocidad**, que desde el punto de vista geométrico, puede ser identificada con la velocidad de deformación angular,  $d\gamma/dt$ , o simplemente, con la velocidad de deformación.

$$\frac{dv}{dy} = \frac{d \frac{de}{dt}}{dy} = \frac{d \frac{de}{dy}}{dt} = \frac{d\gamma}{dt}$$

A los fluidos donde existe proporcionalidad entre la tensión cortante,  $\sigma$ , y el gradiente de velocidad,  $D$ , se les denomina "**newtonianos**". Su representación en el diagrama  $D - \sigma$  es una recta que pasa por el origen de coordenadas (Curva A, Fig. 1), y bastará conocer el valor de un punto en el diagrama, que se obtiene de las medidas hechas experimentalmente, por ejemplo, con un reómetro capilar (Fig. 2) para establecer la posición de la línea en todo el campo de tensiones y gradientes de velocidad. Este

comportamiento parece bastante generalizado en los betunes de destilación ordinaria procedentes de crudos de reconocida base asfáltica, como los de México y California.



- A = FLUIDO NEWTONIANO
- B = FLUIDO PSEUDOPLASTICO
- C = FLUIDO PLASTICO
- D = CUERPO DE BINGHAM GENERALIZADO

Fig. 1.- Diagrama reológico  $D = D(\sigma) t$

Fig. 2.- Reómetro capilar

No obstante, existen muchos materiales de interés técnico, llamados, en general, no newtonianos, que por no ser verdaderos fluidos, muestra viscosidades anómalas. Las leyes de deformación de dichos materiales son intermedias entre las aplicables a los líquidos newtonianos y a los sólidos. Las curvas



de consistencia de los mismos presentan formas más complejas, apartándose de las rectas que caracterizan a los líquidos normales. Así el fluido **plástico** o **binghamiano** (Curva C, Fig. 1), cuya fluencia solo es sensible después de un cierto valor crítico de la tensión  $\sigma_r$  llamado "límite de fluencia". Para tensiones inferiores a este valor umbral, el material se comporta como sólido; las deformaciones que experimenta son de tipo elástico, y despreciables comparadas con las del flujo plástico. Una vez sobrepasado el valor límite de tensión, el material se deforma a razón constante  $\sigma/D$ , que recibe el nombre de "rigidez" y cuyo inverso es la llamada "movilidad"  $\mu$ .

La ecuación que define las características de fluencia de los fluidos binghamianos es de la forma:

$$\sigma - \sigma_r = \frac{1}{\mu} \frac{dv}{dy}$$

para todo valor de  $\sigma > \sigma_r$

Una sustancia plástica, por tanto, reológicamente está caracterizada por dos constantes independientes -en lugar de una, la viscosidad, que determina las propiedades de los líquidos newtonianos-: el límite de fluencia y la movilidad. El conocimiento del límite de fluencia de un material es de valor considerable, ya que indica la carga máxima que puede soportar el mismo sin que se produzcan deformaciones con velocidad constante.

Otro tipo de fluidos que aparecen en la figura 1, son los denominados **pseudoplásticos**, caracterizados por que sus curvas de consistencia no presentan un límite de fluencia medible y cuyo gradiente de velocidad no es directamente proporcional a la tensión aplicada, sino que crece más rápidamente que éstas y dichas variables están ligadas por una ecuación más compleja.

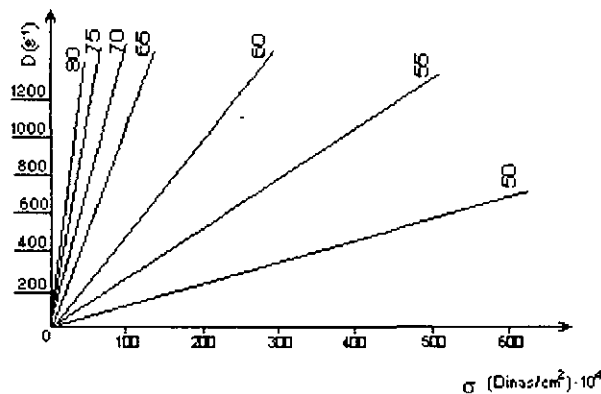


Fig. 3.- Diagrama reológico de un ASFALTO PURO

A este grupo de materiales pertenecen algunos betunes asfálticos, generalmente los soplados con aire caliente, así como muchos betunes modificados (4) e incluso hemos podido constatar que el envejecimiento en película delgada lleva consigo en algunos casos, y fundamentalmente, a bajas temperaturas, una transformación de materiales newtonianos en pseudoplásticos (figs. 3, 4 y 5).

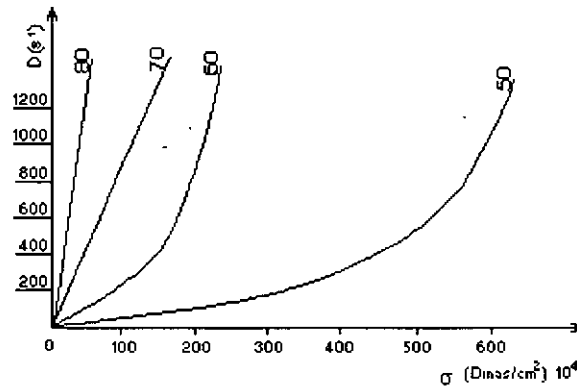


Fig. 4.- Diagrama reológico de un ASFALTO ENVEJECIDO

Una forma de evaluar las modificaciones de un betún modificado o envejecido, desde un punto de vista reológico es utilizar una representación doble logarítmica de la tensión frente a la velocidad de deformación. Si el material fuera newtoniano se obtendría una línea recta. El alejamiento de este valor de la tangente nos indica el grado de separación de la fluencia newtoniana de un determinado producto:

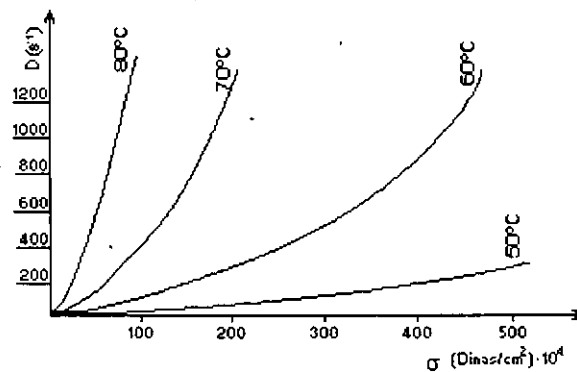


Fig. 5.- Diagrama reológico de un ASFALTO MODIFICADO

En la tabla 1, y a título de ejemplo, se presentan los valores de la pendiente, a distintas temperaturas, para un asfalto de origen Venezolano, al principio newtoniano y pseudoplástico, una vez envejecido. Se puede comprobar, asimismo, que a medida que aumenta la temperatura el material se aproxima más a la fluencia newtoniana.

**TABLA 1**

<b>Temperatura, ° C</b>	<b>Pendiente de la recta log <math>\eta</math>/log D</b>
50	0.761
55	0.829
60	0.831
65	0.896
70	0.916
75	0.926
80	0.941

En realidad los fluidos pseudoplásticos ocupan una posición intermedia entre los newtonianos y los plásticos, debido a la existencia de una cierta estructura interna, cuya deformación exige un consumo suplementario de energía respecto a la necesaria para vencer la resistencia puramente viscosa.

Finalmente, se conocen los llamados **cuerpos de Bingham generalizados** (Curva D, Fig. 1) que presentan un límite de fluencia y, para valores de la tensión superiores a él, se comportan como fluidos pseudoplásticos

### **2.1.2. Diagramas fuerza-alargamiento.**

Consideramos importante conocer el comportamiento elástico de un producto asfáltico, ya que su interés tanto en la construcción de pavimentos como en sobre capas de puentes es notable. Pese a ello, rara vez se hallan detalles sobre el tema, y pocos son los datos que existen sobre las propiedades elásticas de un betún en el intervalo de tensiones donde la fluencia es nula.

## 2.2. Ensaye de envejecimiento en película delgada.

Ya hemos indicado que el asfalto aumenta su consistencia durante el mezclado y continúa incrementando la misma después de su puesta en servicio. La experiencia demuestra que medir el grado de endurecimiento después del clásico ensayo de la pérdida por calentamiento, con un ensayo de penetración, tiene el mismo error conceptual que esta última como medida de la consistencia. Por tal razón pensamos que la medida de consistencia del asfalto original y del sometido a envejecimiento en película delgada, a una temperatura determinada, un reómetro capilar, someterlo al ensayo de envejecimiento en película delgada de 3 mm durante 5 horas a una temperatura elevada -la del mezclado-, y luego determinar de nuevo su consistencia.

$$I_e = \frac{\eta_f}{\eta_i}$$

Dados sus fundamentos, la determinación del índice de envejecimiento o de incremento de consistencia, brinda un valor de mayor base científica que los obtenidos con los clásicos ensayos de penetración, ya que nos permite evaluar la viscosidad que habría que dar en las especificaciones, que debería ser la del producto en obra, luego del mezclado y compactado, y no la del material original, que no ha experimentado calentamiento alguno.

Resumiendo, creemos que el índice de incremento de consistencia o de envejecimiento, es un medida bastante aproximada del grado de alteración del material.

## 2.3. Caracterización de la susceptibilidad térmica.

La mayor parte de las veces, los cementos asfálticos son aplicados en obra en forma de productos de viscosidades bajas, obtenida bien por calentamiento del material, o disolviendo éste en un disolvente volátil (cut-back) o por emulsificación en agua; por tanto, la facilidad de manejo del material queda determinada por su relación viscosidad-temperatura, la solubilidad y la posibilidad de emulsificación. De estos tres procedimientos, el más común es reducir la viscosidad del betún por calentamiento.

La relación viscosidad-temperatura es el factor que gobierna la aplicación en caliente del asfalto, y es evidente la importancia de determinar la temperatura necesaria para reducir la viscosidad del mismo al valor requerido para una operación dada. Según esto, la determinación de la susceptibilidad térmica de

un betún es de vital importancia; para la determinación de la misma, consideramos evaluar dos parámetros fundamentales: índice de penetración y el coeficiente logarítmico de temperatura.

### 2.3.1. Índice de penetración.

PFEIFFER Y VAN DOORMAL (5) han establecido una relación entre la penetración y el punto de reblandecimiento, que consideraron indicativa de la susceptibilidad térmica de los betunes y que denominaron "índice de penetración", I.P.

Si se presenta el logaritmo de la penetración en función de la temperatura centigrada, T, a la que se realiza el ensayo, se obtiene una función lineal, lo cual sugirió que la pendiente de la recta pudiera ser usada como índice de la susceptibilidad. Su determinación requería dos ensayos de penetración hechos a distintas temperaturas. Al extrapolar dicha recta hasta la temperatura del punto de reblandecimiento, la penetración correspondiente, para cualquier tipo de betún, resultaba ser del orden de 800; de aquí que el I.P. pueda calcularse con una sola penetración y el punto de reblandecimiento. Pero el I.P. no es directamente proporcional a esa pendiente, sino que la relación viene dada por la fórmula:

$$\frac{\log 800 - \log \text{pen.}}{\text{P.R.} - T} = \frac{20 - \text{I.P.}}{10 + \text{I.P.}} = \frac{1}{50}$$

donde:

I.P. = Índice de penetración.

pen = Penetración (100 g 5 s) en décimas de mm

P.R. = Punto de reblandecimiento (anillo y bola), en °C.

T = Temperatura a que se hace el ensayo de penetración, en °C

De la relación anterior se deduce que un betún cuya penetración fuera independiente de la temperatura tendría un I.P. de +20, y otro cuya susceptibilidad a los cambios de temperatura fuera infinito, su I.P. valdría -10. Estos extremos no se dan nunca en la práctica, y el I.P. de los betunes oscila entre -6 y +8, de tal forma que cuanto menor sea el I.P., tanto mayor será la susceptibilidad térmica.

El nomograma de la figura 6, nos permite deducir fácilmente el I.P. de los valores de una penetración hecha a una temperatura determinada y con un punto de reblandecimiento conocido

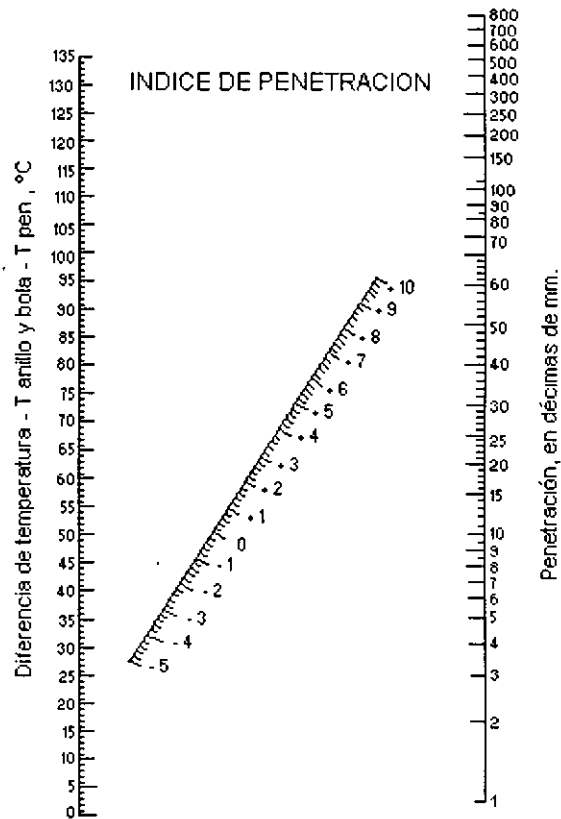


Fig. 6.- Nomograma para determinar el índice de penetración.

Lo realmente interesante del I.P. es que se le atribuye una estrecha relación con el tipo reológico del cemento asfáltico. Así los asfaltos puramente viscosos tienen índices de penetración inferiores a -2; los llamados "sol" tienen valores comprendidos entre -2 y +2, y los de tipo "gel" superiores a +2.

### 2.3.2. Coeficiente logarítmico de temperatura.

SCHWEYER, COOMBS Y TRAXLER (6) llegaron a la conclusión que si se representa el logaritmo de la viscosidad absoluta de los betunes asfálticos en función de la temperatura, se obtiene una recta, dentro de los límites experimentales de error, a bajas temperaturas y a las elevadas, donde los materiales presenten viscosidades de 1 a 5 poises. Basándose en este hecho, evalúan la susceptibilidad térmica mediante el denominado "índice de viscosidad", I.V., que se define como "el

tanto por ciento de descenso de la viscosidad por grado centígrado de aumento de la temperatura", y que matemáticamente se puede expresar como:

$$I.V. = 100 (\eta_a/\eta_b) \frac{1}{T_a - T_b} - 1$$

donde  $\eta_a$  y  $\eta_b$  son las viscosidades absolutas las temperaturas centígradas  $T_a$  y  $T_b$ , respectivamente.

La pendiente de la recta  $\log \eta = f(\log T)$  ha sido denominada "coeficiente logarítmico de temperatura" y es el valor más usual para evaluar las susceptibilidades relativas a los distintos productos bituminosos. Se puede definir como:

$$n = \frac{\log \eta_1 - \log \eta_2}{\log T_2 - \log T_1}$$

donde:

- n = Coeficiente logarítmico de temperatura.
- T = Temperatura, en °C, y
- $\eta$  = Viscosidad, en poises

El efecto de la temperatura sobre el betún asfáltico es complicado y confuso por la presencia de la fluencia compleja, no habiéndose encontrado una ecuación general que sea aplicable en un amplio margen de temperaturas. Todo ello indica, una vez más, la necesidad de considerar magnitudes con significación física precisa y establecer métodos rigurosos de medida de las mismas, al objeto de obtener datos experimentales desprovistos del carácter empírico que poseen los obtenidos con los procedimientos usuales.

En cuanto al coeficiente logarítmico de temperatura, admite una crítica cuando se trata de fluidos no newtonianos, pues cabe preguntarnos ¿cuál es el valor de la viscosidad que debemos tomar?. La respuesta consiste en fijar un valor de la velocidad de deformación fijo, con objeto de obtener resultados comparables. En nuestras experiencias, y por una serie de consideraciones de distinta índole, hemos elegido el valor de velocidad de deformación  $120_s^{-1}$ .

#### 2.4. Ensayos químicos: análisis de componentes.

Un asfalto está constituido por la dispersión coloidal de las moléculas fuertemente condensadas, los **asfaltenos**, en una fase oleosa, de peso molecular mucho más pequeño, los **maltenos**.

Estos betunes se clasifican, generalmente, en dos grandes grupos: betunes “gel”, donde los asfaltenos están fuertemente floculados y cuyo comportamiento es no newtoniano (viscoelásticos), y los betunes “sol”, donde los asfaltenos están peptizados, su comportamiento esta más próximo al correspondiente a un líquido newtoniano.

Por tanto, un betún esta constituido por una fase asfáltica y otra malténica, esta última, podemos dividirla, a su vez, en dos. una fracción flocuante o **resinas**, que contiene moléculas parafinicas o naftenicas con un 25% de aromáticos de largas cadenas laterales en el anillo, y otra peptizante o **aceites** que tienen la misión de disolver incluso a los asfaltenos. Según las características estructurales de un determinado betún, el tanto por ciento de los tres componentes varia, pudiendo representarse su composición en un diagrama triangular (Fig. 7).

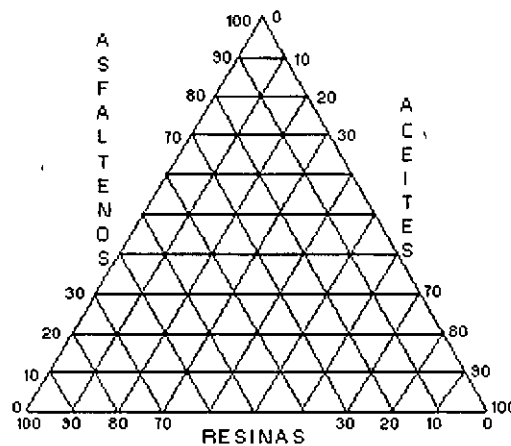


Fig. 7.- Diagrama triangular para la representación del análisis de componentes de un betún.

Los betunes cuyo punto se sitúe en la parte derecha del diagrama son de tendencia newtoniana, mientras que los que aparezcan en el lado izquierdo son de carácter viscoelástico, y, fundamentalmente, son empleados en la impermeabilización. Por tanto, con representar el punto correspondiente a un betún puro modificado, se podrá observar si es o no útil para el fin que se propone.



Resulta interesante definir un parámetro único que represente la composición de un betún para ello se puede hacer uso del coeficiente denominado “**inestabilidad coloidal**”, lo que se define mediante la siguiente relación:

$$I_c = \frac{\text{Asfaltenos + Resinas}}{\text{Aceites}}$$

Un aumento del coeficiente de inestabilidad coloidal lleva consigo mayores valores del punto de reblandecimiento, ductilidad y recuperación elástica; en cambio, disminuye su rotura Fraass y su susceptibilidad térmica.

Las propiedades de los betunes varían de una manera continua con su composición; para un betún desconocido, el valor de  $I_c$  da una idea de la zona en la que encontrará, y por consiguiente, del orden de magnitud de las principales propiedades.

La determinación de los distintos componentes de un betún : asfaltenos, resinas y aceites, se encuentra ampliamente descrita en la bibliografía (7).

### 3. CONCLUSIONES

Se puede afirmar que los ensayos empíricos usados en la actualidad carecen de la sensibilidad necesaria para diferenciar los betunes asfálticos de una manera satisfactoria, y que los resultados de los mismos se dan en unidades arbitrarias, lo que dificulta la comparación adecuada de datos. Si esta afirmación es válida para los betunes puros, lo es con mayor motivo para los productos modificados, los cuales constituye, en realidad, un nuevo material; cuyas características difieren, notablemente, de las de los betunes de origen.

La posibilidad de deducir “a priori” la calidad de un betún asfáltico puro o modificado, mediante ensayos de laboratorio, es de vital importancia, teniendo en cuenta que en el mercado se encuentran materiales de comportamiento práctico desconocido. Además sería la única manera de evaluar la eficacia de una determinada modificación. La solución es difícil, dada su complejidad y la falta de datos sobre los fenómenos físicos y químicos básicos, que rigen el comportamiento de un betún. Por todo ello, nosotros creemos conveniente, a parte de las tradicionales características tecnológicas (punto de reblandecimiento, penetración, ductilidad, rotura Fraass, etc.), la realización de los siguientes tipos de ensayos:

- Ensayos reológicos.
- Envejecimiento en película delgada.
- Caracterización de la susceptibilidad térmica: índice de penetración y coeficiente logaritmico de temperatura; y
- Ensayos químicos: análisis de componentes.

# PRUEBAS ESPECIALES PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS

## APENDICE A

### PRUEBA DE SEPARACION PARA ASFALTO MODIFICADO CON POLIMERO TIPO 1 (SBS)

#### 1. ALCANCE.

- 1.1. La separación de polímero y asfalto durante el almacenamiento caliente evaluada por medio de comparar el punto de reblandecimiento de anillo y bola, del inicio y el final de las muestras tomadas de un tubo sellado de asfalto modificado con polímero. El método consiste en colocar un tubo sellado de asfalto con polímeros en una posición vertical en un horno a 163° C por un periodo de 48 horas.

#### 2. DOCUMENTOS DE REFERENCIA.

- 2.1. ASTM D-36: Punto de Reblandecimiento de Asfalto (Anillo y Bola)  
ASTM E-11: Especificaciones para el Procedimiento de Prueba de Cedazo de Criba de Alambre.

#### 3. APARATOS.

- 3.1. Tubos de Aluminio. Diámetro de 5.0 cm por 14 centímetros de longitud
- 3.2. Horno. Un horno capaz de mantener 163° C ± 6° C.
- 3.3. Congelador. Un congelador capaz de mantener -7° C ± 6° C.
- 3.4. Retenedor. Un retenedor capaz de soportar los tubos de aluminio en una posición vertical en el horno congelador.
- 3.5. Espátula y Martillo. La espátula debe ser rígida y exacta para permitir corte del tubo conteniendo la muestra cuanto esté a una temperatura baja.

#### **4. PROCEDIMIENTO.**

- 4.1. Coloque el tubo de vacío con fondo sellado en el retenedor.
- 4.2. Caliente cuidadosamente la mezcla hasta que exista suficiente fluido para verter. Se debe de tener cuidado para evitar sobrecalentamiento local. Crible la muestra derretida a través de una malla número 50 de acuerdo con ASTM E-11. Después de esto, vierta 50.0 gramos dentro del tubo que se mantenga vertical. Quite el exceso del tubo dos veces y séllelo.
- 4.3. Coloque el retenedor con los tubos sellados en un horno a  $163 \pm 6^\circ \text{C}$ , por un periodo de  $48 \pm 1$  hora. Al final del período de calentamiento, remueva el retenedor del horno e inmediatamente colóquelo en el congelador a  $-7 \pm 6^\circ \text{C}$  teniendo cuidado de mantener los tubos en una posición vertical en todo momento. Deje los tubos en el congelador por un mínimo de 4 horas para solidificar completamente la muestra.
- 4.4. Al remover el tubo del congelador, coloque el tubo en una superficie plana. Con una espátula y martillo, corte el tubo en tres porciones de longitud iguales. Coloque las partes extremas en un horno a  $163 \pm 6^\circ \text{C}$  hasta que este suficientemente fluido para remover las piezas del tubo de aluminio.
- 4.5. Después de esto, vierta el inicio y el final de la muestra dentro de los anillos para una prueba de punto de reblandecimiento de anillo y bola. Prepare los anillos y aparatos como se describe en ASTM D-36 2/
- 4.6. El inicio y final de la muestra del mismo tubo deben ser probados al mismo tiempo en la prueba de punto de reblandecimiento.

#### **5. REPORTE.**

- 5.1. Reporte el punto de reblandecimiento de las porciones del inicio y final de la muestra. Pruebas de duplicidad de separación deben ser tomadas.

## **2. APENDICE B**

### **PRUEBA DE RECUPERACION ELASTICA PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS TIPO 1 (SBS).**

#### **1. ALCANCE.**

- 1.1. La recuperación elástica de un cemento es evaluada por el porcentaje medido de deformación recuperable después de la prolongación durante una prueba de ductilidad convencional. A menos que se especifique de otra manera, la prueba debe ser efectuada a una temperatura de  $25 \pm 0.5^\circ \text{C}$  y con una velocidad de 5 centímetros/minutos  $\pm 5.0\%$ .

#### **2. DOCUMENTOS DE REFERENCIA.**

- 2.1. ASTM D-113: Ductilidad de Materiales Asfálticos.  
ASTM E-11 . Especificación para Termómetros ASTM.

#### **3. APARATOS.**

- 3.1. Molde. El molde debe ser similar en diseño a aquel descrito para utilización en la prueba de ductilidad (ASTM D-113), Figura 1, excepto que los lados del ensamble del molde, partes a y a' deben tener lados derechos produciendo un espécimen de prueba con áreas seccionales cruzadas de  $1 \text{ centímetro}^2$
- 3.2. Baño de Agua. El baño de agua debe ser mantenido a una temperatura de prueba especificada, variando no más de  $0.18 \text{ F}$  ( $0.1^\circ \text{C}$ ) de esta temperatura. El volumen de agua debe ser mayor de 10 litros y el espécimen debe ser sumergido a una profundidad no menor de 10 centímetros y debe ser soportado en una repisa perforada a 5 centímetros del fondo del baño.
- 3.3. Máquinas de Prueba. Para empujar la briqueta del material asfáltico, cualquier aparato puede ser utilizado, el cual esté construido de tal forma que el espécimen será continuamente sumergido en agua,

como es especificado, mientras que los dos clips sean empujados a una velocidad uniforme sin vibraciones.

3.4. Termómetro. Debe ser utilizado un termómetro ASTM 63° C ó 63°F.

3.5. Tijeras. Cualquier tipo de tijeras convencionales capaces de cortar asfalto de modificación con polímero a la prueba de temperatura.

#### **4. PROCEDIMIENTO.**

4.1. Prepare especímenes de prueba como se prescribe por ASTM D-113.

4.2. Prolongue el espécimen de prueba para una deformación de 10 centímetros

4.3. Inmediatamente corte el espécimen de prueba a dos mitades a un punto medio utilizando las tijeras. Mantenga la prueba del espécimen en el baño de agua por 1 hora.

4.4. Después del periodo de 1 hora, mueva la mitad prolongada de la prueba de espécimen hacia atrás a una posición cerca de la otra mitad del espécimen para que las dos piezas de asfalto de modificación con polímero solamente se toquen. Anote la longitud de la prueba de espécimen como X.

#### **5. REPORTE.**

5.1. Calcule el porcentaje recuperable por medio del siguiente procedimiento:

$$\text{Recuperación \%} = \frac{10 - X}{10} \times 100$$

# **PRACTICA PROPUESTA PARA MEDICIONES REOLOGICAS DE ASFALTOS UTILIZANDO REOMETRO DE ESFUERZO DINAMICO**

## **1. ALCANCE.**

- 1.1. Este ensaye propuesto cubre la utilización de instrumentación mecánica dinámica para reunir y reportar las propiedades reológicas del asfalto. Puede ser utilizado como un ensaye para determinar la viscosidad compuesta y características significativas viscoelásticas de cementos asfálticos y asfaltos modificados o bien otros asfaltos, con función de frecuencia, amplitud de tensión, temperatura y tiempo
- 1.2. Esta norma propuesta incorpora un ensaye de laboratorio para determinar las propiedades reológicas sujetas a diversas deformaciones oscilatorias en un instrumento del tipo comúnmente referido como un reómetro mecánico o de esfuerzo dinámico.
- 1.3. Se intenta que este ensaye propuesto ofrezca un medio de determinar las propiedades reológicas de asfaltos sobre una tasa de temperaturas por medio de técnicas de vibración forzada no resonantes. Trazos de módulos, viscosidad y tangente de delta, como una función de oscilación dinámica (frecuencia), amplitud, de tensión; temperatura y tiempo son determinantes de las propiedades viscoelásticas de asfalto.
- 1.4. Este ensaye propuesto es válido para una tasa amplia de frecuencias, típicamente de 0.001 a 10 HZ.
- 1.5. Se intenta que este ensaye propuesto para asfaltos homogéneos y heterogéneos, incluyendo aquellos que puedan contener aditivos tales como hule molido de neumático, polímeros aditivos o productos químicos que pueden alterar las propiedades viscoelásticas para su desarrollo.
- 1.6. Discrepancias aparentes pueden surgir en resultados obtenidos sobre condiciones experimentales. Sin cambiar los datos observados, reportando (como se describe en este ensaye propuesto) las condiciones sobre las cuales los datos fueron obtenidos, demostrarán diferencias aparentes, a las observadas en otros estudios

1.7. Los valores especificados en unidades SI deben ser recordados como la norma. Los valores en paréntesis son únicamente para propósitos de información.

## **2. DOCUMENTOS DE REFERENCIA.**

### **2.1 Norma ASTM:**

D-4065 Ensaye para Determinar y Reportar Propiedades Mecánicas y Dinámicas de Plásticos.

D-4092 Terminología Relacionada a Mediciones Mecánica y Dinámicas en Plásticos.

D-4400 Ensaye para Mediciones Reológicas de Polímeros Derretidos Utilizando Procedimiento Mecánicos y Dinámicos.

## **3. TERMINOLOGIA.**

3.1. Definiciones. Para definiciones de términos relativos a este ensaye propuesto, observe Terminología D-4092.

## **4. RESUMEN DE ENSAYE.**

4.1. un espécimen de geometría conocida es colocado en la oscilación mecánica a frecuencias mezcladas. El módulo elástico o disipado, o ambos, del espécimen, son indicativos de características viscoelásticas del espécimen. Cambios rápidos de las propiedades viscoelásticas a temperaturas particulares, tiempos, o frecuencia son normalmente referidas como regiones transitorias.

## **5. SIGNIFICADO Y USO.**

5.1. La prueba dinámica y mecánica proporciona un método para determinar el módulo elástico y disipado como una función de la temperatura, frecuencia y/o tiempo. Un trazo de módulos elásticos o módulos disipados de materiales contra la temperatura proporcionan una representación gráfica de elasticidad y humedad como una función de temperatura o frecuencia.

5.2. Los valores obtenidos en este ensayo propuesto pueden ser utilizados para obtener lo siguiente:



5.2.1 Viscosidad y módulos compuestos como una función de oscilación dinámica y temperatura.

5.2.2. Dependencia de temperatura.

5.2.3. Efectos de aditivos.

5.2.4. Establecer parámetros específicos para materiales.

5.2.5. Calidad de Control, búsqueda y desarrollo.

## **6. APARATO**

6.1 La función del aparato es la de sostener una muestra de conocido volumen y dimensiones para que el material actúe como el elemento elástico en el sistema oscilatorio manejado mecánicamente, como se establece en la Práctica D-4065. Estos instrumentos operan en uno o más de los módulos siguientes para comportamiento de medición reológica en énfasis constante de esfuerzo o tensión oscilatoria dinámica: (1) amplitud forzada constante, frecuencias mezcladas, (2) amplitud forzada constante, frecuencia variable y (3) amplitud forzada, frecuencia establecida.

6.2. El aparato debe consistir en lo siguiente:

6.2.1. Accesorios de Prueba. Una elección ya sea de cono pulido o plato, teniendo un cono de ángulo conocido, o platos paralelos teniendo ya sea una superficie suave pulida o dentellada. Variaciones de esta herramienta, tal como plato de fondo con borde concéntrico de inundación, pueden ser utilizadas como sea necesario

6.2.2. Deformación Oscilatoria (Tensión). Un mecanismo para aplicar una oscilación continua de deformación (Tensión) al espécimen

6.2.3. Detectores. Un mecanismo o mecanismos para determinar parámetros experimentales dependiente o independientes, tales como fuerza (énfasis o tensión), frecuencia y temperatura. La temperatura debe ser medida con la precisión de  $\pm 0.1^\circ \text{C}$ , la frecuencia a  $\pm 1\%$  y la fuerza de  $\pm 1\%$ .

6.2.4 Controlador de Temperatura y Horno. Un mecanismo para controlar que la temperatura del espécimen este dentro de  $\pm 0.1^\circ \text{C}$ , ya sea por calentamiento (en estribo o rampas), enfriamiento (en estribo o rampas), manteniendo un ambiente constante de espécimen o combinación de ambos. Un programador de temperatura debe ser lo suficientemente estable para permitir medición de temperatura de muestra a  $0.1^\circ \text{C}$ .

## **7. PREPARACION DE LA MUESTRA.**

7.1. Caliente la muestra con cuidado para prevenir sobrecalentamiento hasta que se haga suficientemente fluido para verter, ocasionalmente mueva la muestra para ayudar la transferencia de calor, y para asegurar uniformidad.

7.2. Transfiera un mínimo de 20 ml dentro de un envase ajustable y caliente a  $135 \pm 5^\circ \text{C}$ , moviéndola lentamente para prevenir sobrecalentamiento local y teniendo cuidado de evitar el entrapamiento de aire.

**Nota 2.** La muestra debe tener una viscosidad suficiente para fluir a  $135^\circ \text{C}$ , después caliente la muestra para que fluya. El aumento de temperatura debe ser incluido en el reporte.

## **8. ESPECIMENES DE PRUEBA.**

8.1. Debido a varias geometrías que pueden ser utilizadas para características mecánicas dinámicas de asfalto, el tamaño no es ajustado por medio de esta práctica propuesta, sin embargo, una muestra geométrica (diámetro y espesor) debe ser reportada para cada serie de comparaciones.

8.2. Herramientas dentelladas pueden ser utilizadas para materiales exhibiendo hundimiento interfacial debido a módulos de altura

## 9. CALIBRACION.

9.1. Calibre el instrumento utilizando el procedimiento recomendado por el fabricante.

9.2. Una norma de calibración (norma de viscosidad) debe ser utilizada periódicamente para determinar si el instrumento esta dentro de los limites.

**Nota 3.** El control de la temperatura puede ser checado con una resistencia térmica. Una resistencia térmica pequeña puede ser colocada dentro de la muestra entre dos planchas paralelas con una abertura de 3.0 milímetros.

## 10. PROCEDIMIENTO.

10.1 Ponga más bajo el accesorio de la prueba superior para que este colocado el accesorio del fondo con aproximadamente la misma fuerza normal durante la prueba. Ponga el cero en la abertura del indicador

**Nota 4.** La colocación de la abertura de cero para mediciones de temperatura individual necesita ser determinada como la prueba de temperatura.

10.2. Si una temperatura dinámica se extiende, (tasa de calentamiento lineal o temperatura de rampa) y fuera requerida por el espécimen, entonces la colocación de la abertura debe ser corregida para la expansión termal del soporte de los accesorios durante la prueba.

10.2.1. Determine la expansión termal de los accesorios de las condiciones de la temperatura extendida para ser utilizadas durante la prueba. Anote la colocación de la lectura de la abertura al tiempo y temperatura correspondiente al calculo de la computadora de las propiedades viscoelásticas, mientras este manteniendo una fuerza normal entre los accesorios de la prueba.

10.2.2. Trace las separaciones de la lectura de la abertura, debido a expansión por calor de los accesorios, como una función de temperatura.

10.2.3. Levante la parte superior del accesorio con el fin de mantener la muestra al mismo espesor

10.3. Aplique una cantidad adecuada de material dentro del accesorio de prueba. Esté seguro que existe suficiente material para cubrir el fondo del plato uniformemente.

10.4. Baje el accesorio superior de la geometría para que esté tocando el material

**Nota 5.** Algunos instrumentos tienen un accesorio superior fijo de la geometría, por lo tanto requieren que el accesorio inferior pueda tener movimiento.

10.4.1. Una colocación de abertura de 1 a 3 milímetros es un buen rango de operación para platos paralelos geométricos. Esta colocación de abertura es arbitraria y depende del tipo de material que esté siendo probado. Una colocación de abertura de 0.5 milímetros será un mínimo. Sin embargo, cuando platos largos y materiales de baja viscosidad están siendo utilizados, la colocación mínima de abertura recomendada es de 0.25 milímetros.

**Nota 6.** La colocación de abertura para materiales conteniendo aditivos, debe ser diez veces el tamaño máximo de la partícula.

10.4.2. Experimentos de cono y plato deben ser probados a solamente a una temperatura. Algún cambio en la colocación requerirá colocar la abertura deseada al nuevo nivel de temperatura.

**Nota 7.** Cono y plato solamente pueden ser utilizados en asfaltos homogéneos.

10.4.3. Ajuste el accesorio a una abertura de 0.05 milímetros más ancha que la colocación final. Remueva el material en exceso del accesorio de la prueba utilizando una hoja de rasurar, espátula o cuchillo. Después baje el accesorio al final de la colocación de abertura, coloque la muestra a la temperatura de prueba y ajuste la abertura para tener un espesor constante del material.

10.5. Control de temperatura:

10.5.1. En casos en que el espécimen pueda ser introducido directamente dentro de la cámara de prueba a temperaturas elevadas, precaliente y establezca la cámara a la temperatura deseada.

10.5.2. Para hacer pruebas de temperaturas a 0° C o más bajo de 0° C, baje la temperatura a intervalos de 30° C, manteniendo la temperatura a cada intervalo por un mínimo de 5 minutos

10.5.3. Una temperatura condicionada a 0° C o más debe ser 60 ± 1 minuto a la temperatura de prueba más baja seleccionada. El control de la temperatura debe ser ± 1° C durante el tiempo condicionado y ± 0.1° C cuando las pruebas reológicas están siendo desarrolladas.

**Nota 8.** Algunos asfaltos pueden ser sensibles a temperaturas condicionadas, causando de este modo resultados de prueba irregulares cuando se este probando la temperatura dinámica de extensión

10.5.4. Después que la prueba a más baja temperatura sea terminada, cada temperatura de prueba de elevación adicional debe ser condicionada para 30 ± 1 minuto a la misma tolerancia establecida en el punto 10.5.3.

10.5.5. Temperaturas más altas de 0° C requieren 30 ± 1 minuto de acondicionamiento antes de comenzar la prueba.

10.6. La amplitud de tensión máxima debe ser dentro del rango de viscoelasticidad lineal del material. Una tensión de extensión automática puede servir para determinar la sensibilidad de la tensión del material.

10.7. Mediciones duplicadas son recomendadas.

## **11. CALCULO.**

11.1. Las ecuaciones siguientes en la Práctica D-4065 (ASTM) son utilizadas para calcular las propiedades de mediciones reológicas importantes en fuerza y oscilación dinámica no resonante

11.1.1. Módulo (elástico) acumulado, G'.

11.1.2. Disipación (viscosidad) de módulos  $G''$ ,

11.1.3. Tangente de Delta,  $\tan \delta$ .

11.1.4. Módulos compuesto,  $G^*$

11.1.5. Viscosidad compuesta,  $h^*$

11.1.6. Viscosidad dinámica,  $h', h''$ .

11.1.7. Angulo desfasado,  $\delta$ .

11.2. Trace el módulo de la tangente de delta y viscosidad como una función de cualquier frecuencia, amplitud de tensión, temperatura o tiempo.

## **12. REPORTE.**

12.1. Reporte la siguiente información:

12.1.1. Complete la identificación y descripción del material probado.

12.1.2. Descripción del instrumento utilizado para la prueba.

12.1.3. Dimensiones de la muestra de geometrías y tipo de herramienta.

12.1.4. Descripción del procedimiento de calibración.

12.1.5. Identificación de los controles isotérmicos.

12.1.6. La temperatura utilizada en el análisis.

12.1.7. Tabla de datos y resultados, incluyendo el módulo, viscosidad compuesta y tangente de delta como una función de la oscilación dinámica (frecuencia), porcentaje de tensión, temperatura o tiempo.

12.1.8. Número de especímenes probados.

12.1.9. Un trazo del comportamiento reológico contra múltiples estudios experimentales controlados independientes y variables.

12.1.10. Frecuencia de la prueba o tasa de frecuencia.

12.1.11. Amplitud de tensión o rango.

12.1.12. Fecha de prueba.

### **13. PRECISION Y RANGO.**

13.1 Un estado de precisión será desarrollado después de que una serie de evaluaciones de asfaltos típicos hayan sido probados.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**“ DIPLOMADO EN SISTEMAS DE CALIDAD  
EN INGENIERÍA DE PROYECTO  
Y CONSTRUCCIÓN ”**

**MODULO II**

**CONTROL DE CALIDAD DE MATERIALES Y OBRAS**

**PARTE 2**

**SUPERVISION Y CONTROL DE CALIDAD DE OBRAS**

**TEMA:**

**PROPIEDADES Y PRUEBAS DE ACEPTACION DE MATERIALES  
(MEZCLAS ASFALTICAS)**

**EXPOSITOR: ING. PEDRO GOMEZ COLIO  
1997**



# **DIPLOMADO EN SISTEMAS DE CALIDAD EN INGENIERIA DE PROYECTO Y CONSTRUCCION**

## **MODULO II**

CONTROL DE CALIDAD DE MATERIALES Y OBRAS

## **PARTE 2**

SUPERVISION Y CONTROL DE CALIDAD DE OBRAS

**INSTRUCTOR:** ING. PEDRO GOMEZ COLIO

## **TEMA**

### **PROPIEDADES Y PRUEBAS DE ACEPTACION DE MATERIALES**

Mezclas asfálticas: frías (productos asfálticos) y calientes (concreto asfáltico). Alquitrán de hulla.  
Escoria de fundición.

## **NOTAS DEL INSTRUCTOR**

- 1 Mezclas asfálticas
- 2 Alquitrán de hulla

Octubre de 1997

# MEZCLAS ASFÁLTICAS

SON PRODUCTOS QUE SE OBTIENEN MEDIANTE LA INCORPORACIÓN DE UN MATERIAL ASFÁLTICO (CEMENTO, REBAJADO O EMULSIÓN) A UN MATERIAL PÉTREO CON UNA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA DETERMINADA.

# DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

## **OBJETIVO.**

ESTABLECER LAS PROPORCIONES DE LOS MATERIALES QUE INTERVIENEN EN LA MEZCLA, CON OBJETO DE OBTENER LAS PROPIEDADES DE FUNCIONAMIENTO Y DURACIÓN ADECUADAS AL USO QUE SE LE PRETENDA DAR.

## **PROPIEDADES.**

ESTABILIDAD

RESISTENCIA AL INTEMPERISMO

RESISTENCIA AL DESGRANAMIENTO

FLEXIBILIDAD

INTEMPERISMO

TEXTURA

## **CLASIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS**

LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EMPLEADAS EN TRABAJOS DE PAVIMENTACIÓN, DE ACUERDO CON LAS CARACTERÍSTICAS DE ELABORACIÓN, SE PUEDEN CLASIFICAR EN:

### **MEZCLAS ELABORADAS EN CALIENTE.**

CONCRETOS ASFÁLTICOS.- SE HACEN EN CALIENTE, CON MATERIALES PÉTREOS BIEN GRADUADOS Y CEMENTO ASFÁLTICO, EN UNA PLANTA MEZCLADORA FIJA.

### **MEZCLAS ELABORADAS EN FRÍO.**

MEZCLAS ELABORADAS EN EL LUGAR DE LA OBRA.- SE HACEN EN FRÍO, CON MATERIALES GRADUADOS Y UN ASFÁLTO REBAJADO O UNA EMULSIÓN ASFÁLTICA, EN UNA PLANTA MEZCLADORA MÓVIL (SEMI-PORTÁTIL) O CON UNA MOTOCONFORMADORA.

EN ESTA CATEGORÍA PODEMOS INCLUIR LOS MORTEROS ASFÁLTICOS QUE SE HACEN CON UN MATERIAL PÉTREO GRADUADO Y UNA EMULSIÓN ASFÁLTICA, MEZCLADOS Y TENDIDOS CON EQUIPO ESPECIAL.

# UTILIZACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN TRABAJOS DE PAVIMENTACIÓN

CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO  
Y TRATAMIENTOS SUPERFICIALES.

CARPETAS

BASES ASFÁLTICAS

TRATAMIENTOS  
SUPERFICIALES

CAPA RENIVELADORA

SOBRECARPETA

SELLO

## **CONTENIDOS MÍNIMO Y ÓPTIMO DE ASFALTO**

EN LA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE ASFALTO PARA UNA MEZCLA ASFÁLTICA, SE ESTABLECEN DOS CONCEPTOS BÁSICOS: EL MÍNIMO REQUERIDO PARA CUBRIR LAS PARTÍCULAS DEL AGREGADO PÉTREO Y EL ÓPTIMO, QUE PERMITA LAS MEJORES POSIBILIDADES PARA EL USO DE LA MEZCLA.

### **MÉTODOS DE DISEÑO Y VERIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.**

- FORMULAS EMPIRICAS
- EQUIVALENTE DE QUEROSENO CENTRIFUGADO (CKE).
- COMPRESIÓN SIN CONFINAR
- MARSHALL
- HVEEM
- HUBBARD-FIELD
- ABRASIÓN EN HUMEDO (Morteros asfálticos)

## MÉTODOS DE DISEÑO Y VERIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

El diseño de las mezclas asfálticas tiene por objeto establecer las proporciones de los materiales que intervienen en la elaboración de las mismas, a fin de lograr en ellas ciertas propiedades que propicien condiciones de uso, funcionamiento y duración adecuadas; dichas propiedades, en términos generales, tenderán a lograr que la mezcla cuente con la estabilidad necesaria para soportar las cargas impuestas por el tránsito, resistir el intemperismo y no presentar desgranamientos bajo el efecto de la circulación de vehículos. Además, la capa construida con la mezcla tendrá la flexibilidad adecuada para adaptarse sin sufrir daño a las deformaciones permisibles en las capas del pavimento; en ciertos casos, también se procurará lograr que la textura y rugosidad de la capa sean adecuadas para el tránsito de vehículos, considerando siempre tener capas suficientemente impermeables.

Como las propiedades mencionadas se logran seleccionando y adaptando las características del material pétreo, a la vez que incorporando la proporción y tipo de material asfáltico adecuado, el diseño de una mezcla asfáltica, contemplará fundamentalmente el manejo de estos conceptos para encontrar la mejor y más económica combinación de los materiales seleccionados, considerándolo como proporción óptima de asfalto, aquella con la que se logran las condiciones mencionadas.

## CONSIDERACIONES GENERALES EN EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Para diseñar las mezclas asfálticas se debe establecer en forma preliminar la dosificación, tanto de los materiales pétreos como de éstos con los materiales asfálticos y preparar una mezcla inicial, con el fin de someterla a las pruebas correspondientes al criterio de diseño que se aplique.

En general el material pétreo para mezclas asfálticas está constituido en su mayor parte por grava, teniendo una menor proporción de arena y una cantidad mínima de finos no plásticos o "*filler*", cuyos porcentajes se hacen variar para obtener las propiedades requeridas en la mezcla asfáltica.

Aumentando el contenido de grava, se incrementa la estabilidad, necesitando un menor contenido de asfalto, lo cual reduce la flexibilidad de la mezcla, por el contrario, si lo que se busca es mayor flexibilidad en la mezcla, se aumentará la proporción de arena, necesitándose un mayor contenido de asfalto.

Ajustes semejantes se efectuarán inclusive durante la ejecución de la obra para conseguir que la mezcla se ajuste a los requisitos del proyecto.



# DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO EN EL PROYECTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS POR MEDIO DE FÓRMULAS EMPÍRICAS (DOS VARIANTES)

## APLICACIONES

Calcular en forma aproximada el contenido mínimo de asfalto necesario para cubrir las partículas del agregado pétreo en una mezcla con materiales graduados, dato necesario para verificar las pruebas de estabilidad.

Hacer correcciones en el contenido óptimo de asfalto durante el control de la elaboración de la mezcla, cuando se presentan variaciones apreciables en la composición granulométrica del agregado pétreo.

## VARIANTE UNO

Se aplica a materiales graduados que contienen finos; se basa en la estimación aproximada de la superficie total del agregado pétreo en función de su granulometría. Conocida el área total del agregado pétreo para un kilogramo de material se obtiene el contenido mínimo de asfalto multiplicando dicho valor por el índice asfáltico.

Para calcular la superficie total del agregado se emplean las constantes de área de la tabla 1. La determinación del porcentaje de asfalto se hará calculando los contenidos parciales para los tamaños indicados en dicha tabla, multiplicando el porcentaje de material de cada tamaño por la constante de área correspondiente y este producto a su vez se multiplicará por el índice asfáltico de la tabla 2 para cada una de las fracciones.

La suma de los contenidos parciales dará el contenido total de la muestra.

**TABLA 1**

MATERIAL		Constante de área, m <sup>2</sup> /kg.
Pasa malla	Se retiene en la malla	
37.50 mm (1 1/2")	19.00 mm (3/4")	00.27
19.00 mm (3/4")	4.75mm (Núm. 4)	00.41
4.75mm (Núm. 4)	0.425mm (Núm. 40)	02.05
0.425mm (Núm. 40)	0.075mm (Núm. 200)	15.38
0.075mm (Núm. 200)		53.30

**TABLA 2**

<b>MATERIAL</b>	<b>ÍNDICE ASFÁLTICO</b>
Gravas o arenas de río o materiales redondeados, de baja absorción	0.0055
Gravas angulosas o redondeadas, trituradas, de baja absorción	0.0060
Gravas angulosas o redondeadas, de alta absorción y rocas trituradas de absorción media	0.0070
Rocas trituradas de alta absorción	0.0080

**VARIANTE DOS**

Se aplica a materiales graduados que tienen pocos finos, con granulometría cercana al límite inferior de las especificaciones; se usa la siguiente fórmula:

$$A = 0.020 a + 0.045 b + cd$$

donde:

A es el contenido de asfalto (expresado como cemento asfáltico), referido al peso del agregado.

a es el por ciento de material retenido en la malla Núm. 10

b es el por ciento de material que pasa la malla Núm. 10 y se retiene en la malla Núm. 20

c es el por ciento de material que pasa la malla Núm. 200

d coeficiente asfáltico que varía con las características del material, tabla 3

**TABLA 3**

<b>MATERIAL</b>	<b>"d"</b>
Gravas y arenas de río o materiales redondeados, de baja absorción	0.15
Gravas trituradas, de baja absorción	0.20
Rocas trituradas de absorción media	0.30
Rocas trituradas de alta absorción	0.35

Cuando se utilice cemento asfáltico en la elaboración de la mezcla, el valor de A debe multiplicarse por 1.25

La corrección del contenido óptimo de asfalto para variaciones en la granulometría del agregado pétreo, se hace como sigue:

Se utilizan las constantes de las tablas 1 y 2 de la variante uno; dividiendo el contenido óptimo de asfalto determinado, entre la superficie total del agregado considerada para ese óptimo, se obtiene un valor promedio del índice asfáltico que será el que se utilice para calcular el nuevo contenido óptimo de asfalto.

## CÁLCULO DEL CONTENIDO MÍNIMO DE ASFALTO POR MEDIO DE FÓRMULAS EMPÍRICAS

**EJEMPLO.**- Suponga una mezcla de roca triturada de baja absorción, con arena de río para proporcionar los tamaños finos. Para simplificar el cálculo se puede considerar que la arena constituye todo el material que pasa la malla Núm. 4 y que los gruesos están constituidos en su totalidad por el material triturado. Los datos de la mezcla de materiales y de asfalto, son los siguientes:

MALLA NÚM.	% DE MATERIAL QUE PASA LA MALLA
19.05 mm	100
12.70 mm	76
09.52 mm	62
NÚM. 4	44
NÚM. 10	30
NÚM. 20	25
NÚM. 40	20
NÚM. 60	14
NÚM. 100	8
NÚM. 200	5

PVSS = 1450 kg/m<sup>3</sup>

FR-3 con 69 % en peso de residuo asfáltico y densidad de 0.94

tamaño del material	% en peso	constante de área	superficie parcial, en m <sup>2</sup> /kg.	Índice asfáltico, kg/m <sup>2</sup>	Contenido parcial de asfalto,
19.05 MM a Núm. 4	56	0.41	$\frac{56 \times 0.41}{100} = 0.23$	0.0060	$0.23 \times 0.0060 = 0.00138$
Núm. 4 a Núm. 40	24	2.05	$\frac{24 \times 2.05}{100} = 0.492$	0.0055	$0.492 \times 0.0055 = 0.00271$
Núm. 40 a Núm. 200	15	15.38	$\frac{15 \times 15.38}{100} = 2.307$	0.0055	$2.307 \times 0.0055 = 0.01269$
Pasa Núm. 200	5	53.30	$\frac{5 \times 53.3}{100} = 2.665$	0.0055	$2.665 \times 0.0055 = 0.01466$

**TOTAL 100**

**5.694**

**0.03144**

El contenido de cemento asfáltico es de 0.031 kg., de cemento asfáltico por cada kg de material pétreo, esto es, 3.1 % en peso.

Contenido de asfalto FR-3 =  $\frac{3.1}{0.69} = 4.49$  de FR-3 en peso.

Contenido de producto asfáltico en volumen

$$= \frac{4.49}{0.94} \times \frac{1450}{1000} = 6.9\% \text{ de FR-3 en peso.}$$

$$= 69 \text{ litros de FR-3 por m}^3 \text{ de agregado}$$

## EJEMPLO DE CORRECCIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO POR VARIACIONES EN LA GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO PÉTREO

El material que se utilizó en la determinación del contenido óptimo de asfalto, se compone de las siguientes fracciones:

MATERIAL QUE PASA LA MALLA	MATERIAL QUE SE RETIENE EN LA MALLA	% EN PESO
19.05 mm	NÚM.4	56
NÚM.4	NÚM.40	24
NÚM.40	NÚM.200	15
NÚM.200		5
		<b>100</b>

La superficie total del agregado fue de 5.694 m<sup>2</sup>/kg.

El contenido óptimo fue de 4.5 %

Se calcula el índice asfáltico promedio =  $0.045/5.694=0.0079$

Suponiendo que la nueva composición granulométrica es:

MATERIAL QUE PASA LA MALLA	MATERIAL QUE SE RETIENE EN LA MALLA	% EN PESO	NUEVA SUPERFICIE
19.05 mm	NÚM.4	50	0.205
NÚM.4	NÚM.40	20	0.410
NÚM.40	NÚM.200	18	2.768
NÚM.200		12	6.396
		<b>100</b>	<b>9.779</b>

La nueva superficie total será de 9.779 m<sup>2</sup>/kg. Y el nuevo contenido óptimo de asfalto será de:

$9.779 \times 0.0079 = 0.0773 = 7.73\%$  en peso de cemento asfáltico.

## **PRUEBA DE EQUIVALENTE DE QUEROSENO CENTRIFUGADO (CKE)**

Se lleva a cabo a partir del área superficial de las fracciones gruesa y fina del material pétreo o combinación de materiales seleccionados para la mezcla; así también, a partir de la obtención de un factor  $k$  que depende de la rugosidad y grado de porosidad de las partículas de material pétreo, evaluados mediante procedimientos de retención de queroseno y de aceite. Dichos parámetros se correlacionan gráficamente para obtener la proporción óptima de un asfalto rebajado con viscosidad especificada, pudiendo después ajustarse el resultado para otros materiales asfálticos.

### **PROCEDIMIENTO DE PRUEBA**

A una muestra de material pétreo, se le determina su composición granulométrica y se separan dos fracciones de mil quinientos (1,500 gr.) cada una; la que pasa la malla núm. 9.5 y retiene la 4.75 y la que pasa la malla últimamente mencionada, denominadas fracción gruesa y fracción fina respectivamente, se secan al horno a un temperatura de ciento cinco más menos cinco grados centígrados ( $105 \pm 5^\circ\text{C}$ ), hasta peso constante. De cada una de estas fracciones se toman mil (1,000) gramos para determinar el correspondiente peso específico relativo aparente. La parte restante de la fracción fina se utiliza en la determinación del retenido de queroseno y la de la fracción gruesa en la del retenido de aceite.

A cada uno de los dos vasos de centrifugado se le coloca su malla y papel filtro, se tara y se anota su peso con aproximación de cero punto un (0.1) gramo; se pesa en cada uno de ellos cien (100) gramos de la fracción seca que pasa la malla núm. 4.75 y en esas condiciones se colocan en un recipiente que contenga queroseno con una cantidad suficiente para que cubra las muestras, permaneciendo así durante treinta (30) minutos para que se sature.

Después de la saturación se instalan los vasos en la centrífuga y se someten durante dos (2) minutos a un fuerza centrífuga de cuatrocientas (400) veces la fuerza de la gravedad, determinada con la siguiente fórmula:

$$RPM_c = \sqrt{\frac{35\,600\,000}{R}}$$

donde:

$RPM_c$  es el número de revoluciones por minuto a que deben girar los vasos de centrifugado.

35 600 000 representa la aceleración a la que debe someterse la muestra para producir una aceleración de 400 veces la fuerza de la gravedad, en centímetros sobre segundo al cuadrado.

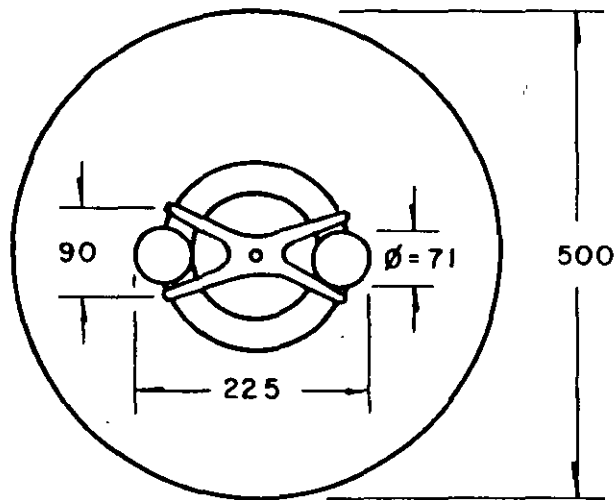
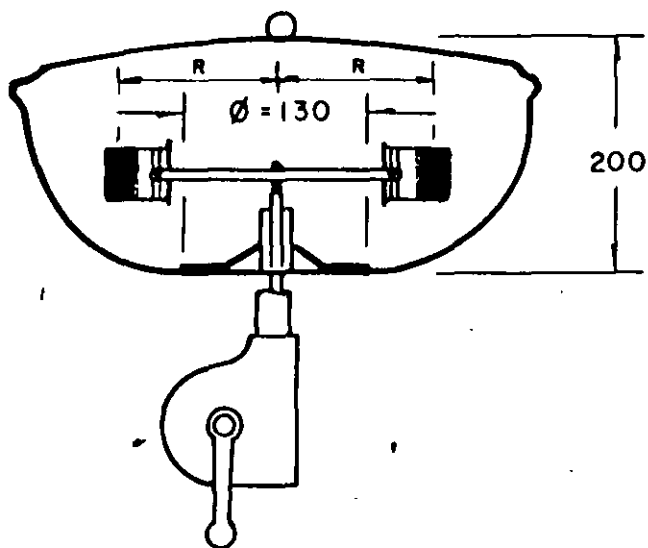
R radio de giro del centro de gravedad de la muestra, en cm.

Después del centrifugado se pesa cada uno de los vasos con su muestra y se determina el porcentaje de queroseno retenido, respecto al peso inicial y de no diferir significativamente los dos resultados, se reporta el promedio como equivalente de queroseno centrifugado (CKE), de lo contrario se repite el procedimiento.

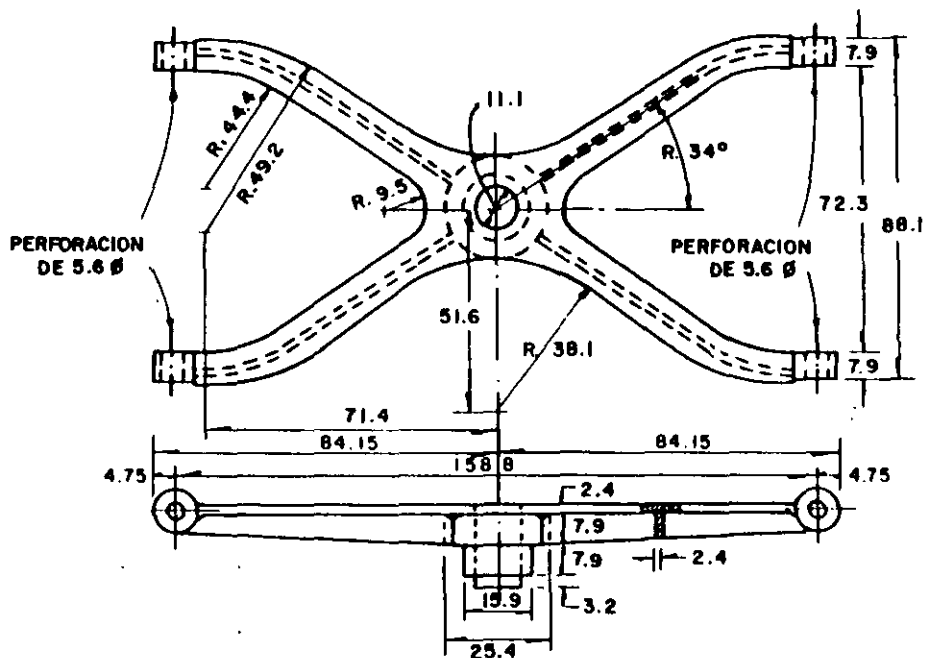
A continuación se coloca una muestra de cien (100) gramos de la fracción gruesa seca, en cada uno de los dos embudos y en esas condiciones se sumergen en los vasos de precipitado con aceite lubricante tipo **SAE - 10**, con una cantidad suficiente para que el material quede cubierto, permaneciendo así durante cinco (5) minutos a temperatura ambiente.

Después de dicho lapso se sacan los embudos con el material y se dejan escurrir durante dos (2) minutos cuidando que no se pierda material; a continuación, se meten al horno con las muestras, procurando que el escurrimiento prosiga durante quince (15) minutos, a una temperatura de sesenta (60°C) grados centígrados.

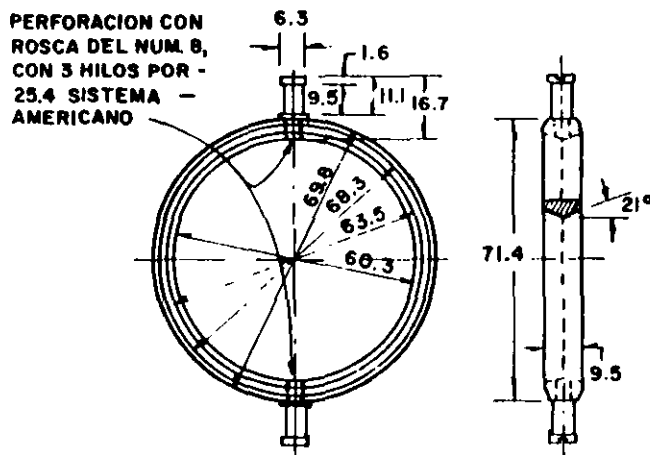
Se sacan los vasos con las muestras del horno y se vacían en charolas previamente taradas, se dejan enfriar a la temperatura ambiente y se pesan con aproximación de cero punto un (0.1) gramo. En seguida se determina el porcentaje de aceite retenido respecto al peso inicial de los agregados secos, de no existir discrepancia significativa se reporta



ESQUEMA DEL CENTRIFUGADOR



CRUCETA PARA SOPORTE DE LOS FRASCOS



ANILLO PORTAFRASCOS

DIMENSIONES EN MILIMETROS

TODAS LAS DIMENSIONES CON TOLERANCIA DE  $\pm 0.1$  mm EXCEPTO EN LAS QUE SE INDICA OTRA APROXIMACION.

MATERIAL DE CRUCETA Y ANILLO: FUNDICION DE BRONCE DURO.

EL PORTAFRASCOS DEBE ESTAR BALANCEADO

FIGURA NUM. 1 APARATO DE CENTRIFUGADO PARA LA PRUEBA DE EQUIVALENTE DE QUEROSENO.



el promedio como porcentaje de aceite retenido  $AR$ , de lo contrario se repite el procedimiento.

Los cálculos y reportes son los siguientes:

Si el peso específico relativo aparente de la fracción fina es diferente de dos punto sesenta y cinco ( $2.65 \pm 0.05$ ) se corrige el valor promedio del equivalente de queroseno centrifugado  $EKC$ , mediante la siguiente fórmula:

$$EKC_C = EKC S_{df} / 2.65$$

donde:

$EKC_C$  equivalente de queroseno centrifugado, corregido por el peso específico relativo aparente de la fracción fina.

$EKC$  equivalente de queroseno centrifugado de la fracción fina.

$S_{df}$  densidad o peso específico relativo aparente de la fracción fina.

2.65 peso específico relativo aparente considerado para la fracción fina.

Se calcula el área superficial del material pétreo a partir de su composición granulométrica, por medio de la siguiente fórmula:

$$A = \sum (P F_a)$$

donde:

$A$  es el área superficial del material pétreo considerado, en metros cuadrados por kilogramo.

$P$  es el porcentaje en peso de cada uno de los retenidos parciales del material pétreo, en sus respectivas mallas.

$F_a$  es el área superficial que corresponde a cada fracción comprendida entre las mallas, como se indica a continuación:

MATERIAL		ÁREA SUPERFICIAL DE LOS RETENIDOS PARCIA- LES EN m <sup>2</sup> /kg.
PASA MALLA NÚM.	RETIENE MALLA NÚM.	
19.000	9.500	00.20
09.500	4.750	00.41
04.750	2.360	00.82
02.360	1.180	01.64
01.180	0.600	03.28
00.600	0.300	06.15
00.300	0.150	12.30
00.150	0.075	24.58
00.075		53.30

Se determina la constante de superficie "Kf" para la fracción fina, utilizando la gráfica de la figura 2 a partir del equivalente de queroseno EKC corregido y en función del área superficial del material pétreo, así como del porcentaje de material que pasa la malla núm. 4.75

Si el peso específico relativo aparente de la fracción gruesa es diferente de dos punto sesenta y cinco más menos cero punto cero cinco ( $2.65 \pm 0.05$ ) se corrige el valor promedio del porcentaje de aceite retenido AR, mediante la siguiente fórmula:

$$AR_C = AR S_{dg} / 2.65$$

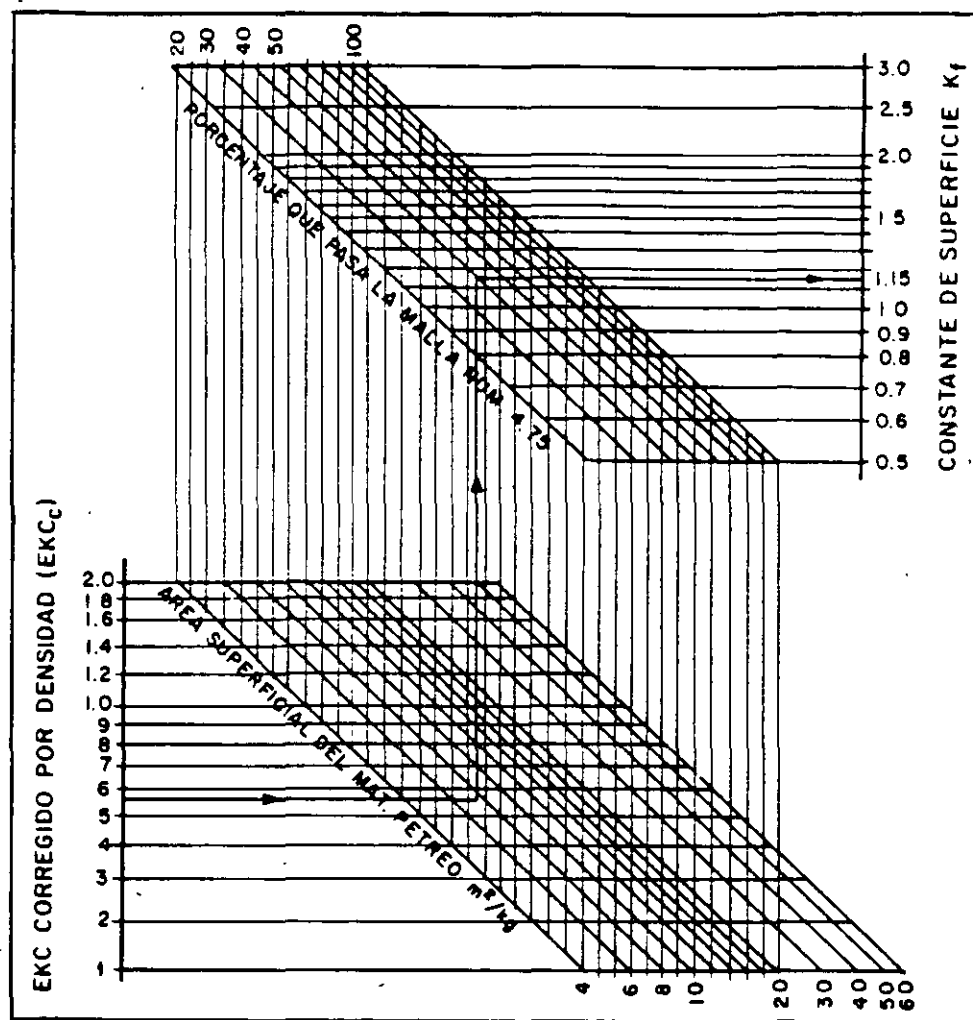


FIGURA NUM. 2 GRAFICA PARA DETERMINAR LA CONSTANTE DE SUPERFICIE  $K_f$ , DE LA FRACCION FINA, EN LA PRUEBA DE EQUIVALENTE DE QUEROSENO.

donde:

$AR_c$  proporción de aceite retenido corregida por densidad de la fracción gruesa, en por ciento.

$AR$  proporción de aceite retenido por la fracción gruesa, en por ciento.

$S_{dg}$  peso específico relativo aparente de la fracción gruesa.

2.65 peso específico relativo aparente considerado para la fracción gruesa.

Se obtiene la constante de superficie  $K_g$  para la fracción gruesa, utilizando la gráfica de la figura núm. 3 a partir del porcentaje de aceite retenido corregido.

Se calcula el peso específico relativo aparente promedio del material pétreo, mediante la siguiente fórmula.

$$S_{dp} = \frac{100}{\frac{G}{S_{dg}} + \frac{F}{S_{df}}}$$

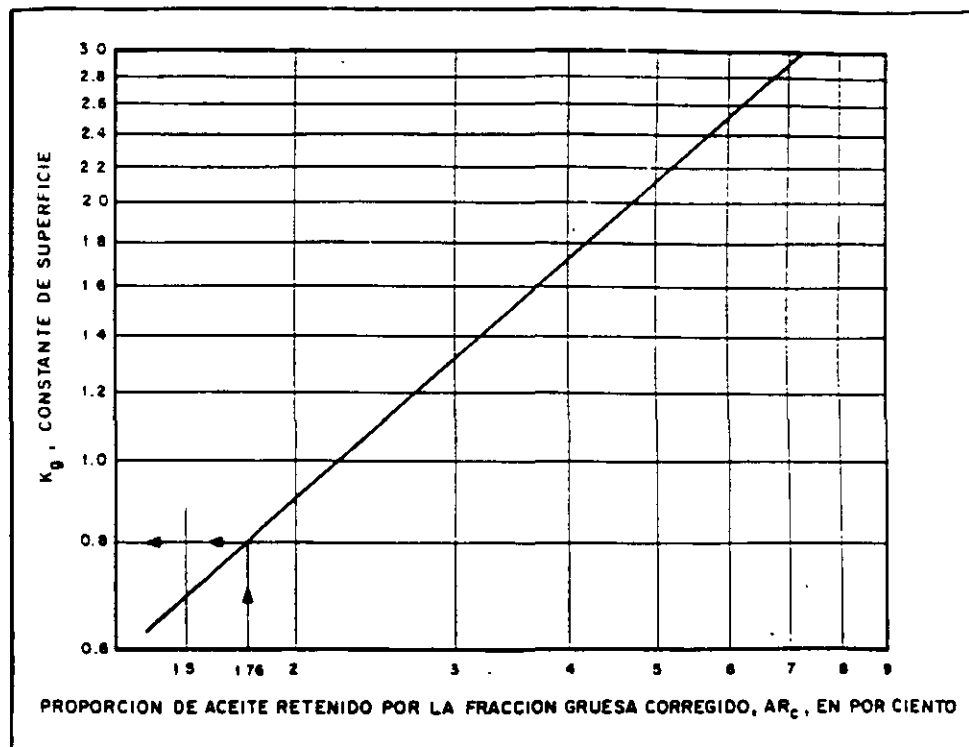
donde:

$S_{dp}$  peso específico relativo aparente promedio del material pétreo.

$G$  es la proporción en peso de la fracción gruesa con respecto al material pétreo, en por ciento.

$S_{df}$  peso específico relativo aparente de la fracción gruesa.

$F$  es la proporción en peso de la fracción fina con respecto al material pétreo, en por ciento.



**FIGURA NUM. 3 GRAFICA PARA CALCULAR LA CONSTANTE DE SUPERFICIE  $K_g$  DE LA FRACCION GRUESA EN LA PRUEBA DE EQUIVALENTE DE QUEROSENO.**

$S_{dt}$  es el peso específico relativo aparente de la fracción fina.

Se obtiene la constante de superficie,  $K_m$ , para la combinación de las fracciones gruesa y fina mediante la siguiente fórmula:

$$K_m = K_f + K_{fc}$$

donde:

$K_m$  es la constante de superficie del material pétreo integrado con sus fracciones fina y gruesa.

$K_f$  es la constante de superficie para la fracción fina.

$K_{fc}$  es la corrección a la constante de superficie de la fracción fina, determinada con la gráfica de la figura núm. 4

el valor de la constante  $K_{fc}$  se determina en función del área superficial del material, del porcentaje en peso de la fracción gruesa con respecto al material pétreo y de la diferencia  $K_g - K_f$ , siendo el signo de esta diferencia el mismo que se da en la corrección  $K_{fc}$  y cuando el valor de  $K_{fc}$  es inferior a 0.05 no se aplica ninguna corrección a  $K_f$ , siendo en este caso el valor de  $K_m$  igual al de  $K_f$ .

De la gráfica de la figura núm. 5 y a partir del área superficial del material pétreo y tomando en cuenta el peso específico relativo aparente promedio  $S_{dp}$  del material pétreo, así como en función de la constante de superficie  $K_m$ , se obtiene el contenido óptimo aproximado de asfalto rebajado de fraguado medio o rápido, del grado dos (2), en por ciento.

Cuando se trate de cemento asfáltico o algún otro rebajado diferente de los indicados, se corrige la proporción óptima de asfalto mediante la gráfica de la figura núm. 6, como sigue: a partir del área superficial del material pétreo y del grado del rebajado o de la penetración del cemento asfáltico que se utilice, se determina un punto en la escala auxiliar C que unido con el punto de la escala D correspondiente al contenido óptimo de

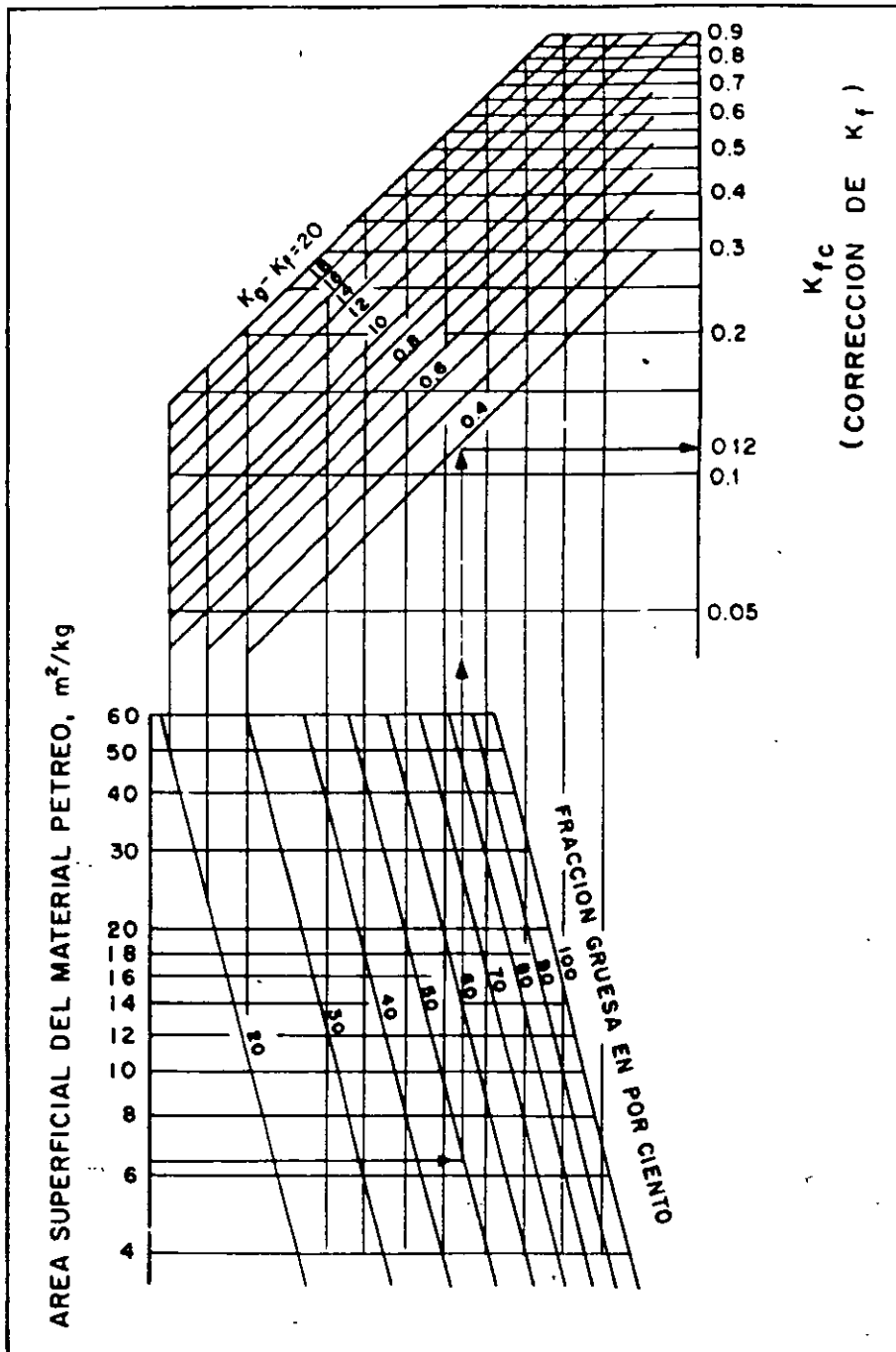


FIGURA NUM.- 4 GRAFICA PARA DETERMINAR LA CORRECCION DE  $K_f$ , PARA CALCULAR LA CONSTANTE DE SUPERFICIE  $K_m$ , DEL MATERIAL PETREO.

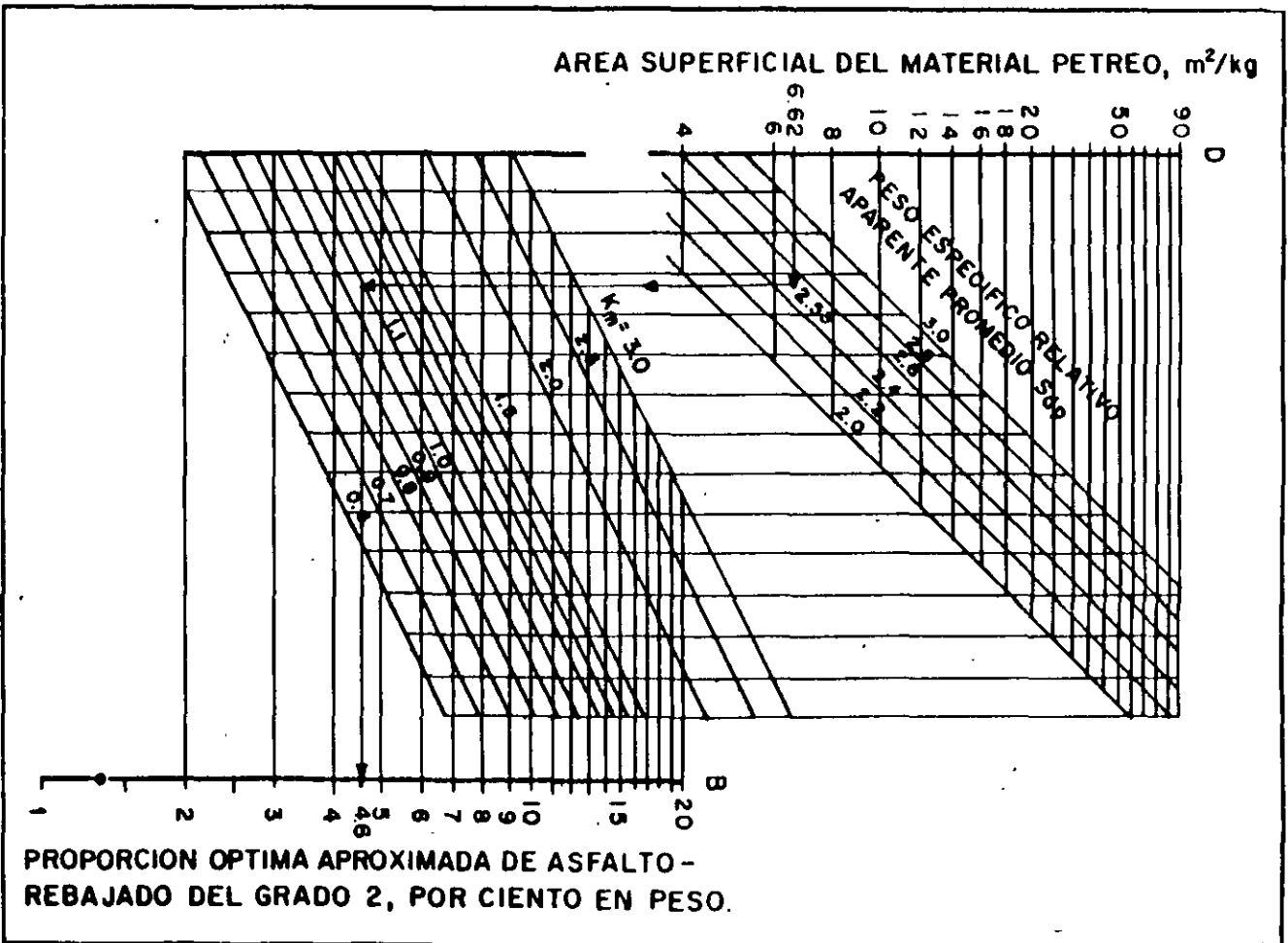


FIGURA NUM. 5 GRAFICA PARA DETERMINAR EL POR CIENTO DE ASFALTO REBAJADO FM2 O FR2.



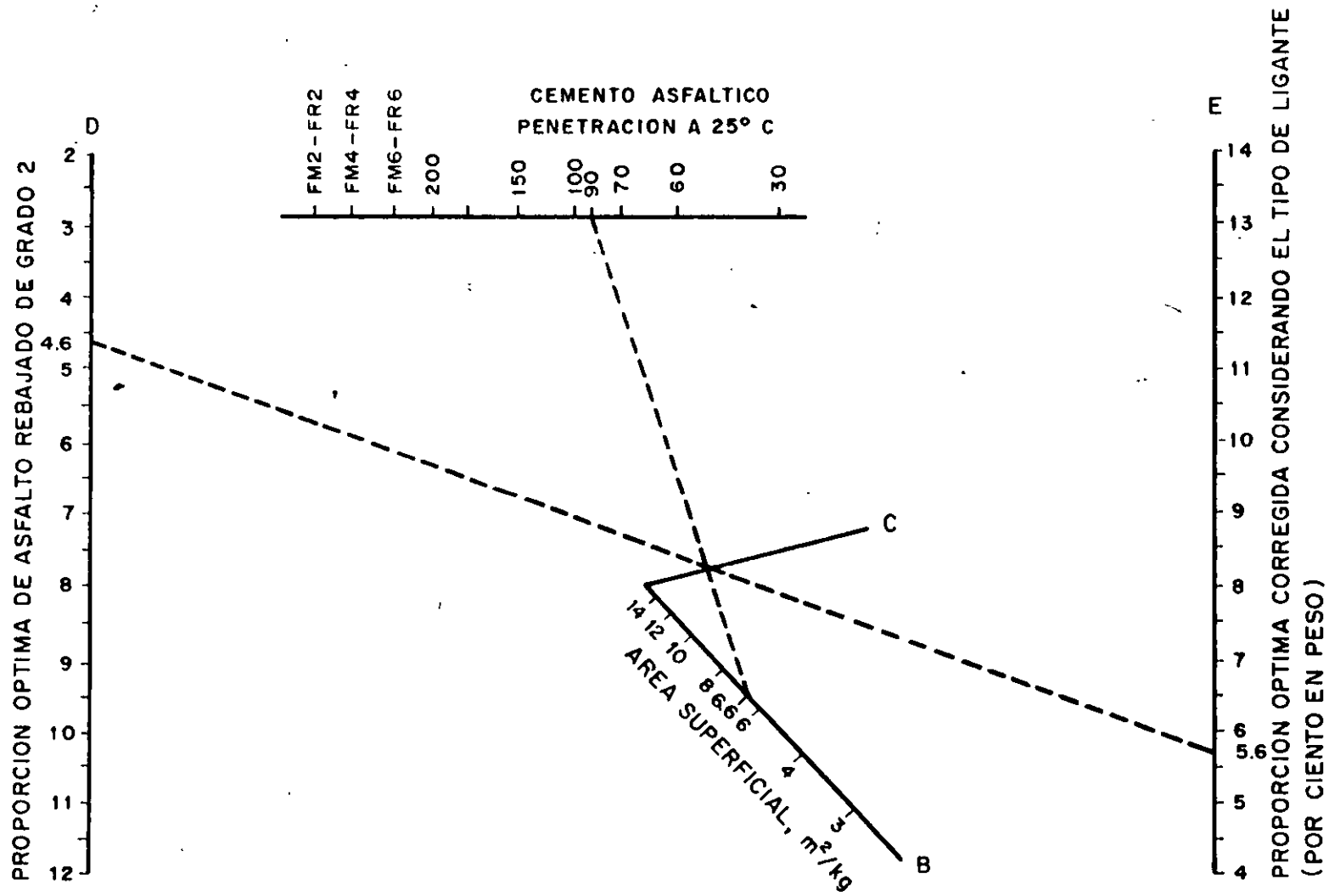


FIGURA NUM. 6 GRAFICA PARA CORREGIR LA PROPORCION OPTIMA DE ASFALTO - CONSIDERANDO LA CONSISTENCIA DEL TIPO DE LIGANTE SELECCIONADO.

asfalto rebajado de grado dos (2), define en la escala E el contenido óptimo corregido para el material asfáltico seleccionado; esta será la que se aplique para elaborar la mezcla asfáltica.

Cuando se requiera determinar la proporción óptima aproximada de material asfáltico para una mezcla que se elabore con emulsión y no obstante que de acuerdo con el uso de dicha mezcla su proporción óptima de asfalto sea relativamente variada, se podrá aplicar el procedimiento de equivalente de queroseno centrifugado, excepto que la determinación de la proporción óptima corregida de emulsión asfáltica, se efectúa a partir del porcentaje de rebajado asfáltico tipo dos (2), obtenido con el EKC y multiplicando este valor por uno punto uno (1.1). Este resultado se ajustará de acuerdo con las restricciones que imponga el uso de la mezcla

## **DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO POR PRUEBAS DE COMPRESIÓN AXIAL Y DE COMPRESIÓN DIAMETRAL**

Este método considera la elaboración de especímenes de prueba utilizando mezclas preparadas con diferentes contenidos de material pétreo y de producto asfáltico, las cuales se compactarán con carga estática, dándoles previamente un acomodo para disminuir la influencia de la forma de las partículas del material pétreo; un grupo de los especímenes se someterá a la acción de cargas axiales y otro a la de cargas diametrales, hasta alcanzar la falla, en ambos casos se harán determinaciones con especímenes en seco y saturados. Con los pesos específicos, resistencia a la compresión axial, deformación final, resistencia a la compresión diametral y en algunos casos por ciento de vacíos, se definirá gráficamente la proporción óptima de asfalto con la cual se logre en los especímenes la mejor combinación de dichas características

Este procedimiento no se aplicará a mezclas que contengan menos del 10% de partículas de material pétreo pasando la malla Núm. 2, consideradas de textura abierta, ni a las que se elaboren con cemento asfáltico, limitándose su aplicación al caso de mezclas con más de 12% de partículas retenidas en la malla Núm. 25 y que pasen la Núm. 37.5.

### **PROCEDIMIENTO DE PRUEBA**

En primer lugar, se determinan el peso específico relativo aparente del material pétreo por inmersión en cemento asfáltico y el peso específico relativo del residuo asfáltico. Se determina el peso del material pétreo que pasa la malla Núm. 25, necesario para elaborar cada una de las ocho mezclas de prueba que se preparan por cada contenido de asfalto, para lo cual se tomará en cuenta el peso volumétrico de la mezcla determinado con un espécimen preliminar, los especímenes se elaborarán con una relación altura/diámetro de 1.25.

La proporción de asfalto de cada uno de los contenidos que como mínimo se estudiarán son:

- Contenido óptimo aproximado, - 1.0%.
- Contenido óptimo aproximado, - 0.5%
- Contenido óptimo aproximado.
- Contenido óptimo aproximado, + 0.5%
- Contenido óptimo aproximado, + 1.0%
- Contenido óptimo aproximado, + 1.5%
- Contenido óptimo aproximado, + 2.0%

Se elabora una de las ocho mezclas que corresponde a uno de los contenidos de material asfáltico y considerando solo la fracción de material que pasa la malla Núm. 25, se toma el peso del material pétreo y se calientan los materiales pétreos y asfálticos a 50°C, excepto cuando se utilizan emulsiones asfálticas.

Se revuelven las mezclas así preparadas, manteniéndolas a la temperatura indicada hasta completar su curado, el cual se controla verificando su peso a intervalos no mayores de 10 minutos debiendo ser más cortos a medida que la mezcla se acerca a su peso final  $P_f$ , o sea el que tiene cuando pierde la cantidad de solventes,  $P_{se}$ , previamente establecida; esta última se determina mediante la siguiente fórmula:

$$P_{se} = P_s - K P_c$$

donde:

- $P_{se}$  es el peso de los solventes que se eliminan de la mezcla durante su elaboración, previamente a su compactación, en gramos.
- $P_s$  es el peso de los solventes que inicialmente contiene el producto asfáltico, en gramos.
- $P_c$  es el peso del residuo asfáltico que contiene el producto utilizado, en gramos.
- $K$  es la relación en peso de solventes con respecto al residuo asfáltico en la mezcla fijada para su compactación; es adimensional y en general será de 0.08, debiendo establecerse para cada estudio

A continuación se determina el peso final de la mezcla asfáltica curada más la tara  $P_{ft}$ , mediante la siguiente fórmula:

$$P_{ft} = P_p + P_t + P_a - P_{se}$$

donde:

$P_{ft}$  es el peso final de la mezcla de prueba ya curada, más la tara, en gramos.

$P_p$  es el peso de la muestra de material pétreo seco, en gramos

$P_t$  es el peso de la tara, en gramos.

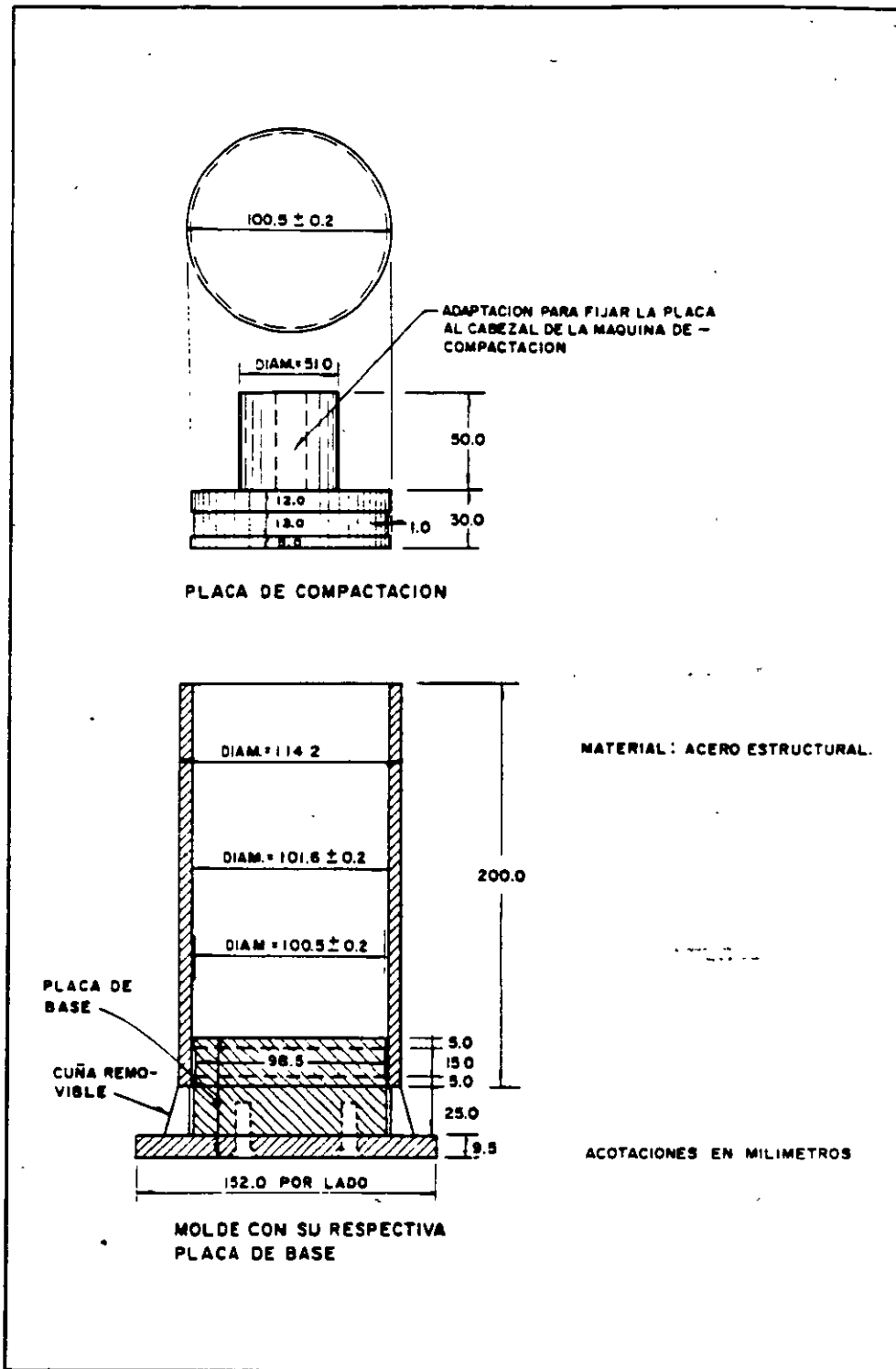
$P_a$  es el peso del material asfáltico utilizado para elaborar la mezcla de prueba, en gramos.

$P_{se}$  es el peso de los solventes que se eliminan de la mezcla durante su elaboración y curado, en gramos.

El curado de las mezclas elaboradas con emulsiones asfálticas se efectuará remezclándolas hasta que claramente se inicie el rompimiento de la emulsión sin provocar que se desprenda del agregado pétreo; al ocurrir el rompimiento se escurrirá el agua remanente, siendo este el punto en que se compactará la mezcla, seleccionando para ello la humedad y estado de rompimiento que proporcione los mayores pesos volumétricos.

Con la placa de base, la placa de compactación y el molde de prueba limpios y a la temperatura de 50°C, se arma el conjunto que debe quedar nivelado sobre una superficie firme, en el caso de mezclas con emulsión no será necesario calentar el equipo.

Después de curada la mezcla se deposita en el molde en dos capas, dándole un acomodo inicial mediante 20 penetraciones con la varilla, repartidas simétricamente. A continuación, para formar el espécimen de prueba, se compacta la mezcla contenida en el molde, aplicándole por medio de la máquina de compresión una carga inicial de 25 kg/cm<sup>2</sup>; realizado lo anterior, se libera dicha carga y se remueven las calzas en que se apoya el molde; en seguida se aplica carga en forma lenta y uniforme hasta alcanzar en



**FIGURA NUM.- MOLDE Y PLACA DE COMPACTACION PARA LA PRUEBA DE COMPRESION SIN CONFINAR EN MEZCLAS ASFALTICAS.**

5 minutos la carga de compactación correspondiente a la presión de  $100 \text{ kg/cm}^2$ , que se sostiene durante dos minutos, después de lo cual se libera.

Se retira de la máquina de compresión el molde con el espécimen, se remueve la placa de base y se dejan a la temperatura ambiente hasta que el espécimen adquiera la consistencia que permita ser extraído sin que sufra daño; en el caso de mezclas con emulsión asfáltica el período será de 3 días manteniendo los moldes en posición horizontal para facilitar el drenado.

Después del período de reposo se extrae el espécimen del molde y se mide con aproximación de un milímetro y se anota el promedio en la hoja de registro, verificando su relación altura/diámetro que debe ser de 1.25, aproximadamente. Así se continúa la elaboración de especímenes hasta completar los 8 de cada contenido considerado en el estudio, cuidando de hacer los ajustes necesarios para que la altura de los especímenes sea uniforme; tratándose de mezclas del mismo estudio, en los diferentes contenidos de asfalto, respecto a la altura de todos no debe haber diferencias de más de 5 milímetros, los que no cumplan con este requisito se desecharán y se sustituirán por nuevos especímenes que si cumplan.

Se determina el peso volumétrico de cada uno de los especímenes de cada contenido de asfalto mediante el peso sumergido, separando los valores correspondientes a cada contenido de asfalto. Con los 8 especímenes de cada contenido de asfalto se forman 2 grupos, uno para mantenerlo de 16 a 24 horas a la temperatura ambiente y después se colocan en baño de aire o en ambiente a la temperatura de  $25 \pm 0.5^\circ \text{ C}$ , durante 2 horas antes de probarlos; el segundo grupo se conservan de 16 a 24 horas, a la temperatura ambiente y después durante 4 días inmersos en un baño de agua a  $25 \pm 0.5^\circ \text{ C}$ .

Dos de los especímenes del primer grupo se prueban a la compresión simple aplicándole una carga inicial de 10 kg. ; se instala el extensómetro y se ajusta a cero, después se somete a la prueba de compresión axial, aplicándole carga a una velocidad uniforme para obtener una deformación vertical de 50.0 mm/min hasta alcanzar la mayor carga que resista el espécimen la que se registra como  $P_a$ , en kg. Al presentarse dicha carga se lee el extensómetro y se anota en la hoja de registro como valor del flujo  $d_a$ , en mm.

El tercero y cuarto de los especímenes del primer grupo se somete a la prueba brasileña o de compresión diametral con registro de flujo vertical, colocando el espécimen en la platina de la máquina de compresión y montando el extensómetro para la determinación del flujo; al espécimen así instalado se le aplica carga uniforme a lo largo de dos de sus generatrices unidas por un mismo diámetro y a una velocidad constante de deformación vertical de 50.0 mm/min hasta alcanzar la carga de ruptura que se registra como  $P_a$ , en kg; al alcanzar dicha carga se toma la lectura del extensómetro y se anota como valor de flujo "d", en mm, con aproximación de 0.1 mm. Se hace notar que en todos los casos se utiliza las cuatro placas para guiar y centrar la carga y las dos tiras de distribución de la misma. Al cuarto espécimen después de la prueba se le determina el contenido de cemento asfáltico.

Del segundo grupo de especímenes se toman sucesivamente dos y se dejan escurrir el tiempo indispensable para que no mojen el equipo, lapso que no será mayor de 5 minutos; después se someten sucesivamente a la prueba de compresión axial con medición del flujo vertical como ya se describió anteriormente. Los dos especímenes restantes de este segundo grupo se dejan escurrir y también se someten a la prueba de compresión diametral con medición de flujo como ya fue descrito.

## CÁLCULO Y REPORTE

Los pesos volumétricos de todos los especímenes con un mismo contenido de asfalto se promedian, desechando aquellos que discrepen en forma significativa y el resultado se anota con aproximación de  $10 \text{ kg/m}^3$ .

La resistencia a la compresión axial de cada uno de los especímenes de prueba de ambos grupos tanto los ensayados en húmedo como en seco de los diferentes contenidos de asfalto se calcula con la siguiente fórmula:

$$R_c = \frac{P_a}{A_s}$$



donde:

$R_c$  es la resistencia a la compresión axial en  $\text{kg/cm}^2$

$P_a$  es la carga axial máxima que se registra al inicio de la falla, en kg

$A_s$  es el área de la sección transversal del espécimen calculada con su diámetro promedio, con aproximación de  $0.1 \text{ cm}^2$

Los valores de resistencia de los dos especímenes de cada grupo se promedian y registran, por una parte los ensayados en seco y por otra los probados en húmedo de cada contenido de asfalto.

El valor de resistencia a la tensión por compresión diametral de cada uno de los especímenes tanto de los probados en seco como de los probados en húmedo de los diferentes contenidos de asfalto se calcula con la siguiente fórmula:

$$R_d = \frac{P_d}{Dh}$$

donde:

$R_d$  es el valor de la resistencia a la tensión por compresión diametral, en  $\text{kg/cm}^2$

$P_d$  es la carga máxima aplicada diametralmente, en kg

$D$  es el diámetro promedio del espécimen en cm, con aproximación de 0.1 cm

$h$  es la altura promedio del espécimen en cm, con aproximación de 0.1 cm

Se promedian y registran los valores de resistencia a la tensión por compresión diametral de los dos especímenes de prueba de cada grupo, por una parte los ensayados en seco y por la otra los probados en húmedo, de cada contenido de asfalto.

Se promedian y registran los valores de flujo  $d_a$  de los dos de cada grupo probados a la compresión axial, por una parte los ensayados en húmedo y por la otra los probados en seco, de cada contenido de asfalto.

Se promedian y registran los valores de flujo  $d$ , de los dos especímenes de cada grupo probados a la compresión diametral, por una parte los ensayados en húmedo y la otra los probados en seco, de cada contenido de asfalto.

Se calcula el porcentaje de vacíos de la mezcla compactada de todos los especímenes elaborados con un mismo contenido de asfalto, determinando los pesos volumétricos, el porcentaje de vacíos de la mezcla compactada correspondiente a cada contenido de asfalto y se anotan en la hoja de registro.

Con los datos de peso volumétrico, de resistencia, de flujo y porcentaje de vacíos y los correspondientes contenidos de asfalto expresados como por ciento en peso, con relación al del material pétreo de los especímenes respectivos, se dibujan las gráficas del por ciento de cemento asfáltico, contra cada uno de los siguientes conceptos: peso volumétrico, resistencia a la compresión axial en seco, resistencia a la compresión axial en húmedo, resistencia a la compresión diametral en seco, resistencia a la compresión diametral en húmedo; así como contra flujo de especímenes en seco, flujo de especímenes en húmedo y porcentaje de vacíos.

Del análisis de todas estas gráficas se deduce la proporción óptima de asfalto que permita el mayor peso volumétrico, las mayores resistencias y el flujo aceptable, siendo

en todo caso el por ciento de asfalto recomendado, aquél con el cual se logre más ventajas en todos los aspectos señalados.

### **PRECAUCIONES QUE SE DEBEN TOMAR EN ESTA PRUEBA**

Extraer cuidadosamente los especímenes de los moldes para evitar que sufran distorsiones o disgregaciones.

Cuando no sea posible efectuar a los especímenes las pruebas en seco, durante las 24 horas siguientes a su elaboración, se colocarán en recipientes herméticos para protegerlos.

Verificar que los especímenes tengan la misma temperatura en el momento de ser sometidos a la prueba de carga.

## DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO POR EL MÉTODO DE MARSHALL

Este método se aplica para el proyecto y control de mezclas elaboradas utilizando materiales pétreos con tamaño máximo de 25 mm y cemento asfáltico en caliente; también se puede aplicar cuando se usen asfaltos rebajados o emulsiones asfálticas; el procedimiento consiste fundamentalmente en elaborar especímenes cilíndricos a los que se les determina su peso volumétrico, porcentaje de vacíos, estabilidad en sentido diametral y deformación al alcanzarse la máxima resistencia; estas dos últimas determinaciones se pueden hacer bajo condiciones de humedad y de temperatura desfavorables.

A las mezclas elaboradas con asfaltos rebajados o con emulsiones también se les determina la influencia del agua en su comportamiento.

El valor de estabilidad es un índice de la resistencia estructural de la mezcla asfáltica compactada y el flujo es un indicador de su flexibilidad y pérdida de resistencia a la deformación.

Para el diseño de mezclas asfálticas se elaboran especímenes con diferentes porcentajes de asfalto, a fin de conocer cuales son los que proporcionan condiciones favorables y de ellos seleccionar el contenido óptimo de asfalto o el más conveniente para el material pétreo estudiado.

Para verificar la mezcla asfáltica producida en la obra se comparan las características de granulometría, contenido de asfalto y peso volumétrico de la mezcla compactada y cuando haya discrepancias entre los datos mencionados se elaboran especímenes con la mezcla producida en la obra y se les determina su estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos para verificar esas características con las de proyecto.

## PROCEDIMIENTO DE PRUEBA

Se determina el peso específico relativo aparente del material pétreo por inmersión en cemento asfáltico; así también el del cemento asfáltico el cual será corregido tanto en el caso de rebajados como en el caso de emulsiones mediante las gráficas de peso específico - residuo asfáltico, tomando en cuenta los solventes y el agua que contenga el producto bajo las condiciones de compactación.

Deben obtenerse las temperaturas de mezclado del cemento asfáltico o rebajado y del material pétreo; para los primeros la temperatura mencionada es aquella a la que tengan una viscosidad Saybolt - Furol de  $85 \pm 10$  segundos y para el material pétreo, es esta misma temperatura más  $10^{\circ}\text{C}$ . Cuando se utilicen emulsiones el material pétreo no se calentará y en cambio se le adicionará una humedad similar a la de absorción, de tal manera que se obtenga el mejor cubrimiento. También se determinará la temperatura de compactación de la mezcla que será aquella a la cual el material asfáltico tenga una viscosidad Saybolt - Furol de  $140 \pm 15$  segundos; esta temperatura también se puede determinar de la gráfica viscosidad - temperatura del asfalto o producto utilizado.

La cantidad de material pétreo para cada mezcla será la necesaria para que el espécimen tenga una altura aproximada de 63.5 mm (aproximadamente 1,100 gramos de material pétreo) y las proporciones de asfalto se definirán con base en el contenido mínimo determinado mediante fórmulas empíricas variando los contenidos con incrementos de 0.5% desde el contenido mínimo - 1.0% hasta el contenido mínimo + 2.0%.

Durante la operación de mezclado se mantendrá la temperatura de compactación antes mencionada pudiendo aplicar calor durante esta etapa y en el caso de asfaltos rebajados se tendrá una relación de solvente a cemento asfáltico (valor de K) de 0.8 para rebajados de fraguado rápido y de 0.12 para rebajados de fraguado medio. Cuando se trate de mezclas elaboradas con emulsión, se mezclarán lo suficiente para homogeneizarlas, verificando el peso de la mezcla a fin de que por decantación y evaporación sucesiva se elimine el 80% aproximadamente del agua y solventes; la

humedad que conserve la mezcla será cercana a la óptima de compactación y se definirá dibujando la curva del peso volumétrico de la mezcla contra su humedad.

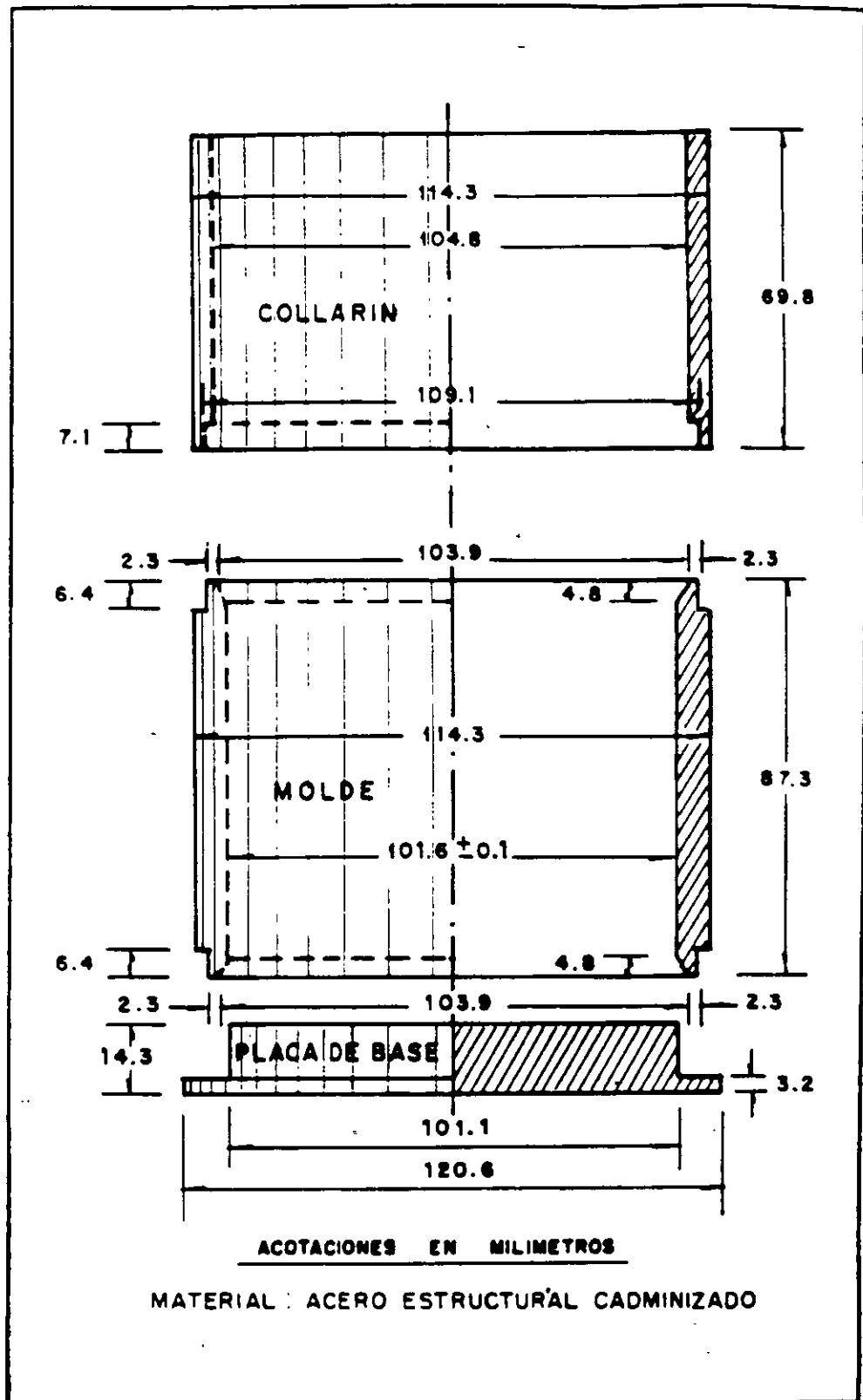
El conjunto de placa de compactación, pisón y los moldes completos, la espátula y placa de base se calientan a 90°C en un baño con agua a dicha temperatura.

Con la mezcla de prueba preparada y a la temperatura de compactación (normalmente entre 120 y 150°C), se saca del baño un molde, se seca y arma poniendo en el fondo una hoja de papel filtro circular y se vacía la mezcla dentro del molde, acomodándola con la espátula (introduciéndola quince veces en la parte perimetral y diez en la parte central, para acomodarla sin que se clasifique); por último se acomoda la parte superior de la mezcla procurando una superficie ligeramente abombada y colocando otra hoja de papel filtro. A continuación se monta el molde sobre el pedestal y se compacta aplicando 50 golpes de pisón o bien 75 golpes dependiendo de lo que especifique el proyecto para el tipo de tránsito considerado. La altura de caída del martillo es de 457 mm.

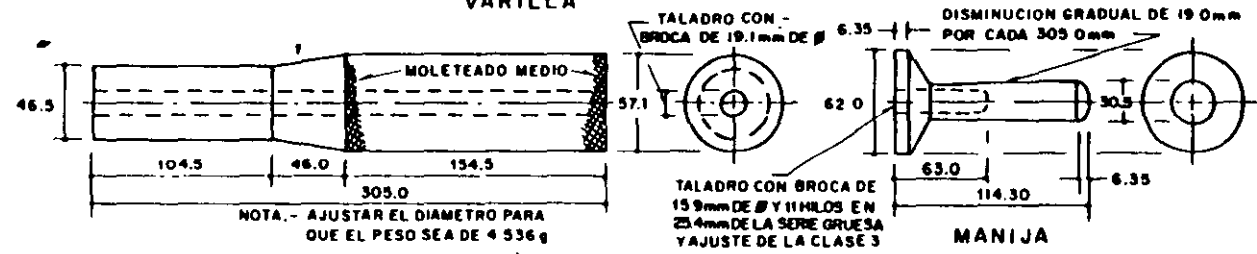
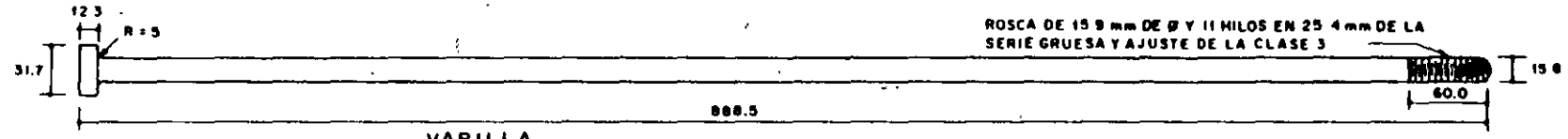
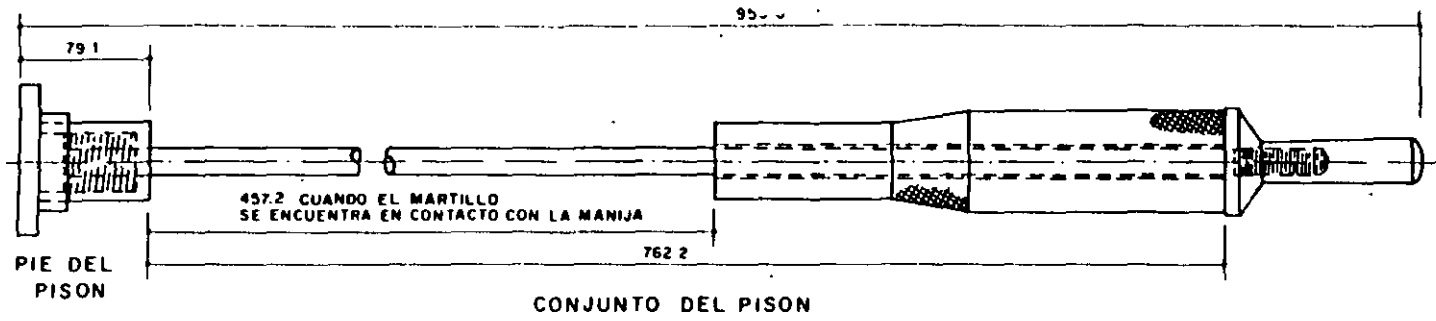
Una vez aplicada esta compactación se invierte el molde con el espécimen y se vuelven a colocar sus dispositivos para aplicar a la otra cara del espécimen el mismo número de golpes que en la primera cara.

El espécimen dentro del molde se deja enfriar a la temperatura ambiente para que al ser extraído no sufra deformaciones y se mantiene en reposo a la temperatura ambiente durante aproximadamente 24 horas; después del periodo de enfriamiento se determina el peso volumétrico de cada espécimen y antes de la prueba todos los especímenes se sumergen de 30 a 40 minutos en un baño de agua a  $60 \pm 1^\circ\text{C}$ , excepto en el caso de las mezclas elaboradas con asfaltos rebajados o emulsiones, en que los especímenes antes de ser probados se mantienen a una temperatura ambiental de  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  durante 2 horas.

La determinación de estabilidad y de flujo se iniciará a los 30 minutos de inmersión debiendo sacar y probar el último de los especímenes a los 40 minutos de haber sido introducido en el baño.



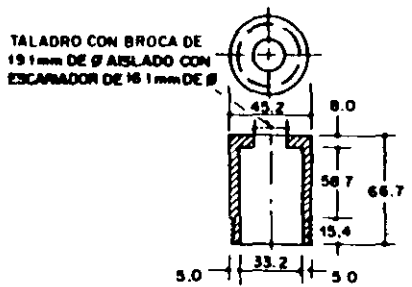
**FIGURA NUM. MOLDE DE COMPACTACION PARA LA PRUEBA DE MARSHALL.**



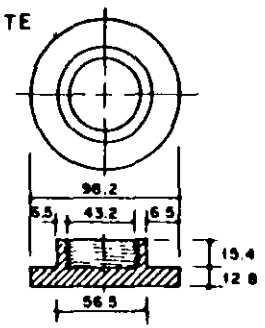
PIEZA	MATERIAL
MANIJA	ACERO ESTRUCTURAL
VARILLA	ACERO LAMINADO EN FRIO
MARTILLO DESLIZANTE	ACERO ESTRUCTURAL
RESORTE	ACERO ESTIRADO EN FRIO
PIE DEL PISON	ACERO ESTRUCTURAL
TOPE DEL RESORTE	ACERO ESTRUCTURAL

NOTA.- AJUSTAR EL DIAMETRO PARA QUE EL PESO SEA DE 4 536 g

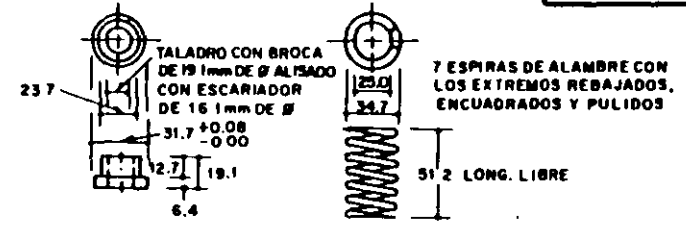
MARTILLO DESLIZANTE



PARTE SUPERIOR DEL PIE



PARTE INFERIOR DEL PIE



TOPE DEL RESORTE

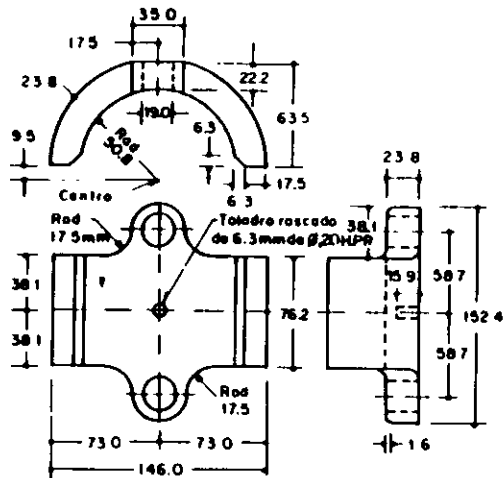
RESORTE

ACOTACIONES EN MILIMETROS

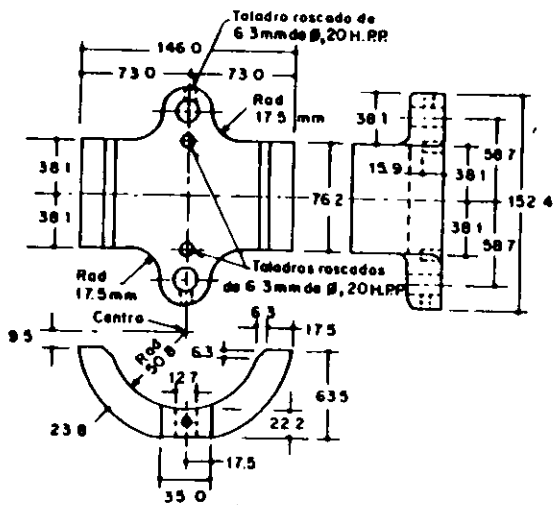
PESO DEL PISON  
COMPACTADOR: 7 930 g

DUREZA DEL ACERO: 88 EN  
LA ESCALA B DE ROCKWELL,  
PARA EL PIE DEL PISON

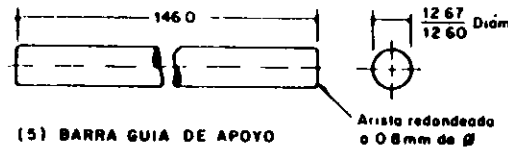
FIGURA NUM.- PISON DE COMPACTACION MARSHALL



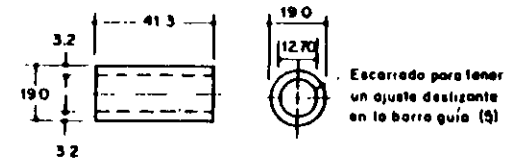
(1) SECCION SUPERIOR DEL CABEZAL



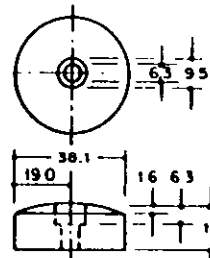
(2) SECCION INFERIOR DEL CABEZAL



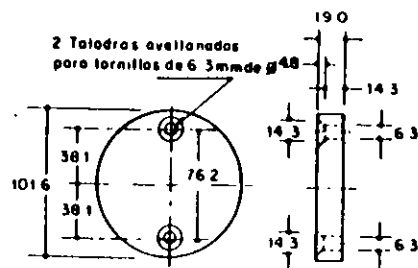
(5) BARRA GUIA DE APOYO



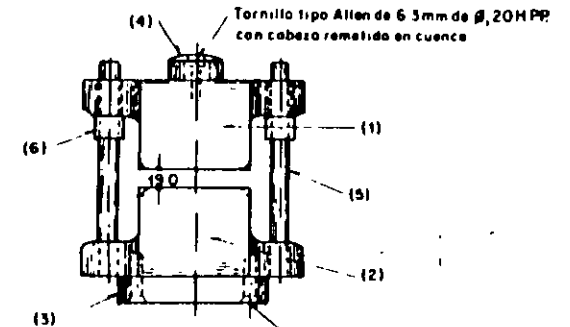
(6) CASQUILLO DE SUJECION A LA BARRA GUIA



(4) ADAPTADOR DEL CABEZAL



(3) BASE DEL CABEZAL



MONTAJE DE LOS CABEZALES

ACOTACIONES EN MILIMETROS  
H. P. P. = HILOS POR PULGADA.

FIGURA NUM. CABEZAL PARA PROBAR LOS ESPECIMENES MARSHALL



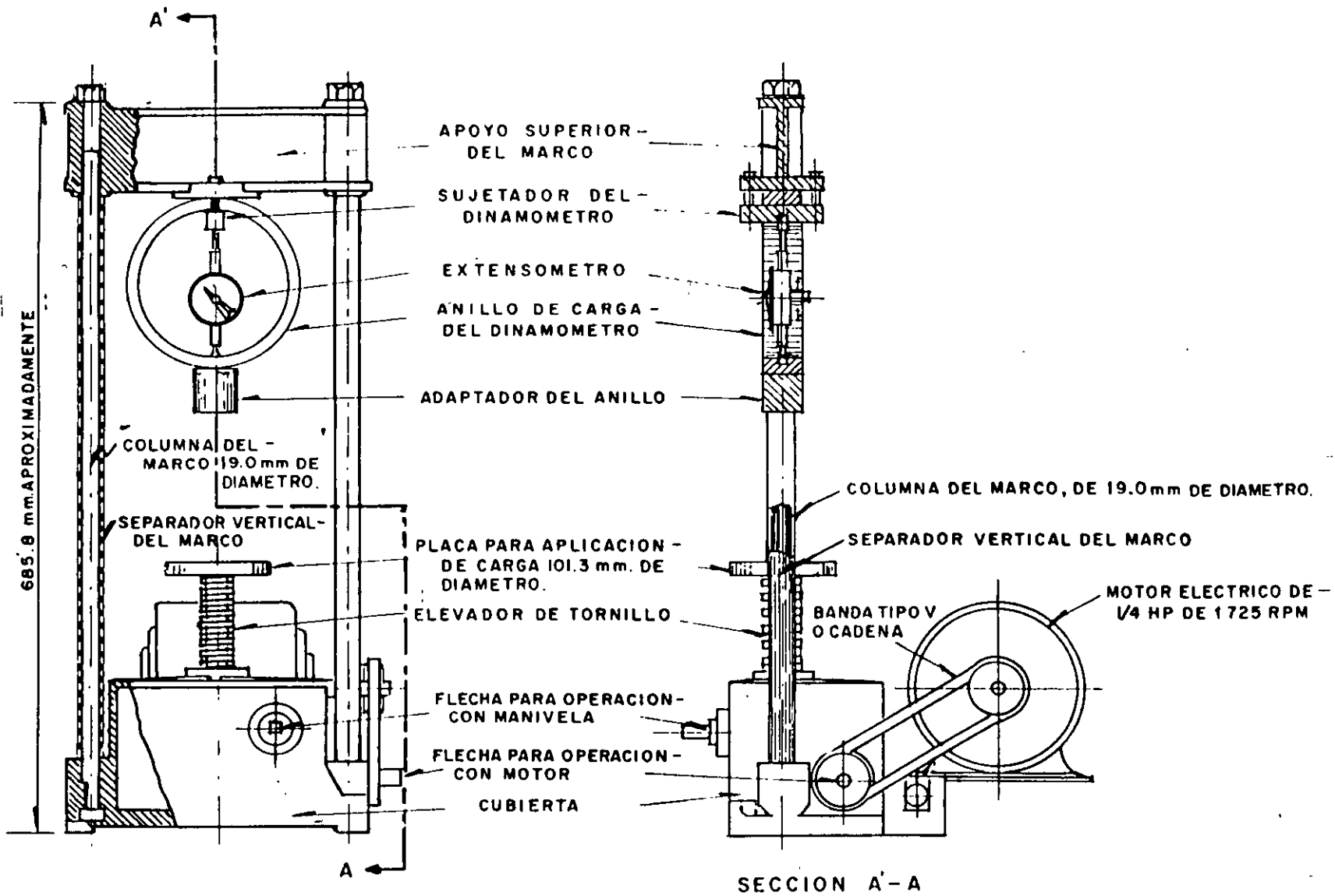


FIGURA NUM. ESQUEMA DE LA MAQUINA DE PRUEBAS MARSHALL

En el caso de mezclas elaboradas con cemento asfáltico, los cabezales de prueba deben mantenerse a una temperatura de  $35 \pm 3^{\circ}\text{C}$  y en el caso de mezclas con rebajados o emulsiones a  $25 \pm 3^{\circ}\text{C}$ .

La carga se aplica al espécimen con una velocidad de deformación constante de 50.8 mm/min hasta producir la falla del espécimen a la temperatura de prueba; dicha carga es el valor de estabilidad Marshall, en kg.

Mientras la carga se aplica, el extensómetro medidor de flujo colocado sobre la varilla guía de los cabezales de prueba registra las deformaciones, al presentarse la carga máxima la lectura registrada es el valor de flujo, en mm.

En esta prueba se calcula y reporta lo siguiente:

Peso específico teórico máximo de cada una de las mezclas consideradas en el estudio.

Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM) de cada uno de los especímenes.

Porcentaje de vacíos de la mezcla compactada.

Valores de estabilidad y de flujo.

Con los valores promedio anteriores se dibujan las gráficas que se analizarán para definir el contenido de asfalto que mejor satisface los requisitos de proyecto.

En esta prueba deben tenerse los siguientes cuidados:

Que en todas las etapas de la prueba las temperaturas se ajusten a los valores establecidos.

Que la superficie interior de los cabezales de prueba corresponda a un radio de 50.8 mm.

## **DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO POR EL MÉTODO DE HVEEM**

Este método se aplica para el proyecto y verificación de mezclas elaboradas, utilizando materiales pétreos con tamaño máximo de 25 mm y cemento asfáltico en caliente, rebajados o emulsiones asfálticas; el método consiste fundamentalmente en preparar dos series de especímenes con variaciones similares en sus contenidos de material asfáltico, utilizando el equipo de compactación de Hveem, que somete a la muestra a ciertas presiones repetidas, aplicadas en forma gradual mediante un pisón; a los especímenes de una serie se les determina su resistencia a la desintegración, alteración volumétrica y permeabilidad mediante la prueba de expansión; a los de la serie restante se les determina su resistencia a la deformación lateral, aplicándole a cada uno carga vertical en una celda de tipo triaxial o estabilómetro, bajo condiciones previas de humedad y temperatura; a los especímenes de ambas series se les determina su peso volumétrico y su resistencia a la tensión mediante el cohesiómetro de Hveem

Con los resultados obtenidos se hace un análisis gráfico para seleccionar la proporción óptima de cemento asfáltico que permita las mejores características de la muestra; el procedimiento consiste fundamentalmente en la preparación de muestras y elaboración de especímenes para determinar sus características volumétricas, efectuar la prueba del estabilómetro, la del cohesiómetro, la de expansión y permeabilidad.

### **PROCEDIMIENTO DE PRUEBA**

Se determina el peso específico relativo aparente del material pétreo por inmersión en cemento asfáltico; así también el del cemento asfáltico el cual será corregido tanto en el caso de rebajados como en el caso de emulsiones mediante las gráficas de peso específico - residuo asfáltico, tomando en cuenta los solventes y el agua que contenga el producto bajo las condiciones de compactación.

Deben obtenerse las temperaturas de mezclado del cemento asfáltico o rebajado y del material pétreo; para los primeros la temperatura mencionada es aquella a la que tengan una viscosidad Saybolt - Furol de  $85 \pm 10$  segundos y para el material pétreo, es esta misma temperatura más  $10^{\circ}\text{C}$ . Cuando se utilicen emulsiones el material pétreo no se calentará y en cambio se le adicionará una humedad similar a la de absorción, de tal manera que se obtenga el mejor cubrimiento. También se determinará la temperatura de compactación de la mezcla que será aquella a la cual el material asfáltico tenga una viscosidad Saybolt - Furol de  $140 \pm 15$  segundos; esta temperatura también se puede determinar de la gráfica viscosidad - temperatura del asfalto o producto utilizado.

La cantidad de material pétreo para cada mezcla será la necesaria para que el espécimen tenga una altura aproximada de 63.5 mm (aproximadamente 1,100 gramos de material pétreo) y las proporciones de asfalto se definirán con base en el contenido mínimo determinado mediante fórmulas empíricas variando los contenidos con incrementos de 0.5% desde el contenido mínimo - 1.0% hasta el contenido mínimo + 2.0%.

Durante la operación de mezclado se mantendrá la temperatura de compactación antes mencionada pudiendo aplicar calor durante esta etapa y en el caso de asfaltos rebajados se tendrá una relación de solvente a cemento asfáltico (valor de K) de 0.8 para rebajados de fraguado rápido y de 0.12 para rebajados de fraguado medio. Cuando se trate de mezclas elaboradas con emulsión, se mezclarán lo suficiente para homogeneizarlas, verificando el peso de la mezcla a fin de que por decantación y evaporación sucesiva se elimine el 80% aproximadamente del agua y solventes de la emulsión; la humedad que conserve la mezcla será la mayor que no origine exudación en el espécimen al compactarla, ni ocasione deformación excesiva bajo la acción del pisón.

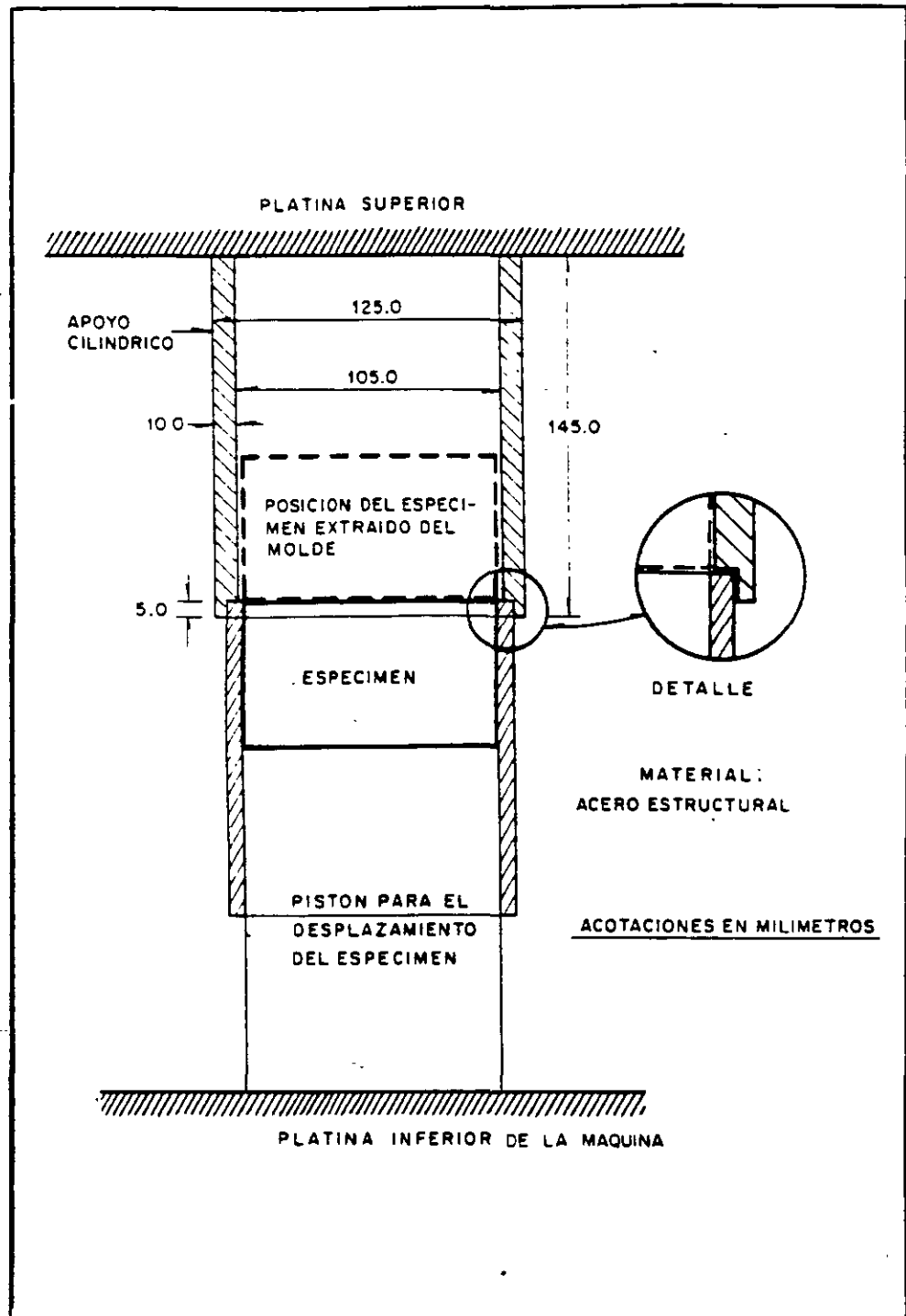
Al terminar la preparación de la mezcla y el proceso de curado, cuando este se requiera, se procederá lo antes posible a moldear los especímenes de prueba utilizando el compactador mecánico de presiones repetidas de acuerdo con lo siguiente:

Se inicia con los especímenes de prueba del estabilómetro, calentando previamente los moldes a la temperatura de compactación de la mezcla y regulando la temperatura de la placa inferior del compactador para evitar que se le adhiera la mezcla. Se vierte al molde de compactación la mitad de la mezcla colocada en la canaleta y se acomoda picándola con la varilla 20 veces en la parte central y 20 veces en la parte perimetral, después de lo cual se vierte en el molde la mezcla restante y se repite el procedimiento de picado con la varilla.

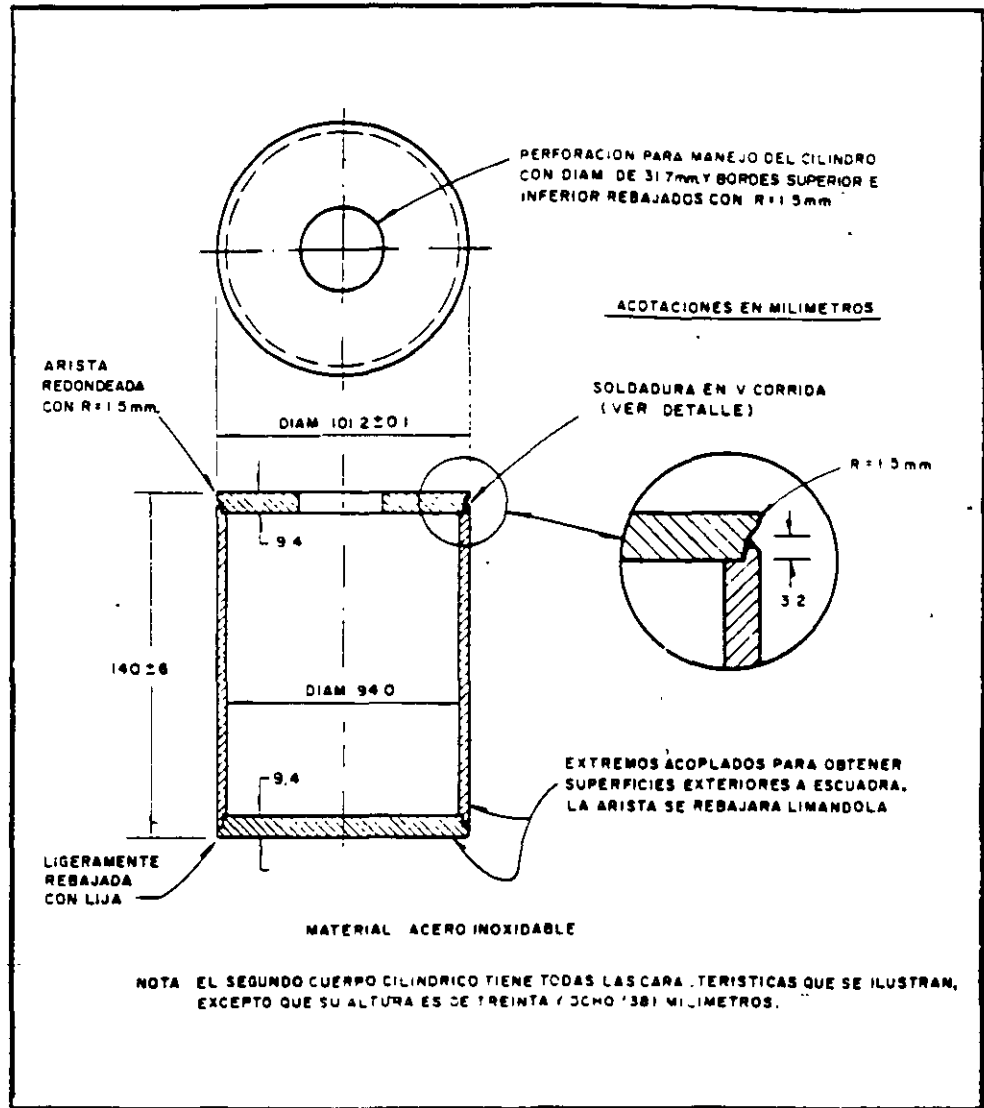
Se pone a funcionar el compactador con una presión de  $17.6 \text{ kg/cm}^2$  y se aplican de 10 a 50 golpes con objeto de dar una compactación preliminar a la mezcla (el número de golpes se determina observando que la mezcla no se deforme excesivamente al aplicar presiones de  $35 \text{ kg/cm}^2$ ). Después de la compactación preliminar se remueven las calzas en que se apoya el molde con lo cual éste se libera y permite la compactación por las caras inferior y superior del espécimen. Se eleva la presión de compactación a  $35 \text{ kg/cm}^2$  y se dan 150 aplicaciones con el pisón.

El molde conteniendo el espécimen se coloca en un horno a  $60^\circ\text{C}$  durante hora y media, excepto cuando se trate de mezclas con emulsiones asfálticas en las que no se calienta la mezcla. En estas condiciones de temperatura se coloca el molde con el espécimen en la máquina de compresión descansándolo en el cuerpo cilíndrico de menor tamaño y el de mayor tamaño se instala en la parte superior; a continuación se aplica por el método de doble pistón una carga para nivelación de 5,700 kg con una velocidad de desplazamiento de la platina de 1.3 mm/min; se desmonta el molde con el espécimen y se dejan enfriar a la temperatura ambiente y en estas condiciones se determina su peso en gramos y se mide la altura del espécimen en mm.

Cuando se trate de una mezcla asfáltica con materiales arenosos o muy inestables la compactación del espécimen se hará aplicando una carga estática de 18,000 kg mediante el método de doble pistón dejando que se desplacen libremente los pistones de la máquina de prueba con una velocidad de desplazamiento de la platina de 1.3 mm/min y manteniendo la carga durante  $30 \pm 5$  segundos.



**FIGURA NUM. APOYO CILINDRICO MONTADO, PARA SACAR ESPECIMENES DEL MOLDE.**



**FIGURA NUM. CUERPO CILINDRICO METALICO  
PARA APLICAR CARGA POR EL METODO DE  
DOBLEPISTON.**

Para la elaboración de los especímenes que se emplean en la prueba de expansión se sigue el método antes descrito excepto en lo siguiente: los moldes no se calientan y se acondicionan colocándoles alrededor de su parte inferior y a una altura de 15 a 20 mm una tira de papel impregnado de parafina, para evitar el escape del agua entre el molde y el espécimen durante el periodo de inmersión a que serán sometidos; en lo referente a la temperatura de compactación, ésta será de 110°C cuando se trate de cementos asfálticos y de 60°C cuando se utilicen rebajados; las excepciones en el tratamiento del espécimen después de aplicar la carga de compactación, consisten en que éste no se mete al horno y la carga de nivelación no se aplica por el sistema de doble pistón, sino que para ello se invierte el molde desplazando el espécimen dentro del mismo hasta que queda apoyado en la platina de la máquina y en estas condiciones se continua con la aplicación de la carga de nivelación.

Después del periodo de enfriamiento se extraen los especímenes del molde y se les determina su peso volumétrico. En esta parte del procedimiento mediante el estabilómetro de Hveem se determina la resistencia a la deformación evaluada mediante la presión lateral que se desarrolló en los especímenes al aplicarles una carga vertical dentro del estabilómetro.

Los especímenes para la prueba del estabilómetro se meten al horno a una temperatura de 60°C por un periodo no menor de 2 horas después de lo cual dichos especímenes se introducen cuidadosamente en el estabilómetro, se le instala el seguidor en la parte superior y a continuación todo el sistema se instala en la máquina de compresión. Se aplica una presión lateral al espécimen de 0.35 kg/cm<sup>2</sup> operando la manivela del estabilómetro y en seguida se le aplica carga vertical a un velocidad de avance de 1.3 mm/min y se van anotando las lecturas de presión lateral producidas por el espécimen en el manómetro del estabilómetro, para las cargas de 225, 450, 910, 1360, 1815, 2270 y 2720 kg. Inmediatamente después de alcanzar la carga vertical mencionada se descarga hasta 450 kg y se mantiene en este valor y operando la manivela del estabilómetro se fija la presión horizontal en 0.35 kg/cm<sup>2</sup> lo cual suele originar normalmente una reducción de la carga vertical y por lo tanto no es necesario hacer ninguna corrección.



Se ajusta a cero el micrómetro que mide el desplazamiento de la bomba, se gira la manivela del estabilómetro a una velocidad de dos vueltas por segundo hasta alcanzar  $7.03 \text{ kg/cm}^2$  en el manómetro del estabilómetro y se registra el desplazamiento indicado en el micrómetro. Durante esta operación la carga registrada en la máquina de compresión, que en algunos casos origina que se exceda la carga vertical de 450 kg lo cual es normal por lo que no se debe hacer ninguna corrección; se libera la carga vertical y se acciona la manivela del estabilómetro hasta dar tres vueltas más después de que el manómetro registró cero y se extrae el espécimen de dicho aparato.

En esta prueba se calcula y reporta lo siguiente:

El valor de R de estabilidad para cada uno de los especímenes de los diferentes contenidos de asfalto, se determina mediante la siguiente fórmula:

$$R = \frac{22.2 (P_v - P_H)}{P_H \cdot D_E + 0.222 (P_v - P_H)}$$

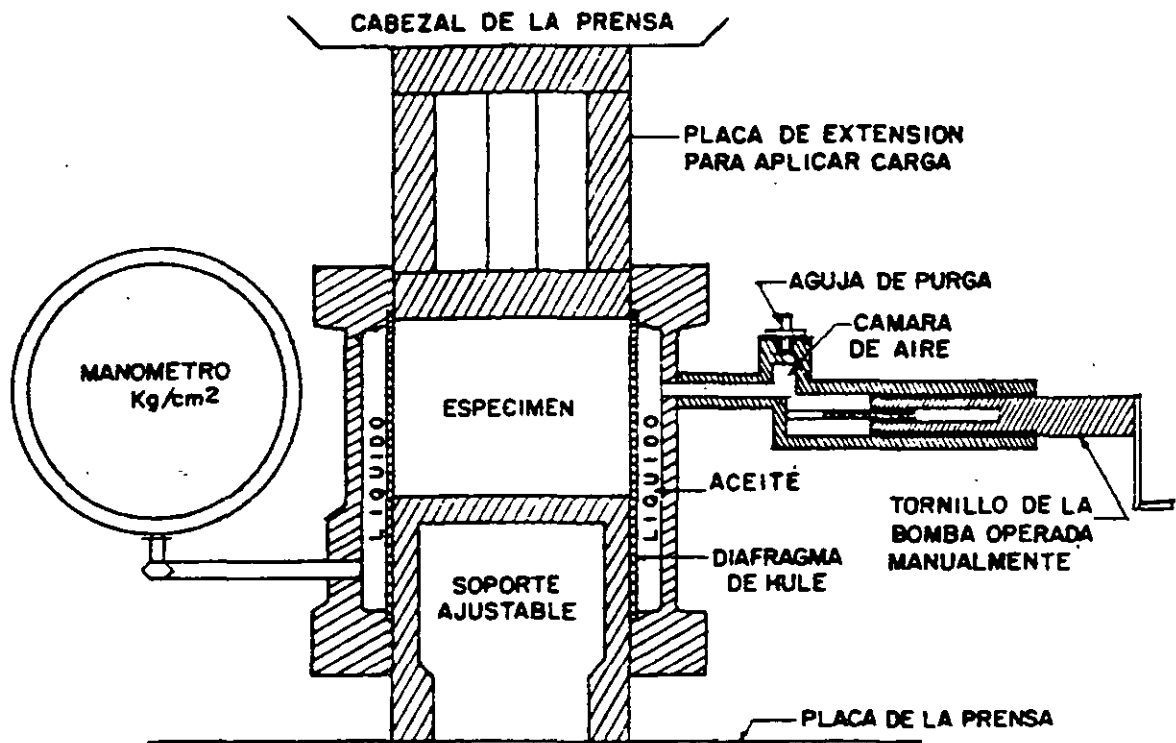
donde:

- R es el valor de estabilidad en la mezcla asfáltica determinado con el método de Hveem.
- $P_v$  es la presión vertical de  $28.2 \text{ kg/cm}^2$ , correspondiente a una carga total de 2270 kg.
- $P_H$  es la presión horizontal medida en el manómetro del estabilómetro, correspondiente a  $P_v$ .
- $D_E$  es el desplazamiento de la bomba al probar el espécimen en el estabilómetro, dado en número de vueltas de la manivela.

En caso de ser necesario estos valores se corregirán por variación de la altura de los especímenes utilizando la gráfica de la figura Núm. 7.

La medición de la cohesión se efectúa mediante el cohesiómetro del Hveem, en el que se registra la carga de falla al someter a doblado especímenes que se sujetan por uno de sus extremos y son los mismos que se someten a la prueba del estabilómetro.

## DIAGRAMA DEL ESTABILOMETRO DE HVEEM



PRUEBA EN MEZCLAS ASFALTICAS

Alturas del espécimen {  
• A - 71 a 76 mm  
B - 66 a 70 mm  
C - 61 a 65 mm  
D - 56 a 60 mm  
E - 51 a 55 mm

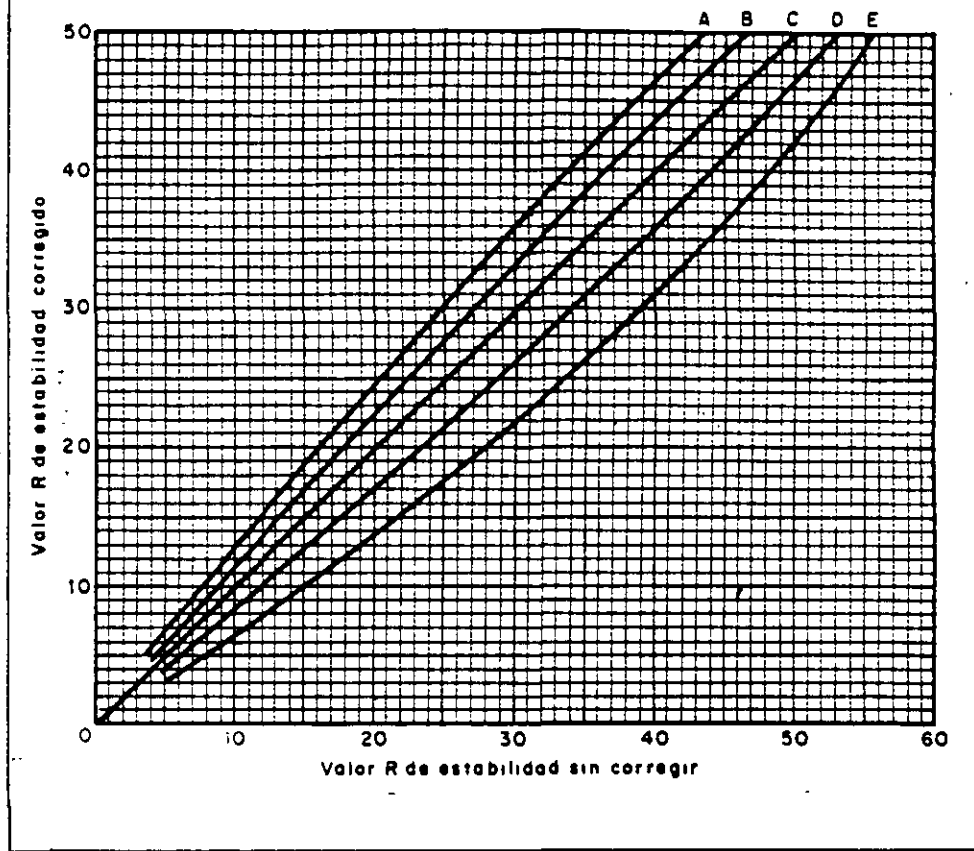


FIGURA NUM. 7 GRAFICA PARA CORREGIR POR ALTURA DEL ESPECIMEN LOS VALORES R DE ESTABILIDAD, A UNA ALTURA DE 63.5 MM.

El procedimiento consiste en calibrar el regulador del lastre del cohesiómetro para que las municiones fluyan a razón de  $1,800 \pm 20$  gramos por minuto y se verifica que la longitud del brazo que produce el esfuerzo de flexión, sea de 76 cm.

Los especímenes se mantienen durante dos horas a  $60 \pm 1^\circ\text{C}$ , se ajusta el termostato para que la temperatura en el interior del cohesiómetro se mantenga a esa misma temperatura y en seguida se fija el brazo de carga con su seguro, se saca del horno el espécimen y se monta en el cohesiómetro sujetándolo firmemente sin dañarlo, se cierra la tapa, se espera para que la temperatura en el interior del gabinete se recupere y entonces se retira el seguro de fijación del brazo y se oprime el botón de descarga para liberar las municiones hasta que el espécimen falla, lo cual ocurre cuando el brazo de carga se desplaza 13 mm con lo que automáticamente se interrumpe el paso de municiones. Se pesan las municiones que pasaron y se registra el dato.

El valor de cohesión se calcula con la siguiente fórmula:

$$C = \frac{L}{W \cdot (0.02H + 0.0044H^2)}$$

donde:

- C es el valor de cohesión estimado por ancho de probeta de 25 mm, medidos sobre el diámetro de falla y corregido para alturas de probeta de 76 mm, en  $\text{gramos}/\text{cm}^2$ .
- L es el peso de las municiones, en gramos.
- W es el diámetro del espécimen, en cm.
- H es la altura del espécimen, en cm.

Se calcula y reporta el promedio de los valores del cohesiómetro para cada contenido de cemento asfáltico.

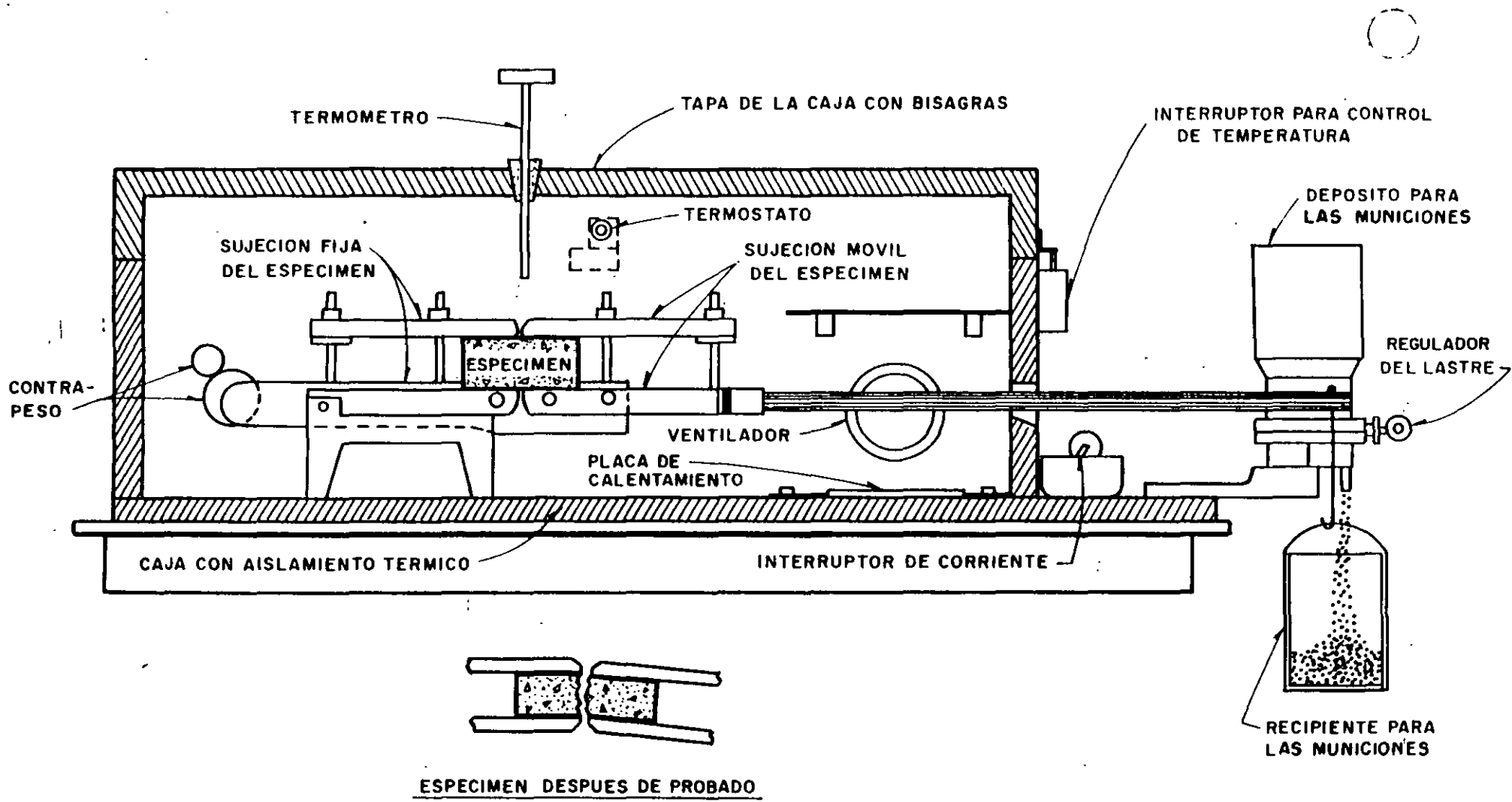


FIGURA NUM. -COHESIOMETRO DE HVEEM

En esta prueba se calcula y reporta lo siguiente:

Peso específico teórico máximo de cada una de las mezclas consideradas en el estudio.

Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM) de cada uno de los especímenes.

Porcentaje de vacíos en la mezcla compactada.

Estabilidad relativa R y valor del cohesiómetro C.

Con los valores promedio se dibujan las gráficas que se analizarán para definir el contenido de asfalto que mejor satisface los requisitos de proyecto.

En esta prueba deben tenerse los siguientes cuidados:

Que en todas las etapas de la prueba las temperaturas se ajusten a los valores establecidos.

Vigilar y/o verificar la calibración del equipo de prueba.

## DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO POR EL MÉTODO DE HUBBARD - FIELD

Este método se aplica en el proyecto de mezclas elaboradas con cemento asfáltico en caliente y material pétreo cuyas partículas pasan la malla Núm. 4.75 y como mínimo, el 65% de las mismas pasa la malla Núm. 2.0.

La prueba consiste en elaborar especímenes con el agregado pétreo y diferentes proporciones de cemento asfáltico, en los que se definen mediante su resistencia a la extrusión y porcentaje de vacíos, las diferentes proporciones de asfalto que permiten satisfacer los requisitos de proyecto.

### PROCEDIMIENTO DE PRUEBA

Previamente a la preparación de las mezclas de prueba, al material pétreo se le determina su peso específico por el procedimiento de inmersión en cemento asfáltico y al cemento asfáltico su peso específico. También deben obtenerse las temperaturas de mezclado del cemento asfáltico y del material pétreo; para el primero la temperatura mencionada es aquella a la que tenga una viscosidad Saybolt - Furol de  $85 \pm 10$  segundos y para el material pétreo, es esta misma temperatura más  $10^{\circ}\text{C}$ . También se determinará la temperatura de compactación de la mezcla que será aquella a la cual el cemento asfáltico tenga una viscosidad Saybolt - Furol de  $140 \pm 15$  segundos; para fijar estas temperaturas se deben utilizar las gráficas de viscosidad - temperatura del cemento asfáltico empleado.

La cantidad de material pétreo requerida para cada mezcla es de 500 gramos y las proporciones de asfalto se definirán con base en el contenido óptimo aproximado determinado mediante fórmulas empíricas.

Se elaboran especímenes (dos por punto), variando los contenidos con incrementos de 0.5% desde el contenido mínimo - 1.0% hasta el contenido mínimo + 2.0%.

Antes de iniciar la elaboración de especímenes, se limpian y calientan dos moldes completos a una temperatura de 130°C en un horno durante 10 minutos como mínimo. La elaboración de especímenes se hace en los moldes previamente calentados colocando en ellos una cantidad aproximada de 100 gramos para obtener pastillas con una altura de  $25.4 \pm 0.5$  mm, después de lo cual se regresan al horno los moldes con su contenido y se mantienen a la temperatura de compactación durante 10 minutos como mínimo.

Se saca del horno uno de los moldes con la mezcla y apoyándolo sobre las calzas se coloca el conjunto sobre la platina de la prensa y se introduce en el molde el pistón de compactación y se aplica una carga inicial de 230 kg; a continuación se retira la carga, se remueven las calzas y se compacta el espécimen hasta alcanzar en dos minutos una carga de 4,275 kg, equivalente a una presión de  $211 \text{ kg/cm}^2$ , a continuación se llena el recipiente con agua fría hasta un tirante de 8 cm y se deja enfriar la muestra y se mantiene esa carga durante 5 minutos y después se libera, se invierte el molde, se retira la placa de base, se saca la pastilla del molde utilizando el pistón de extrusión y se marca con un crayón su parte superior para identificarla, se deja a temperatura ambiente por lo menos durante 12 horas antes de ser probada.

Transcurrido el periodo de reposo se determina el peso volumétrico de cada uno de los especímenes. La resistencia a la extrusión se determina colocando las pastillas y los moldes de prueba en un baño de agua a 60°C y se dejan en éste durante una hora como mínimo antes de la prueba; a continuación se introduce uno de los especímenes en el molde de prueba cuidando que su cara superior quede hacia arriba; se coloca el conjunto sobre la platina de la máquina de ensaye y se le aplica carga para que el espécimen se deforme a una velocidad constante de 60 mm/min. Se designa como resistencia a la extrusión el valor de la carga máxima obtenida en kg.

En esta prueba se calcula y se reporta lo siguiente:

Peso específico teórico máximo de cada una de las mezclas consideradas en el estudio.

Porcentaje de vacíos en el agregado mineral de cada uno de los especímenes.

Porcentaje de vacíos de la mezcla compactada.



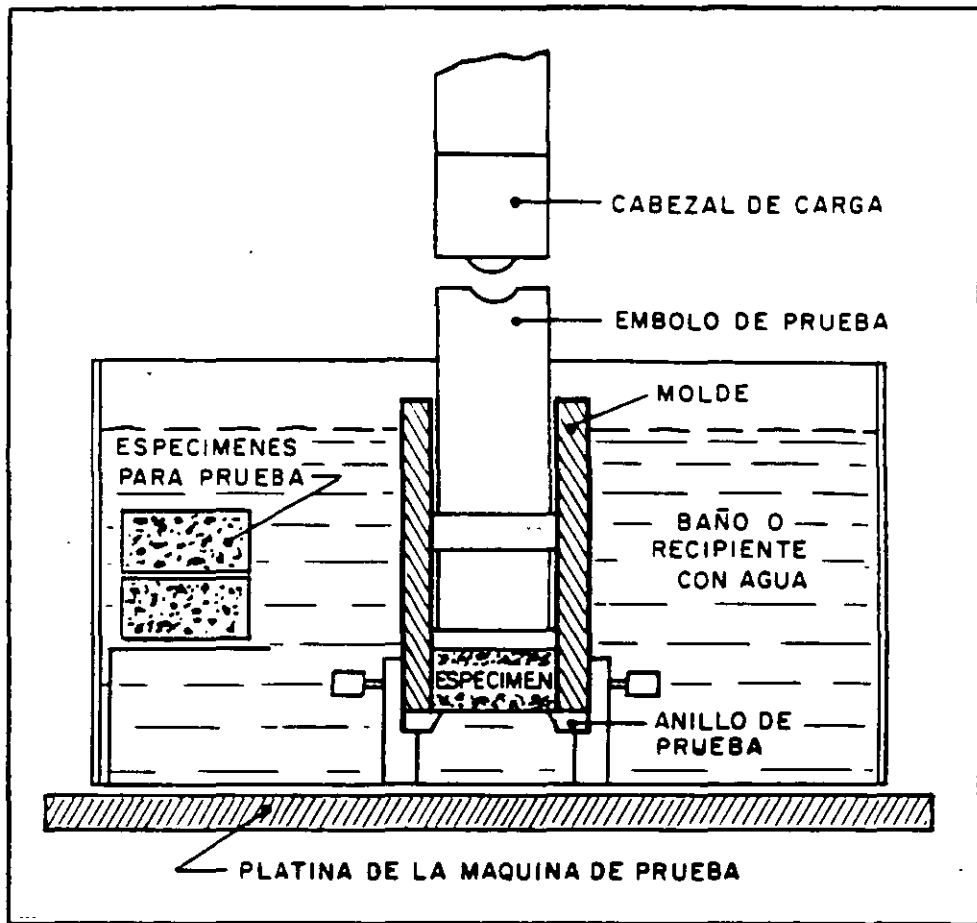


FIGURA NUM. DISPOSICION DEL EQUIPO HUBBARD FIELD PARA LA EXTRUSION DE LA PASTILLA.

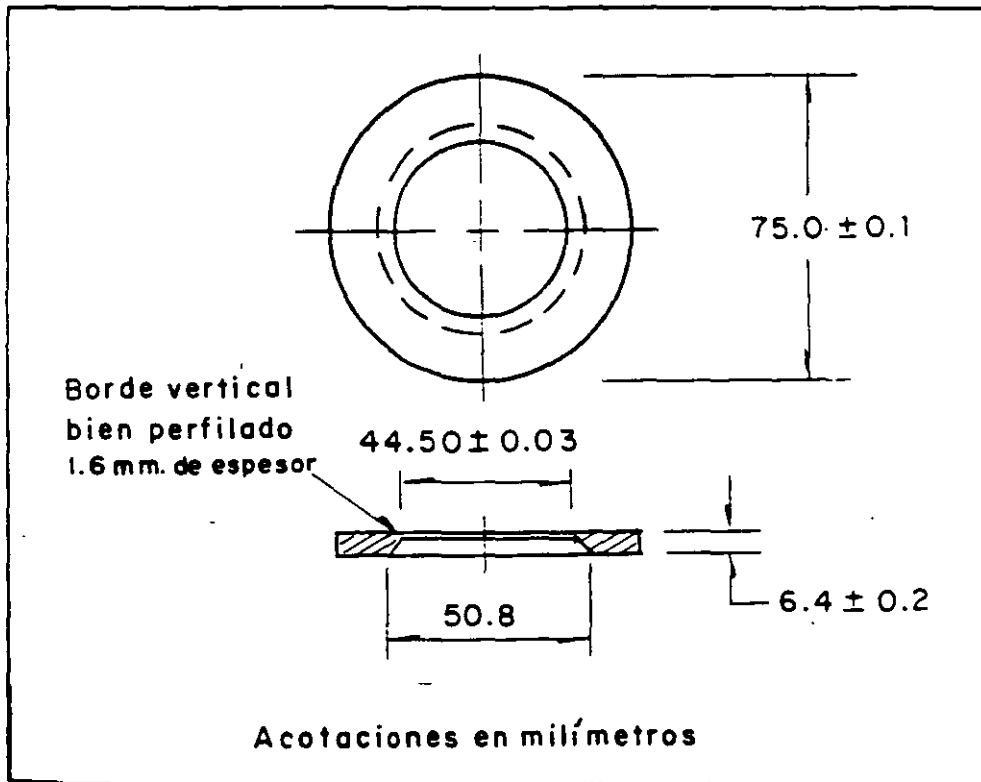



FIGURA NUM. ANILLO PARA LA EXTRUSION



Utilizando los valores promedio obtenidos para cada contenido de asfalto se dibujan las gráficas correspondientes.

En cada gráfica se analizará cual es la proporción de asfalto que en mejor forma satisface los requerimientos del proyecto, fundamentalmente en cuanto a la resistencia a la extrusión y vacíos, con lo cual se definirá el contenido óptimo.

## **DISEÑO DE MORTEROS ASFÁLTICOS Y VERIFICACIÓN DE SU CALIDAD POR MEDIO DE LA PRUEBA DE ABRASIÓN EN HÚMEDO**

Las determinaciones preliminares y procedimientos que se deben aplicar para el estudio de la dosificación y verificación de la calidad de los morteros asfálticos constituidos por mezclas de arena, emulsión asfáltica, agua y en algunos casos finos adicionales a base de cemento Portland o de cal hidratada; consiste fundamentalmente en efectuar la prueba de abrasión en húmedo a dichos especímenes para evaluar la eficiencia del ligante en el mortero endurecido.

El diseño contempla el análisis de varias proporciones de los materiales seleccionados, determinando en las mezclas frescas y previamente a la preparación de especímenes sus características de consistencia, tiempo de curado y tiempo de fraguado; con base en esos resultados se selecciona el mortero que mejor se ajusta a los requisitos del proyecto y/o al uso que se le destine.

### **PRUEBA DE ABRASIÓN EN HÚMEDO**

Esta prueba es un buen instrumento de diseño si se logra correlacionar adecuadamente sus resultados con el comportamiento real de la mezcla; mide la resistencia de este tipo de capas delgadas en condiciones de inmersión en agua y da una buena idea. El procedimiento comienza después de haber obtenido las características físicas del material pétreo y haber establecido la granulometría de trabajo; el residuo teórico de asfalto que se empleará se determina mediante la siguiente fórmula:

$$SE = 1/100 (0.342G + 1.92g + 15.33K + 118F)$$

donde:

- SE es la superficie específica del material pétreo
- G es el porcentaje entre mallas 3/8" y Núm. 4
- g es el porcentaje entre mallas Núm. 4 y Núm. 50
- K es el porcentaje entre mallas Núm. 50 y Núm. 200
- F es el porcentaje que pasa la malla Núm. 200

Con el valor de SE se entra a la gráfica para el porcentaje de residuo teórico donde existen tres curvas cuyos valores dependen del tipo de materiales y propiedades previamente determinadas.

La cantidad de agua necesaria para la mezcla se determina por tanteos y el porcentaje inicial será aquel que, al incorporarse en la arena y mezclarse sin emulsión produzca una mezcla trabajable y suelta sin que exista agua libre.

Cuando se incorpore la emulsión al material pétreo con el cemento o la cal ya incluida se harán los ajustes necesarios pues esta humedad será la que se utilice para elaborar las mezclas que más tarde se probarán en la máquina de abrasión.

Las cantidades de emulsión que se emplearán se incrementarán en 0.5% desde el contenido teórico - 1.0% hasta el contenido teórico + 2.0%; en todos los casos, es recomendable mantener constante la cantidad de finos (cemento o cal), en un porcentaje de 1% con respecto al material pétreo, sin embargo, una vez determinada la cantidad de emulsión óptima, se verá el desgaste que puede tener variando de 0.5 a 2.0% a fin de garantizar el menor desgaste posible.

Las pastillas de prueba se formarán sobre losetas que pueden ser vinílicas o cualquier otro material no absorbente pero que permita una buena adherencia; el espesor de la pastilla será de acuerdo con el tamaño máximo del material pétreo que se utilice. Estos especímenes se secan a peso constante en horno a una temperatura de 60°C; se dejan enfriar a la temperatura ambiente y se les determina su peso; finalmente, este peso se comparará con el peso del espécimen seco y a la temperatura ambiente determinado después de la prueba de abrasión en húmedo.

RESIDUO TEORICO PARA SLURRY SEAL

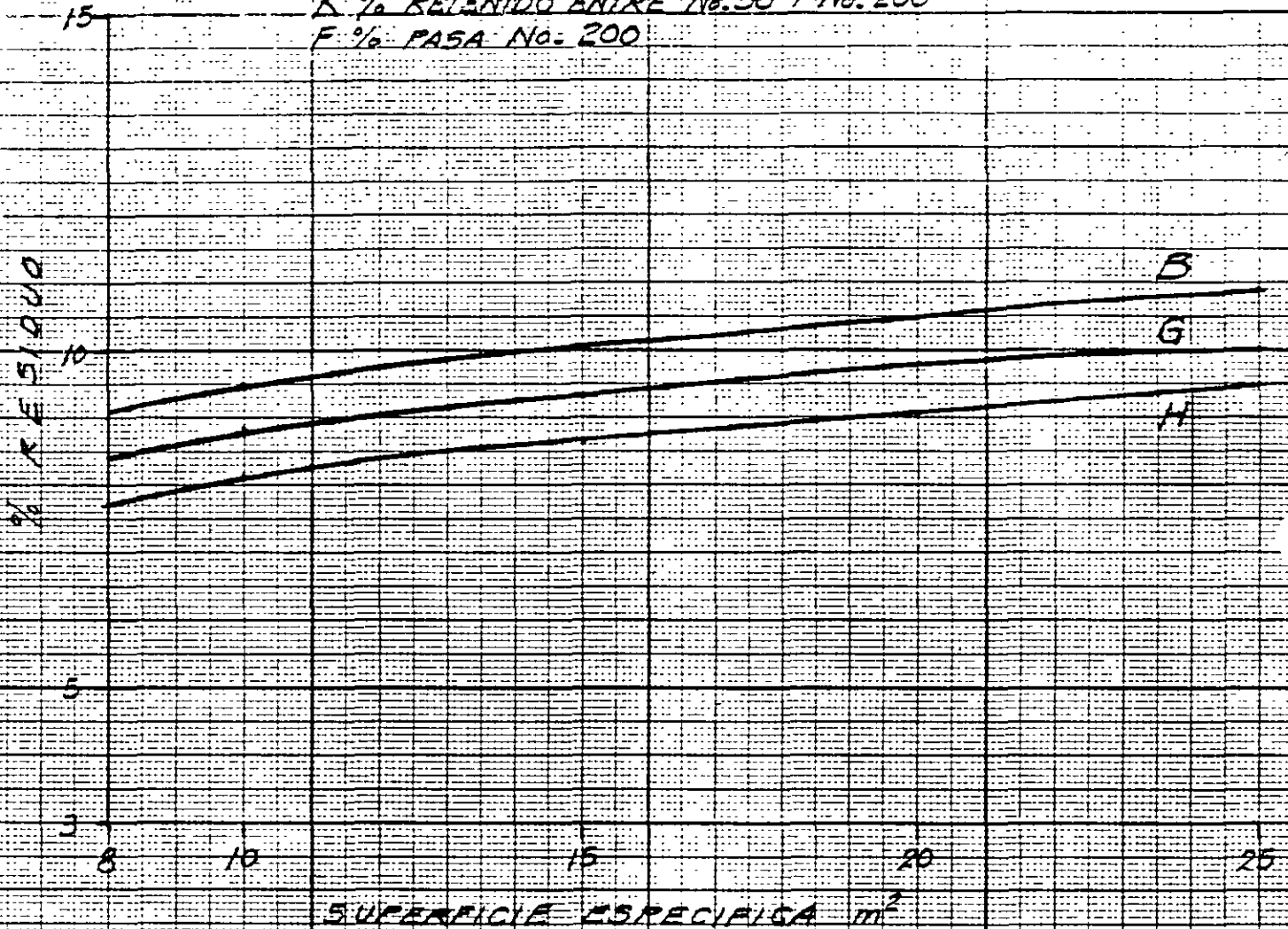
$$S.E. = \frac{1}{100} (0.342G + 1.22g + 15.33K + 118F)$$

G % RETENIDO ENTRE 3/8" y No. 4

g % RETENIDO ENTRE No. 4 y No. 50

K % RETENIDO ENTRE No. 50 y No. 200

F % PASA No. 200



B MATERIALES CON BAJO E.A. Y ABSORCION ALTA

G MATERIALES CON PROPIEDADES PROMEDIO

H MATERIALES CON ALTO E.A. Y ABSORCION BAJA

## PROCEDIMIENTO DE PRUEBA

Elaboración de especímenes.

Evaporación del agua contenida en los especímenes y se le determina su peso  $P_{E1}$ .

Inmersión del espécimen en baño de agua a 25°C durante una hora antes de la prueba.

Prueba del espécimen durante 5 minutos también en inmersión (método ASTM D 3910).

Después de haberse sometido al desgaste, el espécimen se seca hasta peso constante en horno a 60°C.

Se pesa el espécimen y se registra como  $P_{E2}$ .

La abrasión se calcula en  $\text{kg/m}^2$ , con la siguiente fórmula:

$$F_a = \frac{(P_{E1} - P_{E2})}{A} = \frac{(P_{E1} - P_{E2})}{0.03038} = 32.9 (P_{E1} - P_{E2})$$

donde:

$F_a$  es el factor de abrasión, en  $\text{g/m}^2$ .

$P_{E1}$  peso del conjunto de la base y el espécimen antes de la prueba.

$P_{E2}$  peso del conjunto de la base y el espécimen después de la prueba.

A área de desgaste en el espécimen ( $0.03038 \text{ m}^2$ ). *NOTA: el área varía según la longitud del elemento de desgaste de la máquina utilizada.*

REFERENCIA :

NORMAS PARA MUESTREO Y PRUEBA DE LOS MATERIALES

LIBRO 6 PARTE 6.01 TOMO 2

CARRETERA Y AEROPISTAS

SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

<b>GRANULOMETRIA SUGERIDA POR A.S.T.M. PARA DIFERENTES TIPOS DE MORTEROS</b>			
<b>MALLA</b>	<b>TIPO I</b>	<b>TIPO II</b>	<b>TIPO III</b>
3/8"	% que pasa 100	% que pasa 100	% que pasa 100
NÚM. 4	100	90 - 100	70 - 90
NÚM. 8	90 - 100	65 - 90	45 - 70
NÚM. 16	65 - 90	45 - 70	28 - 50
NÚM. 30	40 - 65	30 - 50	19 - 34
NÚM. 50	25 - 42	18 - 30	12 - 25
NÚM. 100	15 - 30	10 - 21	7 - 18
NÚM. 200	10 - 20	5 - 15	5 - 15

En algunos países se acepta hasta un 45% como mínimo de equivalente de arena, sin embargo es recomendable tener un material limpio con 60% de equivalente de arena

<b>CONCEPTO</b>	<b>GRANULOMETRÍA A. S. T. M.</b>		
	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>
Espesor mínimo	3 mm	4 mm	6 mm
Cantidad de material pétreo promedio kg/m <sup>2</sup>	2 - 6	7 - 12	10 - 15
% de asfalto con respecto a los agregados.	10 - 18	8 - 14	7 - 12
% de agua de mezclado.	10 - 20	10 - 20	10 - 20



## **ALQUITRÁN DE HULLA**

### **ORIGEN Y PREPARACIÓN DEL ALQUITRÁN.**

Alquitrán es una palabra genérica aplicable a líquidos obtenidos cuando se carbonizan o destilan destructivamente en ausencia de aire, materiales orgánicos naturales como la madera y el carbón: los productos de este proceso de destilación se llaman así "alquitrán crudo de madera", "alquitrán crudo de carbón". En general los alquitranes crudos o brutos no se utilizan en esta forma, sino que se someten a un tratamiento posterior o refino. El alquitrán para construcción de carreteras, se prepara a partir del alquitrán de hulla bruto. Las condiciones generales de la carbonización de la hulla tiene un definido efecto sobre las características del alquitrán, y el alquitrán para construcción de carreteras, solo puede obtenerse a partir del producto obtenido de la carbonización a alta temperatura.

A partir de la materia prima, el carbón, la producción del alquitrán para construcción de carreteras se divide en tres etapas :

- a) destilación del carbón para producir del alquitrán bruto.
- b) Refino ó destilación del alquitrán bruto.
- c) Mezcla del residuo de destilación con los aceites destilados para conseguir el grado deseado de alquitrán para construcción de carreteras.

### **DESTILACIÓN DEL CARBÓN A ALTA TEMPERATURA**

El alquitrán bruto se obtiene como subproducto de las industrias que destilan el carbón. La carbonización o destilación destructiva del carbón consiste en calentar durante varias horas a temperaturas de 1000 °C aproximadamente, una delgada capa de hulla contenida en una cámara de ladrillo refractario.

Una tonelada de carbón da aproximadamente 30 litros de alquitrán bruto.

### **DESTILACIÓN DEL ALQUITRÁN BRUTO.**

El alquitrán bruto obtenido de la condensación de los vapores despedidos por el alquitrán durante el proceso de carbonización, no se utiliza como aglutinante en la construcción de carreteras, por contener entre otros solventes, benzol empleados como materiales químicos de diferentes tipos, (por ejemplo tintes, plásticos, explosivos, medicinas etc.); también contiene grandes cantidades de agua.

En los primeros tiempos de la preparación del alquitrán como aglutinante para carreteras, consistía simplemente en calentar en un recipiente alquitrán bruto hasta eliminar el agua y los aceites ligeros.

La mayor parte del alquitrán de carreteras que se produce actualmente, se hace en hornos tubulares continuos en los que circula continuamente por bombeo el alquitrán, a través de tubos calentados en un horno en el que generalmente se quema combustible líquido. Esta operación se lleva a cabo en dos etapas.

En la primera, el alquitrán pasa a través de tubos por la parte más fría del horno, donde alcanza una temperatura de 140°C aproximadamente, pasando después a una cámara de deshidratación donde se disminuye la presión y el agua y los aceites ligeros se eliminan por ebullición; después el alquitrán restante pasa a la segunda parte del horno, donde alcanza una temperatura cerca de los 300°C. Desde esta segunda etapa de calentamiento el alquitrán pasa a una cámara a presión mas baja, donde se produce la evaporación. Se acelera el proceso de destilación mediante la inclusión de vapor de agua a la cámara. Los vapores se condensan en una columna de fraccionamiento (fig. 1). Los condensados que se obtienen en diferentes secciones de la columna constituyen las "fracciones" de diferentes tipos de ebullición. El residuo que no pasa a través de la columna se extrae y constituye el alquitrán "el alquitrán base o brea". Los aceites se separan en fracciones de campo de ebullición mas estrecho en las instalaciones modernas, en los que se utilizan hornos tubulares.

## **PROPIEDADES DEL ALQUITRÁN DE HULLA.**

Es un líquido viscoso o semisólido, negro de olor similar al naftaleno, sabor a quemado, es soluble en éter, benceno, disulfuro de carbono, cloroformo, parcialmente soluble en alcohol, acetona y metanol. El conocimiento de la composición química de los alquitranes para construcción de carreteras sería una valiosa ayuda para controlar sus propiedades físicas y químicas, ajustándolas lo mejor posible a su función en la construcción de carreteras, pero no existe una información completa sobre su composición química.

El alquitrán se ha considerado usualmente como una mezcla de hidrocarburos con pesos moleculares variables dentro de un margen muy amplio. Se estima que en el alquitrán existen más de 10000 cuerpos químicos, de los que solamente se han separado y caracterizado unos 300, de los que mayor parte pertenecen a la fracción oleosa de bajo peso molecular.

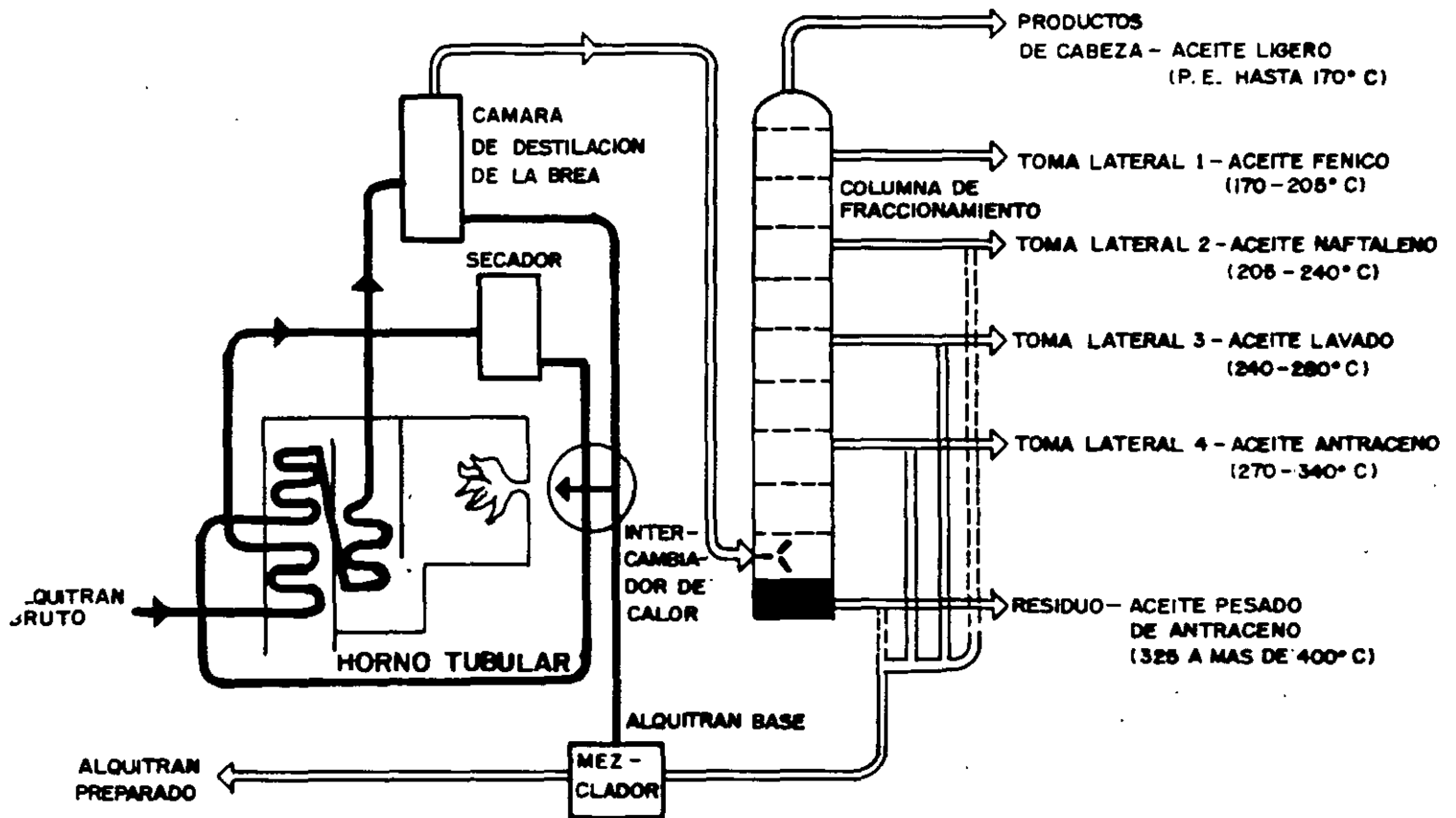
## **PRUEBAS DE LABORATORIO PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES DEL ALQUITRÁN.**

- Medición del peso específico.
- Determinación de las propiedades reológicas.
- Determinación de la proporción de fracciones específicas y componentes del aglutinante.
- Otras determinaciones.

En la tabla 1 se anotan las normas para mezclas con alquitrán para carreteras.

## **MEZCLAS CON ALQUITRÁN PARA CARRETERAS.**

Las mezclas con alquitrán son materiales preparados en caliente compuestos con pétreos graduados y alquitrán de alta viscosidad, cuyas proporciones se determinan de tal forma que después de la compactación se obtengan pavimentos densos e impermeables, con este tipo de mezclas se puede en los pavimentos lograr mayor vida útil, impermeabilidad completa y resistencia a la deformación.



**PRODUCCION DE ALQUITRAN DE CARRETERAS**

**FIG. 1 - DESTILACION DEL ALQUITRAN BRUTO EN UNA REFINERIA MODERNA**

(LAS TEMPERATURAS DADAS PUEDEN VARIAR SEGUN LAS REFINERIAS.)

**NORMAS PARA ALQUITRÁN DE CARRETERAS B.S. 76<sup>2</sup>**

	ALQUITRÁN TIPO A						ALQUITRÁN TIPO B			
	Viscosidades						Viscosidades			
E.v.t. (°C)	13-20	20-27	27-34	34-41	41-48	48-55	27-34	34-41	41-48	48-55
Viscosidad (S.T.V.) (segundos)	17,50	10-30	30-100	43-140	26-83	36-120	30-100	43-140	26-83	36-120
Temperatura de ensayo (°C)	20	30	30	35	45	50	30	35	45	50
Agua (% en peso máximo)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Destilación:										
a) Aceites que destilan por debajo de 200°C (% máximo en peso)	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
b) 200°-270°C (% en peso)	12-17	9-15	6-13	4-11	3-7	0,5-4	4-11	1-8	1-5	0,5-3
c) 270°-300°C (% en peso)	5-10	4-10	3-9	3-8	2-7	2-7	4-9	4-9	3-7	2-7
b)+c) (% máximo en peso)	27	23	20	17	13	10	16	13	11	9
Punto de reblandecimiento del residuo:										
Anillo y bola, máximo (°C)	52	52	52	52	54	56	46	46	48	50
Anillo y bola, mínimo (°C)	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Kraemer-Sarnow, máximo (°C)	44	44	44	44	46	48	38	38	40	42
Fenoles (% máximo en volumen)	5,0	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	3,0	2,5	2,0	1,5
Naftalenos (% máximo en peso)	6,0	5,0	4,5	4,0	3,5	2,5	4,0	3,5	2,5	2,5
Materia insoluble en tolueno (% máximo en peso)	21	22	23	24	25	26	23	24	25	26
Peso específico a 15,5°C/15,°C:										
Mínimo	1,090	1,100	1,110	1,120	1,125	1,135	1,110	1,120	1,125	1,135
Máximo	1,230	1,240	1,250	1,260	1,265	1,275	1,250	1,260	1,270	1,280

TABLA 1

Como en los productos asfálticos, las mezclas con alquitrán deben diseñarse en cuanto al contenido óptimo de alquitrán y agregado pétreo, mediante los métodos tradicionales para asfaltos, tales como compresión sin confinar, Marshall, Hveem, Hubbard Field.

En mezclas con alquitrán, se recomiendan las mezclas densas, y para el proyecto de estas existe un procedimiento que consiste en determinar las dosificaciones óptimas del mortero filler/alquitrán. Los ensayos de tensión y flexión simple realizados sobre mezclas filler/alquitrán, demuestran que el contenido óptimo de alquitrán de un mortero podía estimarse mediante un dispositivo sencillo donde se compacta el filler en estado seco y se le determina el por ciento de vacíos después de la compactación; para una gran variedad de filler el contenido óptimo de alquitrán era igual a la cantidad de alquitrán necesaria para rellenar los huecos de la masa seca compactada.

Aunque puede conseguirse un material denso mezclado con pétreo/alquitrán suficiente para rellenar los vacíos, el material resultante debe tener otras cualidades además de la densidad para que dé buen resultado como pavimento; debe tener una estabilidad mecánica suficiente para resistir a la deformación bajo los efectos del tráfico continuo; debe ser fácil de manejar y compactar. Sus cualidades en cuanto manejabilidad pueden valorarse mejor en las condiciones prácticas de trabajo en la carretera.

Al estudiar la forma en que deben modificarse las dosificaciones de los diversos componentes para obtener la máxima resistencia a la deformación, se puso atención, en primer lugar a las proporciones filler/alquitrán con los diversos tipos de filler, después de realizar pruebas de deformación y tensión con diversos contenidos de filler se encontró, que con menos alquitrán el material rompe después de una pequeña deformación, mientras que con más alquitrán la resistencia a la deformación disminuye rápidamente. Se llama a esta cantidad de alquitrán contenido óptimo de alquitrán para el filler estudiado.

El contenido óptimo de alquitrán de un filler fino, está determinado por su contenido de vacíos, las características de deformación de una mezcla alquitrán/filler son afectadas por el grado de finura del filler; cuanto más fino es este, mayor es el aumento de consistencia producida por la adición de una cantidad de filler. Como el filler desempeña un papel muy importante en las mezclas densas con alquitrán y su función es producir un gran incremento en la consistencia del alquitrán. Para determinar la efectividad del filler, se hace mediante un ensayo sencillo, que consiste en medir el volumen de una cantidad de filler de peso determinado después de sedimentar en benceno puro, cuanto mayor es este volumen más fino es el filler.

Se ha observado que por arriba del valor crítico del contenido del filler la resistencia a la deformación crece mucho más lentamente, y en la práctica no sería ventajoso utilizar contenidos elevados de filler, ya que presentaría mayor dificultad la mezcla en forma normal, se obtendría una mezcla casi tipo plástica.

Otra alternativa para mezclas con el alquitrán para carreteras, es utilizar en la mezcla agregados gruesos, para lo cual se determinó el contenido de alquitrán que da máxima resistencia a la deformación y se mantuvo constante la relación arena/filler, mientras se hacía variar el contenido de agregado grueso de 0 a 100%; con una relación de arena/filler de 3:1 y de grava natural de  $\frac{1}{2}$ " , que muestra la relación entre el contenido óptimo de alquitrán y el % de grava respecto al total del pétreo, el contenido de alquitrán será de 5.5% con respecto al peso del pétreo.

Un resumen del proyecto se anota en la forma siguiente:

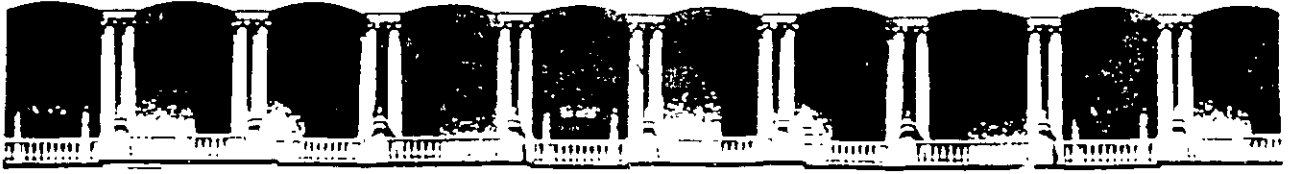
- Se selecciona un filler que tenga la densidad aparente mas baja posible al sedimentar en benceno, lo que asegurará que la mezcla alquitrán/filler tiene una buena resistencia a la deformación.
- Se mide el contenido de vacios al filler compactado para obtener:  
la proporción de alquitrán que debe asociarse con el filler  
la relación crítica mínima filler/arena
- El contenido de aglutinante del mortero arena/filler/alquitrán es proporcional a la relación de filler/arena
- El contenido de aglutinante de la mezcla total puede calcularse como un 5.5% con respecto al pétreo , juntamente con el necesario en el mortero arena/filiar/alquitrán

Resumen de las propiedades de las mezclas densas con alquitrán:

- La durabilidad de las mezclas densas con alquitrán es indudable cuando el material se extiende adecuadamente, de tal forma que este perfectamente cerrado al principio. Se ha demostrado que tiene una vida de quince años o más, y puede permitir construir pavimentos económicos y duraderos en carreteras en que la cimentación es adecuada y el tráfico no excesivamente pesado
- Como el aglutinante es alquitrán y la mezcla es impermeable, este tipo de pavimento es bastante resistente al reblandecimiento debido al derrame de aceites y solventes sobre la superficie de la carretera.
- El buen control de la temperatura durante la elaboración de la mezcla es importante, y un tendido requiere de personal experto que pueda extender y compactar la mezcla en un tiempo adecuado.

REFERENCIA:

MATERIALES BITUMINOSOS EN CONSTRUCCION DE CARRETERAS (ROAD RESEARCH LABORATORY)



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**“ DIPLOMADO EN SISTEMAS DE CALIDAD  
EN INGENIERÍA DE PROYECTO  
Y CONSTRUCCIÓN ”**

**MODULO II**

**CONTROL DE CALIDAD DE MATERIALES Y OBRAS**

**PARTE 2**

**SUPERVISION Y CONTROL DE CALIDAD DE OBRAS**

**TEMA:**

**PROPIEDADES Y PRUEBAS DE ACEPTACION DE MATERIALES  
(OTROS MATERIALES)**

**EXPOSITOR: ING. JORGE LOPEZ VICENTE  
1997**

# **DIPLOMADO EN SISTEMAS DE CALIDAD EN INGENIERIA DE PROYECTO Y CONSTRUCCION**

## **MODULO II**

**CONTROL DE CALIDAD DE MATERIALES Y OBRAS**

## **PARTE 2**

**SUPERVISION Y CONTROL DE CALIDAD DE OBRAS**

**INSTRUCTOR: ING. JORGE LOPEZ VICENTE**

## **TEMA**

### **PROPIEDADES Y PRUEBAS DE ACEPTACION DE MATERIALES**

Otros materiales: acero, madera, geotextiles y neoprenos.

### **NOTAS DEL INSTRUCTOR**

- 1 . Acero
- 2 Madera .
- 3 Apoyo integral de neopreno
- 4 Tela geotextil
- 5 Bibliografía

Octubre de 1997



## 1. ACERO

### 1.1 ACERO ESTRUCTURAL

- 1.1.1 Planchas
- 1.1.2 Perfiles estructurales
- 1.1.3 Tablaestacas
- 1.1.4 Barras
- 1.1.5 Perfiles-barras

### 1.2 ACERO ESTRUCTURAL AL CARBONO

- 1.2.1 Requisitos químicos
- 1.2.2 Requisitos mecánicos

### 1.3 ACERO ESTRUCTURAL DE ALTA RESISTENCIA

- 1.3.1 Requisitos químicos
- 1.3.2 Requisitos mecánicos

### 1.4 ACERO ESTRUCTURAL DE ALTA RESISTENCIA Y BAJA ALEACION

- 1.4.1 Requisitos químicos
- 1.4.2 Requisitos mecánicos

### 1.5 ACERO ESTRUCTURAL DE ALTA RESISTENCIA Y BAJA ALEACIÓN AL MANGANESO/VANADIO

- 1.5.1 Requisitos químicos
- 1.5.2 Requisitos mecánicos

### 1.6 ACERO DE REFUERZO PARA CONCRETO HIDRÁULICO

### 1.7 ALAMBRE DE ACERO ESTIRADO EN FRÍO PARA REFUERZO DE CONCRETO

### 1.8 ALAMBRE DE ACERO PARA PRESFUERZO DE CONCRETO

### 1.9 ACERO DE PRESFUERZO PARA CONCRETO, TORON DE SIETE ALAMBRES SIN RECUBRIMIENTO RELEVADO DE ESFUERZOS

### 1.10 MUESTREO

- 1.10.1 Muestreo de materiales y productos de acero para análisis químico
- 1.10.2 Muestreo de productos de acero para pruebas físicas
  - 1.10.2.1 Muestreo de barras y perfiles estructurales
  - 1.10.2.2 Muestreo de planchas y láminas
  - 1.10.2.3 Muestreo de varilla de acero de refuerzo para concreto
  - 1.10.2.4 Muestreo de acero de presfuerzo para concreto

- 1.11 PRUEBAS FISICAS
  - 1.11.1 Dimensiones de probetas
  - 1.11.2 Determinación del área de la sección transversal y los pesos unitarios de perfiles, planchas, barras-perfil, rieles y tubos
  - 1.11.3 Determinación de las corrugaciones en varillas de acero de refuerzo para concreto hidráulico
  - 1.11.4 Prueba de tensión
  - 1.11.5 Prueba de doblado
  - 1.11.6 Prueba de inspección metalúrgica macroscópica.

## **2. MADERA**

- 2.1 PILOTE DE MADERA
  - 2.1.1 Clasificación de pilotes de acuerdo con su uso
  - 2.1.2 Clasificación de pilotes de acuerdo con la cantidad de corteza que hay que retirarle.
  - 2.1.3 Pilotes clases A y B
  - 2.1.4 Pilotes clases C
- 2.2 MADERA ESTRUCTURAL
- 2.3 MUESTREO
- 2.4 PRUEBAS EN MADERA ESTRUCTURAL
  - 2.4.1 Flexión estática
  - 2.4.2 Compresión paralela a las fibras
  - 2.4.3 Compresión perpendicular a las fibras
  - 2.4.4 Dureza
  - 2.4.5 Esfuerzo contante
  - 2.4.6 Desgarramiento
  - 2.4.7 Tensión paralela a las fibras
  - 2.4.8 Tensión perpendicular a las fibras
  - 2.4.9 Peso volumétrico
  - 2.4.10 Contracción volumétrica

## **3. APOYO INTEGRAL DE NEOPRENO**

- 3.1 REQUISITOS QUE DEBE SATISFACER EL NEOPRENO
- 3.2 REQUISITOS QUE DEBEN SATISFACER LAS PLACAS DE ACERO INTERCALADAS EN EL APOYO Y LAS PLACAS DE CARGA

### **3.3 REQUISITOS QUE DEBEN SATISFACER LOS APOYOS DE NEOPRENO**

#### **3.4 MUESTREO**

3.4.1 Muestreo de materiales elastoméricos

3.4.2 Muestreo de apoyos de neopreno

#### **3.5 PRUEBAS EN EL MATERIAL ELASTOMÉRICO**

3.5.1 Tensión y alargamiento

3.5.1.1 Deformación permanente por tensión

3.5.2 Compresión

3.5.2.1 Deformación permanente por compresión

3.5.3 Desgarramiento

3.5.4 Envejecimiento acelerado

3.5.5 Pruebas de identificación

3.5.5.1 Reactivo número 1

3.5.5.2 Reactivo número 2

3.5.5.3 Reactivo número 3

3.5.5.4 Procedimiento

3.5.6 Resistencia al ozono

#### **3.6 PRUEBAS EN APOYOS DE NEOPRENO**

3.6.1 Verificación de la horizontalidad de las placas de acero en el apoyo de neopreno

3.6.2 Dureza

3.6.3 Compresibilidad

3.6.4 Resistencia máxima a la compresión

3.6.5 Compresión combinada con esfuerzo cortante. Módulo "G"

## **4. TELA GEOTEXTIL**

### **4.1 CLASIFICACIÓN Y USO**

4.1.1 Geotextiles Tejidos

4.1.2 Geotextiles no tejidos

### **4.2 REQUISITOS DE CALIDAD**

### **4.3 MUESTREO**

### **4.4 ENSAYES**

## **5. BIBLIOGRAFIA**

## 1. ACERO

Aleación de hierro y carbono en diferentes proporciones, a veces llega a contener hasta 2% de carbono; para mejorar algunas de sus propiedades se le adicionan otros elementos tales como :

Tungsteno	2.0 a 18.0 %
Cromo	3.0 a 6.0 %
Vanadio	1.0 a 3.0 %
Molibdeno	1.0 a 8.0 %
Cobalto	3.0 a 10.0 %

Con estos elementos y algunos otros se pueden modificar las características mecánicas del acero que prácticamente puede fabricarse cualquier tipo de acero para cada tipo de necesidad ; sin embargo, en este trabajo se tratará lo relativo al acero estructural, acero de refuerzo y de presfuerzo para concreto..

Los productos de acero estructural que se suministran para la construcción de puentes y edificios se clasifican en : acero estructural al carbono, acero estructural de alta resistencia, acero estructural de alta resistencia y baja aleación y acero estructural de alta resistencia y baja aleación, al manganeso / vanadio.

### 1.1 ACERO ESTRUCTURAL

Es un producto que se suministra en forma de planchas, perfiles estructurales, tablaestacas, barras y perfiles-barras.

#### 1.1.1 Planchas

Producto de acero laminado en caliente, que debe reunir las siguientes características :

Ancho en mm	Espesor en mm
Más de 203	Más de 5.8
Más de 1219	Más de 4.5

#### 1.1.2 Perfiles estructurales

Producto de acero laminado cuya sección transversal puede ser en forma de I, H, canal o ángulo, en donde la dimensión mayor debe ser como mínimo de 76mm.

#### 1.1.3 Tablaestacas

Acero laminado fabricado en formas y tamaños que permite que se empalmen entre sí para formar una pared continua.

#### **1.1.4 Barras**

Acero laminado con sección transversal circular, cuadrada o hexagonal, en todos los tamaños ; soleras con espesor mayor o igual a 5.16mm y ancho de 152mm ; soleras con espesor de 5.84mm y ancho de 152mm hasta 203mm.

#### **1.1.5 Perfiles-barras**

Producto de acero laminado cuya sección transversal puede ser de la forma I, H, Z, canal o ángulo, en donde la dimensión mayor debe ser menor de 76mm.

Los productos de acero estructural que se suministran para la construcción de puentes y edificios se clasifican en : acero estructural al carbono, acero estructural de alta resistencia, acero estructural de alta resistencia y baja aleación y acero estructural de alta resistencia y baja aleación al manganeso / vanadio.

### **1.2 ACERO ESTRUCTURAL AL CARBONO**

El acero estructural al carbono se suministra en la modalidad y formas de perfiles, planchas y barras, para construcciones remachadas, atornilladas o soldadas, en puentes y edificios y para usos estructurales en general.

#### **1.2.1 Requisitos químicos**

- a) El análisis de colada y de producto deberá cumplir con los requisitos indicados en la tabla LXIV.
- b) El análisis de producto no es aplicable a perfiles-barra ni a soleras, con espesores de 12.7mm o menores.
- c) Cuando se omitan las pruebas de tensión de acuerdo con el inciso c) de los requisitos mecánicos, el material deberá cumplir con los requisitos químicos de la tabla LXIV.

#### **1.2.2 Requisitos mecánicos**

El acero estructural al carbono deberá cumplir con los requisitos de la prueba de tensión indicada en la tabla LXV.

No será necesario someter a pruebas de tensión los perfiles con sección transversal menor de 6.45 cm<sup>2</sup> y las barras que no sean soleras, menores de 1.27 cm de espesor o de diámetro.

No se requieren pruebas mecánicas para planchas con espesores mayores de 38.1mm usadas como placas de apoyo en estructuras que no sean puentes, pero el acero deberá contener de 0.20 a 0.33% de carbono en análisis de colada.

Para materiales con espesor o diámetro menor de 7.9 mm deberá hacerse una deducción en el porcentaje de alargamiento, obtenido de probetas de 200 mm, de 1.25% por cada 0.8 mm de disminución en el espesor o diámetro especificado, respecto del espesor nominal de 7.9 mm. Para efectuar esta deducción puede emplear la ecuación del cuadro número 1.

La probeta para doblado deberá soportar un doblado en frío hasta de 180° sobre un mandril cuyo diámetro se indica en la tabla LXVI, sin que se agriete el exterior de la porción doblada.

### **1.3 ACERO ESTRUCTURAL DE ALTA RESISTENCIA**

El acero estructural de alta resistencia se presenta en las modalidades y forma de perfiles, planchas y barras en espesores hasta de 102 mm, para construcciones de puentes y edificios remachados o atornillados y para uso estructural en general.

#### **1.3.1 Requisitos químicos**

El acero estructural deberá cumplir con los requisitos de composición química indicados en la tabla número LXVII.

#### **1.3.2 Requisitos mecánicos**

También deberá cumplir con los requisitos mecánicos de las tablas LXVIII y LXIX.

Para materiales con espesor o diámetro menor de 7.9mm, deberá hacerse una deducción en el porcentaje de alargamiento, obtenido de probetas de 200mm, de 1.25% por cada 0.8mm de disminución en el espesor o diámetro especificado, respecto del espesor nominal de 7.9mm. La deducción se puede efectuar empleando la ecuación del cuadro número 1.

Las probetas para la prueba de doblado deberán soportar un doblado en frío hasta de 180° sobre un mandril, cuyo diámetro se especifica en la tabla LXIX, sin que se agriete el exterior de la porción doblada.

### **1.4 ACERO ESTRUCTURAL DE ALTA RESISTENCIA Y BAJA ALEACIÓN**

Bajo esta denominación se agrupan los perfiles, placas y barras de acero que se emplean en construcciones soldadas, remachadas o atornilladas, destinados principalmente a la construcción de miembros estructurales. Estos aceros tienen una resistencia a la corrosión atmosférica casi del doble que la de los aceros estructurales al carbono con cobre; deberá cumplir con los siguientes requisitos de composición química.

#### **1.4.1 Requisitos químicos**

Los resultados del análisis de colada deberá cumplir con los requisitos indicados en la tabla LXX.

El fabricante podrá usar los elementos de aleación, tales como cromo, níquel, silicio, vanadio, titanio y circonio, combinados con el carbono, manganeso, fósforo, azufre y cobre, dentro de los límites prescritos en la tabla LXX para obtener las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión atmosférica requeridas.

#### **1.4.2 Requisitos mecánicos**

El acero deberá satisfacer los requisitos de tensión y doblado indicadas en las tablas LXXI y LXXII.

Para materiales con espesor o diámetro menor de 7.9mm deberá hacerse una deducción en el porcentaje de alargamiento, obtenido de probetas de 200mm, de 1.25% por cada 0.8mm de disminución en el espesor o diámetro especificado, respecto del espesor nominal de 7.9mm. Para efectuar la deducción puede emplear la ecuación del cuadro número 1.

Las probetas para la prueba de doblado deberán soportar un doblado en frío hasta de 180° sobre un mandril, cuyo diámetro se especifica en la tabla LXXII, sin que se agriete el exterior de la porción doblada.

### **1.5 ACERO ESTRUCTURAL DE ALTA RESISTENCIA Y BAJA ALEACIÓN, AL MANGANESO/ VANADIO**

Bajo esta denominación se agrupan los perfiles, planchas y barras de acero que se emplean en construcciones soldadas, remachadas o atornilladas; destinados principalmente a la construcción de puentes y edificios soldados miembros estructurales. Estos aceros tienen una resistencia a la corrosión atmosférica casi del doble que la de los aceros estructurales al carbono. Los requisitos que a continuación se indican se refieren a elementos hasta de 203mm de espesor.

#### **1.5.1 Requisitos químicos**

Este acero deberá satisfacer los requisitos de composición química de colada y de producto, indicada en la tabla LXXIII.

#### **1.5.2 Requisitos mecánicos**

Por otra parte, este acero deberá cumplir con los requisitos mecánicos de la tabla LXXIV y LXXV.

Para materiales con espesor o diámetro menor de 7.9mm deberá hacerse una deducción en el porcentaje de alargamiento, obtenido de probetas de 200mm, de 1.25% por cada 0.8mm de disminución en el espesor o diámetro especificado, respecto del espesor nominal de 7.9mm. Para efectuar la deducción puede emplear la ecuación del cuadro número 1.

El acero deberá soportar un doblado en frío hasta de 180°, ensayado sobre un mandril, cuyo diámetro se especifica en la tabla LXXV, sin que se agriete la parte exterior de la porción doblada

CUADRO NUMERO 1.

ECUACIÓN : 
$$a = A - \left[ \frac{1.25(7.9 - e)}{0.8} \right]$$

a : porcentaje de alargamiento después de deducir el 1.25% por cada 0.8mm de disminución en el espesor o diámetro especificado, respecto del espesor de 7.9mm.

A : porcentaje de alargamiento obtenido de la prueba.

e : espesor de la probeta, menor de 7.9 mm.



TABLA LXIV REQUISITOS QUIMICOS

Producto	Perfiles (a)	Planchas Espesores					Barras Espesores			
		Hasta 19.1 mm incl.	Más de 19.1 hasta 38.1 mm incl.	Más de 38.1 hasta 63.5 mm incl.	Más de 63.5 hasta 101.6 mm incl.	Más de 101.6 mm.	Hasta 19.1 mm incl.	Más de 19.1 hasta 38.1 mm incl.	Más de 38.1 hasta 101.6 mm incl.	Más de 101.6 mm.
Carbono, máximo, % Manganeso, %.....	0.25	0.25	0.25 0.80 a 1.20	0.26 0.80 a 1.20	0.27 0.85 a 1.20	0.29 0.85 a 1.20	0.26	0.27 0.60 a 0.90	0.28 0.60 a 0.90	0.29 0.60 a 0.90
Fósforo, máximo, %	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Azufre, máximo, %	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Silicio, %.....				0.15 a 0.30	0.15 a 0.30	0.15 a 0.30				
Cobre, mínimo, % cuando se especi- fique.....	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

a) En perfiles con peso mayor de 634 kg/m, se requiere un contenido de manganeso de 0.85 a 1.35%, y un contenido de silicio de 0.15 a 0.30%.

TABLA LXV. REQUISITOS DE TENSION

Concepto	Requisitos
Planchas, perfiles (a) y barras: Esfuerzo máximo, kg/cm <sup>2</sup>	4 060 a 5 600
Limite elástico aparente, kg/cm <sup>2</sup> , mínimo	2 520 (b)
Planchas y barras: Alargamiento en 200 mm, por ciento, mínimo	20 (c)
Alargamiento en 50 mm, por ciento, mínimo	23
Perfiles: Alargamiento en 200 mm, por ciento, mínimo	20 (c)
Alargamiento en 50 mm, por ciento, mínimo	21 (a)

- a) Para perfiles de ala ancha, con peso mayor de 634 kg/m. solamente se especifica el esfuerzo máximo de 4 060 kg/cm<sup>2</sup> como mínimo y alargamiento en 50 mm, de 19% mínimo
- b) Para planchas con espesor mayor de 200 mm, el límite elástico será de 2 240 kg/cm<sup>2</sup>, mínimo.
- c) Ver párrafo (005-F.07.c) de este Capítulo.

TABLA LXVI REQUISITOS DE LA PRUEBA DE DOBLADO

Espesor del elemento en mm	Relación del diámetro del mandril al espesor de la probeta para planchas, perfiles y barras (a)
Hasta 19.1 incl.	0.5
Mayor de 19.1 hasta 25.4 incl.	1.0
Mayor de 25.4 hasta 38.1 incl.	1.5
Mayor de 38.1 hasta 50.8 incl.	2.5
Mayor de 50.8	3.0

- a) Estas relaciones se aplican únicamente para el comportamiento de un espécimen bajo la acción del doblado; dicho espécimen se toma siempre en dirección longitudinal y generalmente se le hace una preparación en sus aristas. Cuando las planchas se doblan para una operación de fábrica, se deben usar unos radios mayores, particularmente si el eje de doblado se encuentra en la dirección desfavorable (longitudinal).

TABLA LXVII. REQUISITOS DE COMPOSICION QUIMICA

ELEMENTOS	CONTENIDO EN %
Carbono, máximo.	0.28
Manganeso	1.10 a 1.60
Fósforo, máximo	0.04
Azufre, máximo	0.05
Silicio, máximo	0.30
Cobre, mínimo	0.20

TABLA LXVIII. REQUISITOS DE TENSION

Concepto	Planchas y Barras				Perfiles estructurales		
	Para espesores hasta de 19.1 mm. incl	Para espesores de más de 19.1 hasta 38.1 mm. incl.	Para espesores de más de 38.1 hasta 101.6 mm incl.	Para espesores de más de 101.6 hasta 203.2 mm. incl.	Grupos 1 y 2 (a)	Grupo 3 (a)	Grupos 4 y 5 (a)
Esfuerzo máximo, kg/cm <sup>2</sup> , mínimo (b)	4920	4710	4430	4220	4920	4710	4430
Punto de fluencia, en kg/cm <sup>2</sup> , mínimo (b)	3520	3230	2950	2810	3520	3230	2950
Alargamiento en 200 mm. en %, mínimo	18 (c)	18	18		18 (c)	18	18
Alargamiento en 50 mm, en %, mínimo		21	21	21			21 (d)

a) Ver Tabla XXIV-A

b) Cuando el material esté normalizado, el esfuerzo máximo y el límite elástico aparente, deberán reducirse en 350 kg/cm<sup>2</sup>

c) Véase párrafo (005-1.05.b) de este Capítulo. En perfiles de ala ancha, con peso mayor de 634 kg/m, el alargamiento - en 50 mm, deberá ser de 19% como mí

TABLA LXIX. REQUISITOS DE LA PRUEBA DE DOBLADO

Espesor del elemento	mm	Relación del diámetro del mandril al espesor de la probeta (a)
Hasta 19.1 inclusive		1.0
Mayor de 19.1 hasta 25.4 inclusive		1.5
Mayor de 25.4 hasta 38.1 inclusive		2.0
Mayor de 38.1 hasta 50.8 inclusive		2.5
Mayor de 50.8 hasta 101.6 inclusive		3.0

TABLA LXX. REQUISITOS QUIMICOS (ANALISIS DE COLADA)

ELEMENTO	CONTENIDO EN % TIPO I	CONTENIDO EN.% TIPO II
Carbono, máximo	0.15	0.20
Manganeso, máximo	1.00	1.35
Fósforo, máximo	0.15	0.04
Azufre, máximo	0.05	0.05
Cobre, máximo	0.20	0.20 (a)

TABLA LXXI. REQUISITOS DE TENSIÓN, PLACAS Y BARRAS.

Concepto	Planchas y Barras				Perfiles estructurales		
	Para espesores hasta de 19.1mm incl.	Para espesores de más de 19.1 hasta 8.1mm incl.	Para espesores de más de 38.1 hasta 101.6mm incl.	Para espesores de más de 101.6 hasta 203.2mm incl.	Grupos 1 y 2 (a)	Grupo 3 (a)	Grupos 4 y 5 (a)
Esfuerzo máximo, kg/cm <sup>2</sup> , mínimo (b)	4920	4710	4430	4220	4920	4710	4430
Punto de fluencia en kg/cm <sup>2</sup> , mínimo (b)	3520	3230	2950	2810	3520	3230	2950
Alargamiento en 200mm, en %, mínimo	18 (c)	18	18		18 (c)	18	18
Alargamiento en 50mm, en %, mínimo.		21	21	21			21 (d)

TABLA LXXII. REQUISITOS DE DOBLADO

Espesor del elemento material mm	Relación del diámetro del mandril al espesor de la probeta
Hasta de 19.1, inclusive	1.0
Mayor de 19.1 hasta 25.4, incl.	1.5
Mayor de 25.4 hasta 38.1	2.0
Mayor de 38.1 hasta 50.8	2.5
Mayor de 50.8 hasta 101.6, inclusive	3.0

TABLA LXXIII. REQUISITOS DE COMPOSICION QUIMICA

ELEMENTOS	CONTENIDO EN %
Carbono, máximo.	0.22
Manganeso	0.85 a 1.25
Fósforo, máximo	0.04
Azufre, máximo	0.05
Silicio, máximo	0.30
Cobre, mínimo	0.20
Vanadio, mínimo	0.02

**TABLA LXXIV. REQUISITOS DE TENSION**

Concepto	Planchas y Barras				Perfiles estructurales		
	Para espesores hasta de 19.1 mm incl	Para espesores de más de 19.1 hasta 38.1 mm incl.	Para espesores de más de 38.1 hasta 101.6 mm. incl.	Para espesores de más de 101.6 hasta 203.2 mm incl	Grupos 1 y 2 (a)	Grupo 3 (a)	Grupos 4 y 5 (a)
Esfuerzo máximo, kg/cm <sup>2</sup> , mínimo (b)	4920	4710	4430	4220	4920	4710	4430
Punto de fluencia, en kg/cm <sup>2</sup> , mínimo (b)	3520	3230	2950	2810	3520	3230	2950
Alargamiento en 200 mm, en %, mínimo	18 (c)	18	18		18 (c)	18	18
Alargamiento en 50 mm, en %, mínimo		21	21	21			21 (d)

a) Ver Tabla XXIV-A

b) Cuando el material esté normalizado, el esfuerzo máximo y el límite elástico aparente, deberán reducirse en 350 kg/cm<sup>2</sup> Véase párrafo (005-I 05 b) de este Capítulo. En perfiles de ala ancha, con peso mayor de 634 kg/m, el alargamiento en 50 mm, deberá ser de 19% como mínimo.

TABLA LXXV. REQUISITOS DE DOBLADO

Espesor del elemento material mm	Relación del diámetro del mandril al espesor de la probeta
Hasta de 19.1, inclusive	1.0
Mayor de 19.1 hasta 25.4, incl.	1.5
Mayor de 25.4 hasta 38.1, incl.	2.0
Mayor de 38.1 hasta 50.8, incl.	2.5
Mayor de 50.8 hasta 203.2, inclusive	3.0

a) Estas relaciones se aplican exclusivamente al comportamiento de un espécimen bajo la acción del doblado ; dicho espécimen se toma siempre en dirección longitudinal y generalmente se le hace una preparación en sus aristas. Cuando las planchas se doblan para una operación de fabricación se deben usar radios mayores, particularmente si el eje de doblado se encuentra en la dirección desfavorable (longitudinal).

## 1.6 ACERO DE REFUERZO PARA CONCRETO

El acero, varillas corrugadas y varillas corrugadas torcidas en frío, empleado como refuerzo del concreto armado, se fabrica a partir de lingotes, rieles o ejes.

Las varillas se identifican con el grado y el número. El grado es el valor del límite de fluencia del acero en  $\text{kg/mm}^2$ ; y el número, es el número de octavos de pulgada que indica el diámetro de la varilla. Los números de designación, pesos unitarios, dimensiones nominales y requisitos de corrugación se resúmen en las tablas XII y XIII; asimismo, la clasificación de acuerdo con los distintos grados de la varilla se indica en la tabla XIV.

El acero de refuerzo fabricado a partir de lingotes no deberá contener más de 0.625% de fósforo.

Las varillas corrugadas de acero deberán someterse a una inspección metalúrgica macroscópica, cuyos resultados deben ser congruentes con lo que se indica en las figuras 3 a 7.



d = Diámetro de la varilla  
 P = Longitud total de los defectos perimetrales  
 L = Longitud total de las grietas o defectos (Σ l)  
 l = Dimensión del defecto

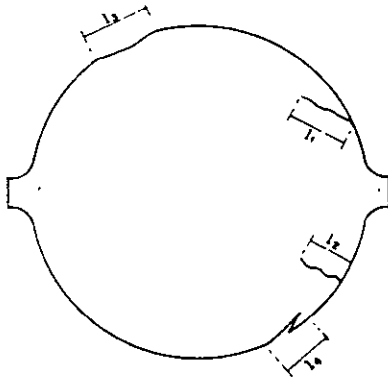


Figura Num. 3

DEFECTO	VALOR MÁXIMO PERMISIBLE
Grietas de laminación radiales o tangenciales (l <sub>1</sub> y l <sub>2</sub> )	Ninguna de las grietas deberá tener longitud l mayor del 5% de "d"; la longitud total de las grietas "L" no debe ser mayor del 10% de "d"
Traslape o tajeadura y defectos superficiales con reducción de área (l <sub>3</sub> y l <sub>4</sub> )	Ninguno de los traslapes, tajeaduras o defectos superficiales será mayor del 5% de "d". La suma de las longitudes "L" no debe ser mayor del 10% de "d". El perímetro total dañado "P" no debe ser mayor del 30% de "d"

d = DIÁMETRO DE LA VARILLA  
 A = ÁREA DE LA VARILLA  
 t = DIMENSIÓN MÁXIMA DEL DEFECTO

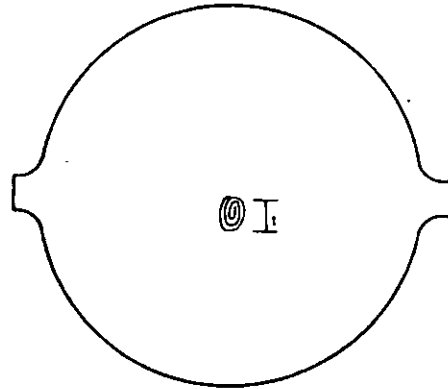


Figura Núm. 4

DEFECTO	VALOR MÁXIMO PERMISIBLE
Tubo de laminación, o rechupé "t"	La dimensión máxima del defecto "t", no debe ser mayor del 10% de "d". El área máxima del defecto no debe ser mayor del 1% de "A".

d = DIÁMETRO DE LA VARILLA  
 e = DIMENSIÓN DEL DEFECTO  
 E = LONGITUD TOTAL DE LAS GRIETAS (Σ e)

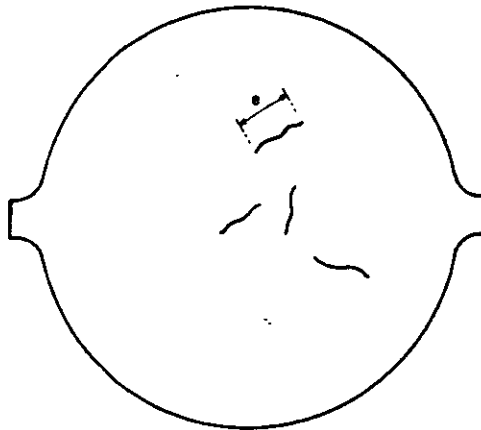


Figura Num. 5

DEFECTO	VALOR MÁXIMO PERMISIBLE
Grietas de enfriamiento "e" distribuidas en el interior de la sección transversal de la varilla	Ninguna de las grietas deberá tener una longitud "e" mayor del 4% de "d". La longitud total de las grietas "E" no será mayor del 8% de "d"

$d$  = DIAMETRO DE LA VARILLA  
 $A$  = AREA DE LA VARILLA  
 $i$  = DIMENSION MAXIMA DEL DEFECTO  
 $s$  = DISTANCIA ENTRE DEFECTOS

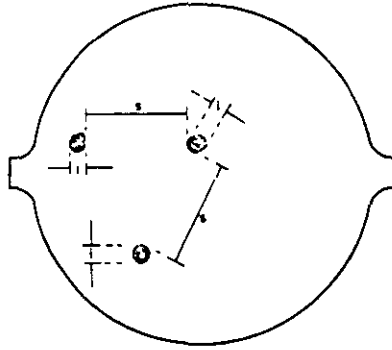


Figura Núm. 6

DEFECTO	VALOR MAXIMO PERMISIBLE
Inclusiones de materia extraña "i"	La dimensión máxima "i" de cada inclusión, no debe ser mayor del 3% de "d" y la suma de estas no deberá exceder del 10% de "d" o la suma de las áreas de las inclusiones no será mayor del 1% de "A". La distancia "s" entre inclusiones no será menor del 30% de "d".

$A$  = Área de la varilla  
 $d$  = Diámetro de la varilla  
 $p$  = Dimensión máxima del defecto  
 $s$  = Distancia entre defectos

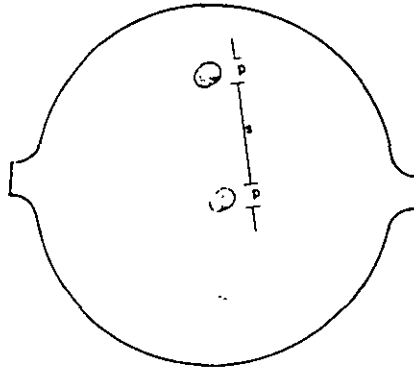


Figura Núm. 7.

DEFECTO	VALOR MAXIMO PERMISIBLE
Porosidad "p"	La distancia máxima de cada zona porosa "p" no debe ser mayor del 5% de "d" y la suma de estas no excederá del 20% de "d" o la suma de las áreas de las zonas porosas no deberá ser mayor del 1% de "A". La distancia "s" entre zonas porosas no será mayor del 30% de "d".

El acero deberá tener buena apariencia, sin defectos exteriores perjudiciales como grietas, traslapes, quemaduras y oxidación excesiva.

Las varillas corrugadas deberán cumplir con los requisitos de tensión, alargamiento y doblado indicadas en las tablas XV, XVI, XVII

Las corrugaciones de las varillas estarán espaciadas uniformemente a lo largo de la misma. El promedio de las separaciones entre corrugaciones no deberá exceder de  $7/10$  del diámetro de la varilla. Asimismo, las corrugaciones deben formar un ángulo con respecto al eje de la varilla, no menor de  $45^\circ$ . Cuando el ángulo formado está entre  $70^\circ$  y  $45^\circ$ , cada dos corrugaciones de ambos lados del eje de la varilla deben estar en dirección contraria; si el ángulo es mayor de  $70^\circ$ , no es necesario este cambio de dirección..

La separación entre los extremos de corrugaciones, sobre los lados opuestos de las varillas, no deberá ser mayor del 12.5% del perímetro nominal de la misma. Si los extremos terminan en una costilla longitudinal, el ancho de ésta se considera como la separación en cuestión. Cuando existan dos o más costillas longitudinales, el ancho total de todas ellas no debe ser mayor del 25% del perímetro nominal de la varilla.

El peso unitario y la sección transversal de las varillas, consideradas individualmente, no excederá del 6% en menos, con respecto a los valores nominales individuales indicados en las tablas XII y XIII.

Los requisitos de espaciamiento, altura, separación y demás dimensiones de las corrugaciones, se indican en las tablas XII y XIII.

TABLA XII.- NUMERO DE DESIGNACIÓN, PESOS UNITARIOS, DIMENSIONES NOMINALES Y REQUISITOS DE CORRUGACIÓN PARA LAS VARILLAS.

Número de Designación (b)	Peso unitario kg/m	Dimensiones nominales (a)			Requisitos de corrugación		
		Diámetro mm	Area de la sección transversal mm <sup>2</sup>	Perímetro mm	Espaciamiento máximo promedio mm	Altura mínima promedio mm	Distancia máxima entre extremos de corrugaciones transversales (cuerda) mm
2	0.248	6.4	32	20	4.5	0.2	2.5
2.5	0.384	7.9	49	24.8	5.6	0.3	3.1
3	0.560	9.5	71	29.8	6.7	0.4	3.7
4	0.994	12.7	127	39.9	8.9	0.5	5.0
5	1.552	15.9	198	50	11.1	0.7	6.3
6	2.235	19.0	285	60.0	13.3	1.0	7.5
7	3.042	22.2	388	69.7	15.5	1.1	8.7
8	3.973	25.4	507	79.8	17.8	1.3	10.0
9	5.033	28.6	642	89.8	20.0	1.4	11.2
10	6.225	31.8	794	99.9	22.3	1.6	12.5
11	7.503	34.9	957	109.8	24.4	1.7	13.7
12	8.938	38.1	1140	119.7	26.7	1.9	15.0

a) El diámetro nominal de una varilla corrugada corresponde al diámetro de una varilla lisa que tenga el mismo peso unitario que la varilla corrugada.

b) El número de designación de las varillas corresponde al número de octavos de pulgadas de su diámetro nominal.

1

1

TABLA XIII. NUMERO DE DESIGNACION, PESO UNITARIO, DIMENSIONES NOMINALES Y REQUISITOS DE CORRUGACIÓN PARA LAS VARILLAS TORCIDAS EN FRIO.

Número de designación (b)	Dimensiones Nominales (a)				Requisitos para las corrugaciones						
					Transversales					Longitudinales	
	Peso unitario kg/m	Diámetro mm	Perímetro mm	Área de la sección transversal mm <sup>2</sup>	Altura mínima a la mitad de la corrugación mm	Altura mínima a los tercios de la corrugación mm	Espaciamiento entre corrugaciones mm	Ancho mínimo mm	Longitud mínima mm	Altura mínima mm	Ancho mínimo mm
2	0.248	6.4	20	32	0.5	0.4	3.9 a 4.5	0.6	12.8	0.6	0.6
2.5	0.348	7.9	24.8	49	0.6	0.5	4.9 a 5.5	0.8	15.8	0.8	0.8
3	0.560	9.5	29.8	71	0.7	0.6	5.8 a 6.7	1.0	19.0	1.0	1.0
4	0.994	12.7	39.9	127	0.9	0.8	7.8 a 8.9	1.3	25.4	1.3	1.3
5	1.552	15.9	50.0	198	1.1	1.0	9.7 a 11.1	1.6	31.8	1.6	1.6
6	2.235	19.0	60.0	285	1.3	1.1	11.7 a 13.3	1.9	38.0	1.9	1.9
7	3.042	22.2	69.7	388	1.6	1.3	13.7 a 15.5	2.2	44.4	2.2	2.2
8	3.973	25.4	79.8	507	1.8	1.5	15.6 a 17.8	2.5	50.8	2.5	2.5
9	5.033	28.6	89.8	642	2.0	1.7	17.6 a 20.0	2.9	57.2	2.9	2.9
10	6.225	31.8	99.9	794	2.2	1.9	19.6 a 22.3	3.2	63.6	3.2	3.2
11	7.503	34.9	109.8	957	2.4	2.1	21.5 a 24.5	3.5	69.8	3.5	3.5
12	8.938	38.1	119.7	1140	2.7	2.2	23.4 a 26.7	3.8	76.2	3.8	3.8

a) El diámetro nominal de una varilla torcida corresponde al diámetro de una varilla lisa que tenga el mismo peso unitario que la varilla torcida.

b) Los números de designación de las varillas torcidas en frío corresponden al número de octavos de pulgada de su diámetro nominal.

TABLA XIV. GRADOS DE VARILLAS CORRUGADAS DE ACERO

PROCEDENCIA	GRADOS		
De lingotes	30	42	52
De rieles	35	42	
De ejes	30	42	
Torcidas en frío	42	50	60

TABLA XV. REQUISITOS A LA TENSION DE VARILLAS CORRUGADAS

Concepto	Varillas procedentes de lingotes			Varillas procedentes de rieles		Varillas procedentes de ejes		Varillas torcidas en frío		
	Grado 30	Grado 42	Grado 52	Grado 35	Grado 42	Grado 30	Grado 42	Grado 42	Grado 50	Grado 60
Límite de fluencia, en kg/cm <sup>2</sup> , mínimo	3000	4200	5200	3500	4200	3000	4200	4200	5000	6000
Esfuerzo máximo, en kg/cm <sup>2</sup> , mínimo	5000	6300	7000	5600	6300	5000	6300	5200	6000	7000

TABLA XVI. REQUISITOS DE ALARGAMIENTO MÍNIMO EN PORCIENTO, EN LA PRUEBA DE TENSIÓN DE VARILLAS CORRUGADAS (a).

Número de designación	Varillas procedentes de lingote			Varillas procedentes de rieles		Varillas procedentes de ejes		Varillas torcidas en frío		
	Grado 30	Grado 42	Grado 52	Grado 35	Grado 42	Grado 30	Grado 42	Grado 42	Grado 50	Grado 60
2	11	9	8	6	6	11	8	8	8	8
2.5	11	9	8	6	6	11	8	8	8	8
3	11	9	8	6	6	11	8	8	8	8
4	12	9	8	7	6	12	8	8	8	8
5	12	9	8	7	6	12	8	8	8	8
6	12	9	8	7	6	12	8	8	8	8
7	11	8	7	6	5	11	8	8	8	8
8	10	8	7	5	4.5	10	7	8	8	8
9	9	7	7	5	4.5	9	7	8	8	8
10	8	7	7	5	4.5	8	7	8	8	8
11	7	7	5	5	4.5	7	7	8	8	8
12	7	7	5	5	4.5	7	7	8	8	8

a) El por ciento de alargamiento se refiere a una longitud calibrada de 200mm.

TABLA XVII. REQUISITOS PARA LA PRUEBA DE DOBLADO DE VARILLAS CORRUGADAS.

Número de designación	Varillas procedentes de lingotes Dobleza a:			Varillas procedentes de rieles Dobleza a:		Varillas procedentes de ejes Dobleza a:		Varillas torcidas en frío Dobleza a:		
	180°		90°	180°		180°		180°		
	Grado 30	Grado 42	Grado 52	Grado 35	Grado 42	Grado 30	Grado 42	Grado 42	Grado 50	Grado 60
2	D=4d	D=4d	D=5d	D=6d	D=6d	D=4d	D=4d	D=4d	D=6d	D=6d
2.5	D=4d	D=4d	D=5d	D=6d	D=6d	D=4d	D=4d	D=4d	D=6d	D=6d
3	D=4d	D=4d	D=5d	D=6d	D=6d	D=4d	D=4d	D=4d	D=6d	D=6d
4	D=4d	D=4d	D=5d	D=6d	D=6d	D=4d	D=4d	D=4d	D=6d	D=6d
5	D=4d	D=4d	D=5d	D=6d	D=6d	D=4d	D=4d	D=4d	D=6d	D=6d
6	D=5d	D=5d	D=6d	D=6d	D=6d	D=5d	D=5d	D=5d	D=7d	D=7d
7	D=5d	D=6d	D=7d	D=6d	D=6d	D=5d	D=6d	D=5d	D=7d	D=7d
8	D=5d	D=6d	D=7d	D=6d	D=6d	D=5d	D=6d	D=5d	D=7d	D=7d
9	D=5d	D=8d	D=8d	D=8d	D=8d	D=5d	D=8d	D=6d	D=8d	D=8d
10	D=5d	D=8d	D=8d	D=8d	D=8d	D=5d	D=8d	D=6d	D=8d	D=8d
11	D=5d	D=8d	D=8d	D=8d	D=8d	D=5d	D=8d	D=6d	D=8d	D=8d
12	D=5d	D=8d	D=8d	D=8d	D=8d	D=5d	D=8d	D=6d	D=8d	D=8d

D = Diámetro del mandril

d = Diámetro nominal de la varilla.



## 1.7 ALAMBRE DE ACERO ESTIRADO EN FRÍO PARA REFUERZO DE CONCRETO

El acero de refuerzo estirado en frío también se emplea en mallas para refuerzo de concreto ; se identifica por un número de calibre, tal como se indica en la tabla XVIII.

El alambre estirado en frío se obtiene a partir de alambroón laminado en caliente, procedente de lingote o palanquilla ; debe cumplir con los siguientes requisitos de tensión determinados empleando su área nominal.

Límite de fluencia, mínimo	5 000 kg/cm <sup>2</sup>
Esfuerzo máximo, mínimo	5 700 kg/cm <sup>2</sup>
Reducción de área, mínima	30 %

Si el esfuerzo máximo del alambre es mayor de 7 000 kg/cm<sup>2</sup>, la reducción de área no deberá ser menor de 25%.

La probeta para doblado deberá soportar un doblado en frío de 180° sobre un mandril, cuyo diámetro se indica en la tabla XIX.

El diámetro del alambre tendrá una tolerancia de  $\pm 3\%$  y la diferencia entre los diámetros máximos y mínimos, medidos en cualquier sección transversal, no deberá ser menor de 5%.

El acero estructural, acero de refuerzo y el alambre deberán tener una buena apariencia, sin defectos perjudiciales y satisfacer los siguientes requisitos de la inspección metalúrgica macroscópica.

Grietas de laminación radiales o tangenciales.- ninguna de las grietas deberá tener a una longitud mayor del 5% con respecto al diámetro de la varilla, y la longitud total de las grietas no deberá ser mayor del 10%.

Traslapes o lajeaduras y defectos superficiales con reducción de área.- ninguno de los traslapes, lajeaduras o defectos superficiales será mayor del 5% con respecto al diámetro de la varilla. La suma de las longitudes de estos defectos no deberá ser mayor del 10%. El perímetro total dañado no deberá ser mayor del 30% respecto del diámetro de la varilla.

Tubos de laminación o rechupe.- La dimensión máxima de este defecto no deberá ser mayor del 10% respecto del diámetro de la varilla. El área máxima del defecto no debe ser mayor del 1% respecto del área de la varilla.

Grietas de enfriamiento distribuidas en la sección transversal de la varilla.- ninguna de las grietas deberá tener una longitud mayor del 4% respecto del diámetro de la varilla y la longitud total de las mismas no será mayor del 8%.

Inclusiones de materias extrañas.- La dimensión máxima de cada inclusión no deberá ser mayor del 3% respecto del diámetro de la varilla y la suma de éstas no deberá exceder del 10%

o la suma de las áreas de las inclusiones no será mayor del 1% respecto del área de la varilla. La distancia entre inclusiones no será menor del 30% del diámetro.

Porosidad.- La distancia máxima de cada zona porosa no debe ser mayor de 5% del diámetro de la varilla y la suma de éstas no excederá del 20%, o la suma de las áreas de las zonas porosas no deberá ser mayor del 1% del área de la varilla. La distancia entre zonas porosas no será mayor del 30% del diámetro.

**TABLA XIX. MANDRILES PARA LA PRUEBA DE DOBLADO DEL ALAMBRE DE ACERO ESTIRADO EN FRÍO.**

Diámetro del alambre en mm	Diámetro del mandril
Menor o igual a 8	d*
Mayor de 8	2 d*

### **1.8 ALAMBRE DE ACERO PARA PRESFUERZO DE CONCRETO**

Alambre redondo de acero de alto carbono, sin recubrimiento y relevado de esfuerzo, obtenidos por el proceso de estirado en frío; se usa generalmente en la construcción de concreto presforzado.

Se obtiene mediante estiramiento en frío a partir de producto laminado en caliente hasta alcanzar su diámetro nominal, después se somete a un tratamiento térmico continuo para relevarlo de esfuerzos, a fin de obtener las características deseadas.

El acero deberá cumplir con los requisitos químicos, en el análisis de colada, indicadas en la tabla XX; asimismo, deberá cumplir con las tolerancias de la tabla XXI para análisis de producto con respecto del análisis de colada de la tabla XX.

Por otra parte, el alambre deberá cumplir con los requisitos mecánicos, tensión, alargamiento y doblado, señalados en las tablas XXII, XXIII y XXIV respectivamente.

El límite de fluencia debe determinarse por el método "offset" para una deformación unitaria de 0.2%. También puede determinarse mediante el método de extensión bajo carga para una deformación unitaria de 1.0%.

En la prueba de doblado, deberá resistir sin agrietarse ni romperse dos pruebas de doblado, en planos perpendiculares entre sí. Cada prueba consistirá de cinco doblados alternados a 90° sobre mandriles cilíndricos cuyos diámetros se indican en la tabla XXIV. Un doblado es la

acción de llevar el alambre desde su posición inicial hasta formar un ángulo de 90° y retornar a su posición original.

Cada muestra de alambre deberá practicársele una inspección metalúrgica macroscópica, cuyos resultados deberán mostrar la estructura del acero con gran uniforme en toda el área, estar libre de grietas en cualquier dirección y de otros defectos perjudiciales.

El diámetro de cualquier sección del alambre no deberá variar en  $\pm 0.05$  mm con respecto al diámetro nominal ; asimismo, la diferencia entre los diámetros máximo y mínimo no deberá ser mayor de 0.05 mm .

El alambre deberá ser autodesenrollable. Cuando se coloque libremente sobre una superficie plana, deberá tener una flecha no mayor de 20 cm en una longitud de 5 m. Deberá presentar buen acabado, esto es, no deberá presentar dobleces ni torceduras, estar aceitado o engrasado, picaduras notables producto de la oxidación a simple vista y coloración no uniforme.

TABLA XX. REQUISITOS QUIMICOS

Elemento	Contenido en por ciento
Carbono	0.72 a 0.93
Manganeso	0.40 a 1.10
Fósforo	0.04, máximo
Azufre	0.05, máximo
Silicio	0.10 a 0.35

TABLA XXI. VARIACIONES PERMISIBLES EN ANÁLISIS DE PRODUCTO

Elemento	Tolerancias en más para límites máximos y en menos para límites mínimos, en por ciento
Carbono	0.04
Manganeso	0.06
Fósforo	0.008
Azufre	0.008
Silicio	0.02

TABLA XXII. REQUISITOS DE RESISTENCIA A TENSION

Diámetro mm	Límite de fluencia, mínimo kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia máxima, mínimo kg/cm <sup>2</sup>
2.0	17 600	22 000
5.0	14 000	17 500
7.0	13 200	16 500

TABLA XXIII. REQUISITOS DE ALARGAMIENTO

Diámetro mm	Longitud de calibración mm	Alargamiento mínimo (después de la ruptura) en por ciento
2.0	20	4.0
5.0	180	3.5
7.0	250	3.5

TABLA XXIV. REQUISITOS DE DOBLADO

Diámetro mm	Diámetro del mandril mm
2.0	10
5.0	30
7.0	40

### 1.9 ACERO DE PRESFUERZO PARA CONCRETO. TORON DE SIETE ALAMBRES SIN RECUBRIMIENTO, RELEVADO DE ESFUERZOS.

El torón está formado por seis alambres colocados en forma helicoidal sobre un alambre central con un paso uniforme no menor de 12 a 16 veces el diámetro nominal del torón

El torón para concreto presforzado se clasifica en dos grupos de acuerdo con resistencia.

Grado 176	(176 kg/mm <sup>2</sup> = 1725 N/mm <sup>2</sup> )
Grado 190	(190 kg/mm <sup>2</sup> = 1860 N/mm <sup>2</sup> )

Se fabrica con alambre redondo de acero de alto carbono, sin recubrimiento, obtenidos por el proceso de estirado en frío; el trenzado de los alambres se realiza exclusivamente por medios mecánicos y tratamiento térmico de relevado de esfuerzos.

La prueba de resistencia deberá realizarse mediante el método de deformación bajo carga, considerando una deformación del 1.0%, cuyos resultados estarán de acuerdo con los requisitos de resistencia a la ruptura y de fluencia indicados en la tabla 1. La resistencia de fluencia no deberá ser menor del 85% de la de ruptura mínima especificada.

El alargamiento total del torón bajo carga debe ser como mínimo de 3.5%

Se considera que una muestra satisface los requisitos de alargamiento si la probeta rompe fuera de la zona de ubicación del extensómetro o en las mordazas y que sin embargo, cumple con los valores mínimos de alargamiento.

Si cualquier probeta rompe dentro de las mordazas o del dispositivo de sujeción de la máquina de prueba y los valores de resistencia de ruptura, de fluencia o de alargamiento resultan ser menores a los especificados, deben invalidarse los resultados y repetirse la prueba.

El diámetro del torón debe expresarse como el diámetro, en mm y el diámetro del alambre central debe ser mayor que el de cualquier alambre exterior.

El diámetro nominal para torones del grado 176 debe tener una tolerancia de  $\pm 0.40$ mm y para el grado 190 de  $+0.66$  a  $-0.15$ mm, medido en la corona de los alambres.

Las variaciones en el área de la sección transversal y la variación en los esfuerzos, como consecuencia de lo anterior, no debe ser motivo de rechazo, siempre y cuando las diferencias en el diámetro de los alambres individuales y el del torón estén dentro de las tolerancias especificadas.

Los torones relevados de esfuerzos y de bajo relajamiento, de dimensiones especiales con diámetros nominales hasta 19.0mm, pueden emplearse, siempre y cuando la resistencia de ruptura se defina y que la resistencia de fluencia no sea menor de 85% y 90% de la resistencia de ruptura mínima especificada para torones relevados de esfuerzos y de bajo relajamiento, respectivamente.

Los torones deben tener un diámetro uniforme, buen acabado y sin defectos perjudiciales. No se permiten juntas y traslapes en cualquier longitud.

Los torones no deben presentar los alambres fuera de posición después de un corte, cuando este se haga sin sujetadores. Si los alambres quedan fuera de posición y sin embargo pueden ser regresados manualmente, este hecho no deberá considerarse como defecto.

Los torones no deben estar aceitados o engrasados. Tampoco deben presentar picaduras visibles producto de la oxidación. Una oxidación ligera, no debe ser motivo de rechazo

TABLA 1. CARACTERISTICAS Y REQUISITOS MECANICOS DE TORONES DE SIETE ALAMBRES

Diámetro nominal		Diferencia mínima entre los alambres central y exterior	Area nominal	Peso nominal *aproximado	Carga inicial		Carga mínima al 1% (límite de fluencia)		Carga a la ruptura	
in	mm				mm	mm <sup>2</sup>	kg/1 000m	N	kgf	N
<b>Grado 176</b>										
1/4	6.35	0.025	23.22	182	4 000	410	34 000	3 470	40 000	4 080
5/16	7.94	0.038	37.42	294	6 500	660	54 700	5 580	64 500	6 580
3/8	9.53	0.051	51.61	405	8 900	910	75 600	7 710	89 000	9 070
7/16	11.11	0.063	69.68	548	12 000	1 220	102 300	10 430	120 100	12 250
1/2	12.70	0.076	92.90	730	16 000	1 630	136 200	13 880	160 100	16 330
0.6	15.24	0.102	139.35	1 094	24 000	2 450	204 200	20 820	240 200	24 500
<b>Grado 190</b>										
3/8	9.53	0.051	54.84	432	10 200	1 040	87 000	8 870	102 300	10 430
7/16	11.11	0.063	74.19	582	13 800	1 410	117 200	11 950	137 900	14 060
1/2	12.70	0.076	98.71	775	18 400	1 870	156 100	15 920	183 700	18 730
0.6	15.24	0.102	140.00	1 102	26 100	2 660	221 500	22 590	260 700	26 580

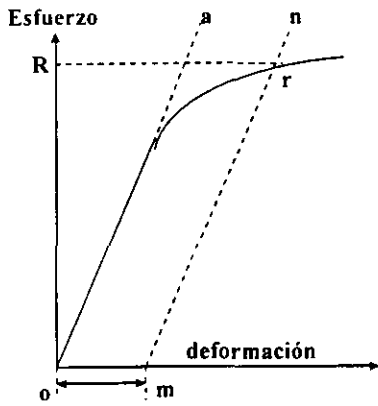


Fig. 20 diagrama esfuerzo-deformación para la determinación del límite de fluencia por el método de la deformación permanente

$\overline{om}$  = deformación permanente especificada.

Fig. 21. diagrama esfuerzo-deformación mostrando la zona de fluencia - en el quiebre de la curva.

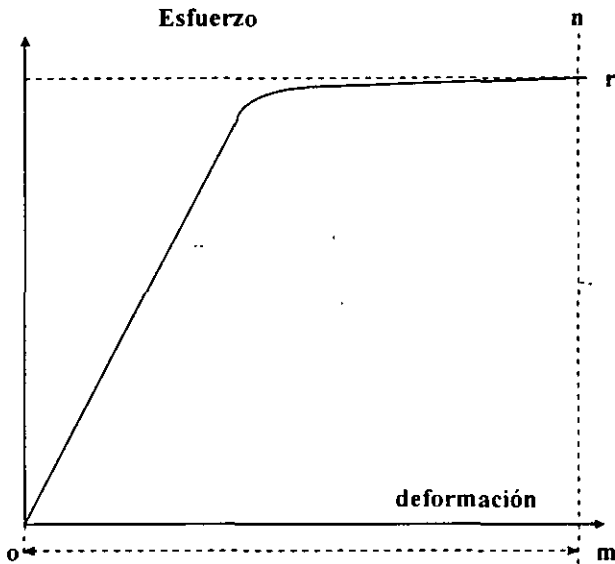
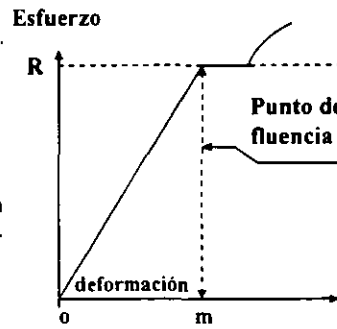


Fig. 22.<sup>4</sup> diagrama esfuerzo-deformación mostrando el límite de fluencia o el límite elástico aparente por el método de alargamiento bajo carga.

$\overline{om}$  = alargamiento especificado bajo carga.

## **1.10 MUESTREO**

### **1.10.1 MUESTREO DE MATERIALES Y PRODUCTOS DE ACERO PARA ANALISIS QUIMICO**

Las muestras se obtendrán con algún tipo de herramienta sin el empleo de agua, aceite o algún otro lubricante y deberán estar libres de costras, metal superficial, grasa, polvo u otras sustancias extrañas. La muestra consistirá de rebaba o viruta ; deberán ser uniformes, bien mezcladas y libres de polvo. El tamaño de la viruta deberá ser aquel que se retenga en la malla número 16 y las rebabas no ser largas ni enroscadas. Para análisis de producto se suministrarán, cuando sea posible, las piezas con la sección original completa.

Las muestras en planchones, redondos, cuadrados y perfiles, deberán ser tomadas en cualquier punto medio, entre el exterior y el centro de la pieza, con taladros paralelos entre sí; si esto no es posible, la muestra deberá tomarse lateralmente hacia el centro.; cabe señalar que únicamente es aprovechable las rebabas que corresponden a la porción media entre el exterior y el centro. Para las planchas, perfiles y barras, si no es aplicable el procedimiento de muestreo descrito anteriormente, la muestra deberá tomarse maquinando la sección completa, o si esto no es posible, barrenando completamente a través del material en un punto medio entre dos aristas.

### **1.10.2 MUESTREO DE PRODUCTOS DE ACERO PARA PRUEBAS FISICAS**

El muestreo de producto de acero para las pruebas físicas correspondientes, consiste en la obtención de muestras representativas de lotes de acero estructural, acero de refuerzo, alambres y barras de presfuerzo. El término lote se refiere a todos los productos de las mismas características y tamaño que corresponden a una colada o a un embarque.

#### **1.10.2.1 Muestreo de barras y perfiles estructurales.**

Por cada lote de 30 toneladas o menos, se tomarán dos muestras consistentes en tramos de 60cm. En caso de lotes mayores de 30 toneladas, deberá tomarse además una muestra por cada 30 toneladas adicionales o fracción. Las muestras se cortarán con segueta o equipo de oxiacetileno, eliminando de las piezas los extremos defectuosos.

#### **1.10.2.2 Muestreo de planchas y láminas**

Por cada lote de 30 toneladas o menos, se tomará una muestra. En el caso de lotes mayores de 30 toneladas, deberá tomarse una muestra por cada 30 toneladas adicionales o fracción. Las muestras deberán ser de 60cm de longitud en el sentido de la laminación, por el ancho completo de la pieza cuando éste sea de 20 a 30 cm. Para anchos menores deberá duplicarse la longitud de las muestras. Para anchos mayores de 30cm deberá limitarse la longitud de la muestra a 60 cm. El corte se hará con segueta o equipo de oxiacetileno.



### **1.10.2.3 Muestreo de varillas de acero de refuerzo para concreto.**

Por cada lote de varillas, hasta de 10 toneladas, se tomarán 4 muestras. Para lotes mayores de 10 toneladas, deberán tomarse además de las 4 primeras muestras, una muestra por cada 10 toneladas o fracción. Las muestras se cortarán con segueta o equipo de oxiacetileno, con una longitud de 1.20m, procurando que sean de los extremos de las varillas.

### **1.10.2.4 Muestreo de acero de presfuerzo para concreto**

Para cada rollo de alambre se deberá tomar una muestra de 120cm de longitud. Las muestras deberán cortarse con tijeras o cizalla, descartando 1m del extremo del rollo y para cada 20 toneladas de torón se deberá tomar una muestra, descartando cualquier probeta en donde se encuentre una junta de alambre.

## **1.11 PRUEBAS FISICAS**

### **1.11.1 Dimensiones de probetas**

Para ensayar muestras de barras, perfiles estructurales, planchas y láminas, es necesario efectuar algunas preparaciones para obtener los resultados confiables esperados. La longitud de calibración para determinar tensión y alargamiento, en ningún caso será menor de 25mm. Las probetas para ensayar materiales metálicos planos con espesores nominales iguales o mayores de 5mm, deberán tener una longitud total de 450mm, longitud de la zona de sección reducida de 225mm, longitud de cada zona de sujeción de 75mm y longitud calibrada de 200mm  $\pm 0.2$ mm ; el ancho de la zona de sujeción será de 50mm y el ancho de la sección reducida de 40mm  $\pm 2$ mm ; el espesor de la probeta deberá ser el espesor original del material y el radio de la zona de transición será de 25mm.

Consideraciones que deben tenerse en cuenta para la elaboración de probetas con una longitud total de 450mm :

- 1.-Deberán marcarse los puntos para medir el alargamiento dentro de la zona de sección reducida.
- 2.-Es posible emplear una probeta más angosta. En tal caso deberá ser tan grande como lo permita el ancho del material bajo carga. Si el ancho del material es menor o igual de 40mm, los lados serán paralelos en toda la longitud de la probeta.
- 3.-Los anchos de los extremos de la sección reducida no diferirán entre sí en más de 0.10mm. Puede haber una reducción gradual del ancho desde los extremos al centro, pero el ancho en cualquiera de los extremos no será mayor en 0.4mm, que el ancho en el centro.
- 4.-El espesor mínimo de las probetas será de 5mm.

- 5.-Se permite un radio mínimo de 13mm en las zonas de transición para probetas de acero con una resistencia máxima menor de 7 000 kg/cm<sup>2</sup>, siempre y cuando se utilice una fresadora para el maquinado de la zona de sección reducida.
- 6.-La zona de sujeción deberá tener una longitud mínima equivalente a las dos terceras partes de la longitud de las mordazas.
- 7.-Los extremos de la probeta serán simétricos en el eje de la zona de sección reducida con tolerancia de 2.5mm.

Las probetas para ensayar materiales metálicos planos tipo lámina, con espesores nominales desde 0.1mm hasta 16mm, deberán tener una longitud total de 200mm, longitud de la zona de sección reducida de 60mm, longitud de cada zona de sujeción de 50mm y longitud calibrada de 50mm  $\pm$ 0.1mm ; el ancho de la zona de sujeción será de 20mm y el ancho de la sección reducida de 12.5mm  $\pm$ 2mm ; el espesor de la probeta deberá ser el espesor original del material y el radio de la zona de transición será de 13mm.

Consideraciones que deben tenerse en cuenta para la elaboración de probetas con una longitud total de 200mm :

- 1.-Es posible emplear una probeta más angosta ; en tal caso deberá ser tan grande como lo permita el ancho del material bajo carga. Si el ancho del material es menor o igual de 13mm, los lados serán paralelos en toda la longitud de la probeta.
- 2.-Los anchos de los extremos de la sección reducida no diferirán entre sí en más de 0.05mm. Puede haber una reducción gradual del ancho desde los extremos al centro, pero el ancho en cualquiera de los extremos no será mayor en 0.10mm, que el ancho en el centro.
- 3.-El espesor máximo de las probetas será de 16mm.
- 4.-La zona de sujeción deberá tener una longitud mínima equivalente a las dos terceras partes de la longitud de las mordazas. Si el espesor de la probeta es mayor de 10mm pueden necesitarse mordazas y zonas de sujeción más largas, para prevenir fallas en estas zonas.
- 5.-Los extremos de la probeta serán simétricos en el eje de la zona de sección reducida con tolerancia de 0.25mm ; sin embargo, puede considerarse satisfactoria una tolerancia de 1mm en la simetría de las probetas de acero, excepto en pruebas de peritaje.

Las probetas de alambres y varillas redondas tendrán la sección original siempre que sea posible. La longitud de calibración para alambres con diámetro menor de 6 mm deberá apegarse a las especificaciones del producto. El ensaye de alambres con diámetros de 6 mm o mayor, deberá usarse una longitud de calibración de cuatro veces su diámetro. La longitud total de la probeta será como mínimo igual a la de calibración mas lo que se requiera par sujeción.

En alambres, varillas y barras de sección octagonal, hexagonal o cuadrada así como en varillas y barras de sección redonda cuando no se puedan obtener las probetas descritas en el párrafo anterior. Las probetas con la sección original del material pueden ser reducidas ligeramente en la zona de prueba con lija o maquinado, lo suficiente para provocar la fractura en las marcas de calibración. Para material que no exceda de 4.8 mm de diámetro o de distancia entre caras planas, el área de la sección transversal puede reducirse como máximo un 10% del área original, sin cambiar la forma de la sección transversal. Para material mayor de 4.8 mm de diámetro o de distancia entre caras planas, el diámetro o la distancia entre caras planas del material puede reducirse como máximo 0.25 mm sin que cambia la forma de la sección transversal. Los alambres o varillas cuadradas, hexagonales o octagonales que no excedan de 4.8 mm entre caras planas, pueden tornearse a redondas, de manera que quedan con una área de sección transversal no menor del 90% del área del círculo inscrito. Las transiciones entre la zona de sección reducida y las zonas de sujeción, se harán preferiblemente con un radio de 10 mm pero no menor de 3 mm. Las varillas de sección cuadrada, hexagonal u octagonal de más de 4.8 mm entre caras planas pueden tornearse a redondas, de manera que queden con un diámetro no menor de 0.25 mm menos que la distancia original entre caras planas.

Las varillas y barras se pueden emplear en lugar de la probeta de sección original de fabricación, el mayor tamaño práctico de probeta redonda estándar.

### 1.11.2 Determinación del área de la sección transversal y los pesos unitarios de perfiles, planchas, barras-perfil y acero de refuerzo..

El área de la sección transversal se determina con las dimensiones obtenidas directamente, mediante los procedimientos geométricos adecuados ; cuando no sea posible determinar el área mediante este procedimiento, se deberá emplear la siguiente fórmula.

$$A = \frac{P}{7.84L} = 0.1276 \frac{P}{L}$$

El peso unitario por metro cuadrado se calculará con la siguiente fórmula :

$$p = \frac{P}{A}$$

p : peso del producto de acero en kilogramos por metro cuadrado.

P : peso del tramo de producto considerado, en kg.

A : área de la sección transversal en cm<sup>2</sup>

Y el peso unitario por metro lineal, con la fórmula.

$$p = \frac{P}{L}$$

$p$  : peso del producto de acero en kilogramos por metro.

$P$  : peso del tramo de producto considerado, en kg.

$L$  : área de la sección transversal en  $\text{cm}^2$

Para determinar el peso unitario de una varilla, corrugada, debe tomarse un tramo de aproximadamente un metro, para obtener resultados representativos. Se pesa el tramo de varilla en una balanza con aproximación de un gramo. El peso por metro lineal de varilla se calcula con la siguiente fórmula.

$$p = \frac{P}{L}$$

$p$ : peso unitario de la varilla en kilogramos por metro lineal.

$P$ : peso del tramo de varilla en kilogramos

$L$ : longitud del tramo de varilla en metros.

Para obtener el área neta de las varillas corrugadas se utiliza un tramo de varilla de aproximadamente 10 cm de longitud con sus extremos paralelos entre sí y afinados con torno. Se imprime por algún método adecuado los contornos de los extremos de la varilla sobre papel milimétrico; se efectúa el conteo de los milímetros cuadrados en cada superficie impresa y su promedio se considera como el área neta de la varilla, la que debe reportarse en centímetros cuadrados con aproximación de dos decimales.

Por otra parte, por medición directa del volumen de un tramo de varilla de 10 cm de longitud por inmersión en agua; el volumen de agua desplazada corresponde al volumen del tramo de varilla sumergido. El área neta de la varilla se calcula con fórmula siguiente.

$$A = \frac{V}{L}$$

$A$ : área neta de la varilla, en  $\text{cm}^2$ .

$V$ : volumen obtenido por inmersión directa en agua, en  $\text{cm}^3$ .

$L$ : longitud de la varilla corrugada en cm.

También puede determinarse el volumen del tramo de varilla a partir de la fórmula de su peso específico.

$$V = \frac{P}{7.84}$$

$$V = A \cdot L$$

Igualando las dos ecuaciones se tiene :  $\frac{P}{7.84} = A \cdot L$  y despejando A.

$$A = \frac{P}{7.84L} = \frac{0.1276P}{L} = 0.1276p$$

A: Area neta de la sección transversal de la varilla en  $\text{cm}^2$

L: Longitud de la barra igual a 1m

P: Peso del tramo de varilla en kilogramos.

p: Peso unitario en kilogramos por metro lineal.

7.84: Es el valor del peso específico del acero en  $\text{g/cm}^3$ .

El peso unitario de alambres y alambrones para refuerzo de concreto y de alambres o cable de acero para presfuerzo deberá aplicarse el procedimiento para acero de refuerzo corrugado.

El área neta de los alambres de acero para presfuerzo se determinará midiendo el alambre en tres secciones diferentes con un calibrador con aproximación al décimo de milímetro, tomando por lo menos dos lecturas en cada lugar, a  $90^\circ$  entre sí, promediando estos valores para obtener el diámetro de los alambres de acero.

El área neta se obtendrá con la siguiente fórmula:

$$A = 6.2832 r^2$$

A: Area neta de la sección transversal en  $\text{cm}^2$ , que se reportará con cuatro decimales.

r: Es el radio del alambre en cm, que se reportará con dos decimales.

El área neta de los cables de acero para presfuerzo se deberá calcular el área de cada uno de los alambres que forman el cable mediante el procedimiento descrito en el párrafo anterior y la suma de las áreas de cada uno de los mismos se reportará como el área neta.

### **1.11.3 Medición de corrugaciones en varillas de acero de refuerzo para concreto hidráulico.**

Las características de corrugación deberá ser determinado mediante la medición de la distancia entre éstas, su altura, el ancho de las corrugaciones transversales y longitudinales, la longitud de las corrugaciones transversales y su inclinación.

La distancia entre corrugaciones deberá determinarse en un tramo de varillá que comprenda por lo menos diez espacios entre corrugaciones. La distancia se medirá centro a centro de corrugaciones a lo largo de una línea paralela al eje de la varilla y se dividirá esa distancia entre el número de corrugaciones completas incluídas en la misma longitud. El valor de la medición se reportará en milímetros.

La altura de las corrugaciones se mide con un calibrador en tres lugares de una corrugación, al centro y en los tercios de su longitud. Esta determinación deberá hacerse por lo menos en tres tramos alternados y opuestos de la varilla reportando el promedio de estas lecturas como la altura de las corrugaciones en milímetros.

El ancho de las corrugaciones transversales se medirá en la parte superior de la corrugación con un calibrador en cinco corrugaciones diferentes, al centro y en los tercios de su longitud. El promedio de las mediciones efectuadas se reportará como el ancho de las corrugaciones longitudinales, en milímetros.

La longitud de la corrugación se medirá con un flexómetro sobreponiéndolo directamente a ésta. El valor de la longitud de corrugación deberá tomarse del promedio de cinco lecturas tomadas en cinco diferentes lugares, que se reportará en centímetros.

La inclinación de las corrugaciones, se medirá con un transportador de tamaño adecuado el ángulo que existe entre el eje de la varilla y una corrugación transversal. Deberán tomarse por lo menos cinco lecturas en diferentes corrugaciones y el valor promedio de éstas deberá reportarse como la inclinación de las corrugaciones en grados sexagesimales.

### **1.11.4 PRUEBA DE TENSION**

La máquina de ensaye para la prueba de tensión deberá tener una estructura, capacidad y precisión adecuadas ; también deberá contar con los dispositivos de sujeción (mordazas de cuña, mordazas de rosca y de resalte, mordazas para lámina, mordazas para alambre y mordazas para torones) apropiados para cada tipo material. Por otra parte, deberá contar con el certificado de calibración vigente (un año de vigencia máximo).

Una vez instalada la muestra en las mordazas se inicia la aplicación de carga a una velocidad conveniente de prueba hasta la mitad del límite de fluencia especificado para cada producto o hasta la cuarta parte de la resistencia máxima, lo que sea menor. A partir de este punto, la carga deberá aplicarse a la velocidad especificada para cada producto o en caso de que no se

especifique, deberá ser tal que permita registrar las cargas y las deformaciones correspondientes a los intervalos requeridos.

Durante la ejecución de la prueba, para determinar la resistencia de fluencia o el punto de fluencia, la velocidad de aplicación de esfuerzos no deberá de exceder de 7000 kg/cm<sup>2</sup> por minuto. Esta velocidad puede incrementarse después de quitar el extensómetro, pero no excederá de 0.5 mm/mm de calibración por cada minuto.

Los materiales que tengan un diagrama esfuerzo-deformación sin punto de fluencia definido, la resistencia de fluencia se determinará por cualquiera de los siguientes procedimientos.

Para materiales que tengan un diagrama esfuerzo-deformación con una zona de fluencia bien definida, el punto de fluencia se determinará por los métodos de detección directa del indicador de la máquina y por el método "Offset".

Deformación permanente especificada "Offset".- a partir gráficas esfuerzo-deformación generadas durante el ensaye de especímenes, las cuales son dibujadas a través de dispositivos instalados para este propósito en la máquina, se fija una abscisa,  $o_m$ , igual al valor especificado de la deformación permanente, después se dibuja una recta  $mn$  paralela a la recta inicial  $oa$  del diagrama y así se localiza el punto  $r$ , que es la intersección de la recta  $mn$  con el diagrama esfuerzo-deformación. La ordenada del punto  $r$  dará el valor de la resistencia de fluencia.

Extensión bajo carga.- se aplica en pruebas de aceptación o rechazo de materiales cuyas características de esfuerzo-deformación son bien conocidas, a partir de pruebas anteriores en materiales semejantes, en las que se dibujaron los diagramas esfuerzo deformación para determinar la resistencia de fluencia según una deformación permanente especificada. En pruebas de comprobación deberá obtenerse los diagramas esfuerzo deformación, empleando el método "Offset", para determinar la resistencia de fluencia.

La resistencia máxima a tensión así como de la de fluencia se calculará dividiendo la carga correspondiente entre el área de su sección original.

El alargamiento se determina juntando entre sí los extremos de la probeta fracturada y midiendo la distancia entre las marcas de calibración, con una aproximación de 0.5%, se puede usar una escala graduada en porcentajes que aproximen hasta 0.5% de la longitud de calibración. El alargamiento se reportará como un porcentaje de aumento de la longitud de calibración original.

Si la fractura se localiza fuera de las dos cuartas partes centrales de la longitud de calibración o en una de las marcas dentro de la zona de la sección reducida, el valor del alargamiento obtenido puede no ser representativo del material. Si el alargamiento así medido está dentro del mínimo especificado, será aceptado, pero si el alargamiento es menor del mínimo requerido, la prueba deberá repetirse.

El alargamiento antes de la fractura puede determinarse mediante métodos autográficos o bien con extensómetros.

La estricción se determinará juntando entre sí los extremos de la probeta fracturada y midiendo el menor diámetro o el menor ancho y espesor en la parte de la sección transversal donde se ha obtenido la máxima reducción. La diferencia entre el área así determinada y el área de la sección transversal original, expresada en porcentaje del área original, es el porcentaje de reducción de área o estricción.

### **1.11.5 PRUEBAS DE DOBLADO**

La prueba de doblado es un método para evaluar la ductilidad de los aceros, pero no puede considerarse como un índice para predecir las características de servicio en operaciones de doblado durante la construcción. La severidad de la prueba es función de los factores como el diámetro del mandril sobre el que se hace el doblado, sección transversal de la probeta y el ángulo de doblez. Las condiciones de prueba variarán de acuerdo con la localización y orientación de la probeta, la composición química del acero y sus propiedades físicas.

La probeta deberá doblarse a temperatura ambiente y sin impactos, a un ángulo especificado y sobre un mandril cuyo diámetro también está fijado. Para pasar satisfactoriamente esta prueba, la probeta no deberá presentar grietas en la parte exterior de la porción doblada. La velocidad de ejecución de esta prueba generalmente no es un factor importante.

En la preparación de las probetas para la prueba de doblado, redondearse sus aristas longitudinales, para evitar pequeñas grietas que desvirtúen el resultado de la prueba. También deberá tenerse cuidado de que la probeta tenga la longitud suficiente y que tenga libertad de movimiento en los puntos de apoyo.

Durante la operación de doblado deberá haber un contacto uniforme entre la probeta y el mandril. La prueba se desarrollará en forma continua y uniforme.

### **1.11.6 INSPECCIÓN METALÚRGICA MACROSCÓPICA.**

Este método de prueba permite conocer la condición interna de los productos de acero, detectando y evaluando los defectos de fabricación, tales como tubos, grietas, inclusiones, porosidad y segregación, para lo cual se trata con un producto químico una sección del material para hacer resaltar dichos defectos y poderlos observar con instrumentos ópticos de bajo aumento; se aplica principalmente a productos de acero estructural, acero de refuerzo, acero de presfuerzo y juntas soldadas.

La inspección metalúrgica macroscópica en productos de acero comprende el corte y preparación de probetas, su ataque químico, la observación microscópica y la evaluación de defectos.

Las probetas deberán tomarse de las muestras de los productos de acero cortándolas con una longitud aproximada de 12mm, con excepción del acero de presfuerzo en que requiere una longitud de aproximada de 50mm. El corte deberá efectuarse en frío usando medios mecánicos como son segueta, sierra, discos abrasivos o torno, procurando alejarse un mínimo



de 10cm del extremo de la muestra cuando ésta se haya obtenido mediante el corte con soplete. La superficie del corte deberá quedar lo más plana posible eliminando las rebabas mediante limas o esmeril. En el caso de acero para presfuerzo, la superficie de corte deberá terminarse mediante torneado evitando esmerilar las aristas. Antes de someter las probetas al ataque químico, deberán limpiarse perfectamente con solventes, tales como gasolina o éter, con objeto de eliminar cualquier vestigio de grasa, aceite o pintura.

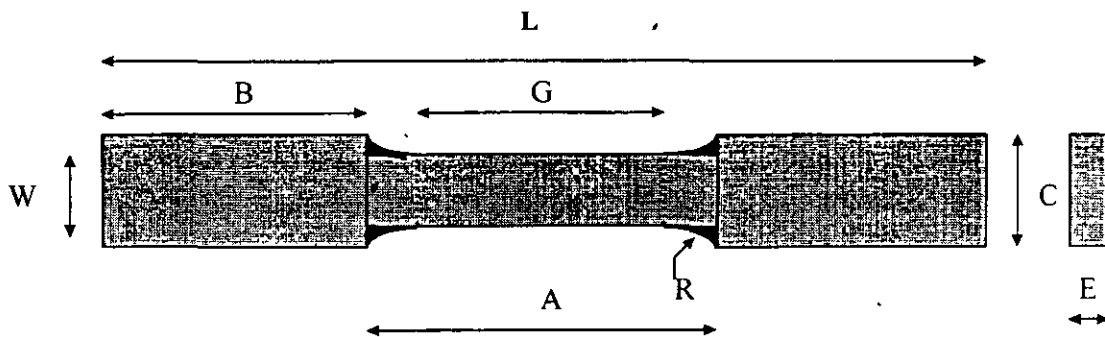
El ataque químico se iniciará colocando las probetas ya preparadas en un recipiente de vidrio resistente al calor y a los ácidos tales como vasos Pyrex o cápsulas de porcelana ; se agrega una solución de ácido clorhídrico rebajado con agua al 50% hasta cubrirlas completamente. La solución se llevará a una temperatura de entre 70 y 80 °C y se mantendrá en este rango durante 30 minutos para acero de refuerzo, acero estructural y juntas soldadas, o 10 minutos para acero de presfuerzo. Para aceros de medio y alto carbono, el tiempo podrá variar de acuerdo con su contenido de carbono.

En juntas soldadas el ataque químico también se puede efectuar puliendo finamente las superficies de las probetas por examinar hasta hacer desaparecer razonablemente las huellas del corte. Las superficies de las probetas se someterán al ataque de una solución compuesta de 15 gramos de persulfato de amonio en 100 mililitros de agua, la cual se aplicará frotando la superficie con mota de algodón impregnada en la solución, hasta que aparezcan bien diferenciados el metal base y el de aporte.

Después de realizar el ataque químico correspondiente, las probetas se lavarán con agua corriente y se frotan con un cepillo de cerdas duras, se humedecen con alcohol y secan con un paño absorbente o papel filtro para su observación.

Las superficies de las probetas tanto las de corte como las laterales, se observan ya sea simple vista, con lupa o con microscopio estereoscópico de 10 a 20 aumentos. Se tomará nota del tipo, número, tamaño y ubicación de los defectos detectados.

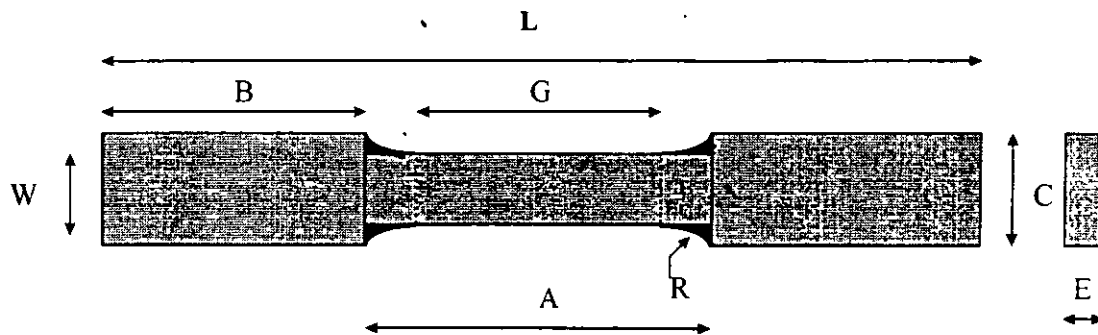
**PROBETA ESTANDAR RECTANGULAR NUM. 6 PARA LA PRUEBA DE TENSION DE 200 mm DE LONGITUD DE CALIBRACION.**



**DIMENSIONES**

G: Longitud de calibración	200.00 ± 0.2 mm
W: Ancho	40.00 ± 2.0 mm
E: Espesor	Espesor del material
R: Radio de la zona de transición	25.00 mm mínimo
L: longitud total	450.00 mm mínimo
A: Longitud de la zona de sección reducida	225 mm mínimo
B: Longitud de la zona de sujeción	75 mm mínimo
C: Ancho de la zona de sujeción	50 mm aprox.

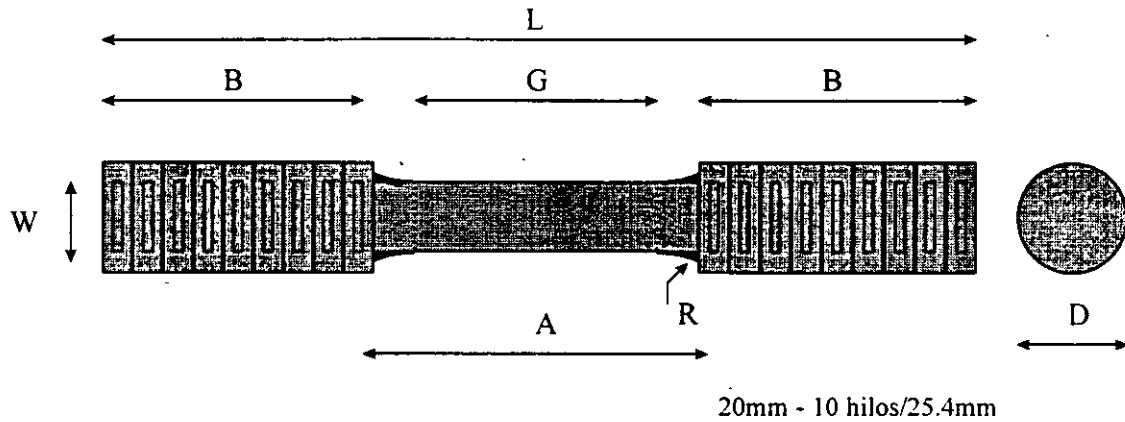
**PROBETA ESTANDAR RECTANGULAR NUM. 7 PARA LA PRUEBA DE TENSION DE 50 mm DE LONGITUD DE CALIBRACION.**



**DIMENSIONES**

G: Longitud de calibración	50.00 ± 0.1 mm
W: Ancho	12.50 ± 0.2 mm
E: Espesor	Espesor del material
R: Radio de la zona de transición	13.00 mm mínimo
L: longitud total	200.00 mm mínimo
A: Longitud de la zona de sección reducida	60.00 mm mínimo
B: Longitud de la zona de sujeción	50.00 mm mínimo
C: Ancho de la zona de sujeción	20.00 mm aprox.

**PROBETA ESTANDAR RECTANGULAR NUM. 6 PARA LA PRUEBA DE TENSION DE 200 mm DE LONGITUD DE CALIBRACION.**



**DIMENSIONES**

G: Longitud de calibración	50.00 ± 0.1 mm
W: Diámetro de la sección reducida	12.50 ± 0.25 mm
D: Diámetro de la zona de sujeción	Espesor del material
R: Radio de la zona de transición	10.00 mm mínimo
L: longitud total	125.00 mm aprox
A: Longitud de la zona de sección reducida	60.00 mm mínimo
B: Longitud de la zona de sujeción	35.00 mm mínimo

## **2.0 MADERA**

Producto de origen natural que se emplea en pilotes, o como madera estructural que se utilice en obras falsas, tablaestacas, viaductos, puentes y edificios.

### **2.1 PILOTES**

Los pilotes de madera.- son las piezas de madera o cruda o preservada, de forma aproximadamente cilíndrica o troncocónica, que se utiliza generalmente como apoyo en cimentaciones y que resisten satisfactoriamente su hincado y las cargas transmitidas al cimiento.

#### **2.1.1 Clasificación de pilotes de acuerdo con su uso.**

Los pilotes de madera se clasifican en tres clases, de acuerdo con el uso al que son destinados.

Pilote clase A.- son los que se usan en puentes u otras construcciones pesadas cuyo diámetro de la cabeza será como mínimo de 35cm.

Pilote clase B.- son los que se usan en muelles, atracaderos, puentes pequeños, cimentaciones de edificios y construcciones en general. El diámetro mínimo de la cabeza será de 30cm.

Pilote clase C.- son los que se usan en ataguías, obras falsas, construcciones ligeras y pilotes de apoyo de cimentaciones que vayan a estar permanentemente sumergidos. El diámetro mínimo de la cabeza será de 25cm, para longitudes de 6m o menores de 30cm para longitudes mayores.

Los pilotes deberán ser de madera sana, libre de indicios de putrefacción o de ataques por insectos, exceptuando los casos siguientes.

- a) En los pilotes de cedro y ciprés, el extremo correspondiente a la cabeza podrá tener tubo o huella del tocón, que no exceda de 40mm de diámetro.
- b) Los pilotes de ciprés podrán tener picaduras que en conjunto no excedan de 40mm de diámetro de la zona defectuosa.
- c) Los pilotes de pino podrán tener nudos no sano menores de la mitad del tamaño permitido de cualquier nudo sano, siempre y cuando la falta de sanidad no se extienda a más de 40mm de profundidad y no afecte las áreas adyacentes. En general, podrán aceptarse los pilotes que tengan cicatrices de trementina no atacadas por insectos.

Los árboles que se empleen para pilotes deberán cortarse arriba del nivel del suelo y deberán tener una disminución gradual en su diámetro desde la cabeza hasta la punta.

El tamaño de los nudos no deberá exceder al que se indica los párrafos subsecuentes y no deberá aceptarse agrupamientos de nudos. La distancia entre nudos deberá considerarse de centro a centro de los mismos.

TABLA LXXXI. LONGITUD DE PILOTES.

Longitud Especificada m	Múltiplos de variación de longitud m	Tolerancia en la longitud especificada m
De 4.80 a 12.00	0.60 inclusive	± 0.30
Más de 12.00	1.5	± 0.60

Nota : La longitud promedio de todos los pilotes de una remesa con longitud especificada, no deberá ser menor que la estipulada en el proyecto.

El agrupamiento de nudos es el conjunto de dos o más de ellos, siempre y cuando las fibras de la madera rodeen el grupo, ya que si éstas rodean a cada nudo independientemente, no se considerará como agrupamiento aunque éstos se encuentren próximos.

Todos los pilotes deberán cumplir con los requisitos indicados en la tabla LXXXI.

El perímetro de los pilotes, medidos sin considerar la corteza, deberá cumplir con los requisitos indicados en la tabla LXXXII, excepto que no más del 10% de los pilotes de una remesa dada, podrá tener un perímetro 5cm menor que los valores mínimos dados en la tabla anteriormente citada, y la relación entre los diámetros máximo y mínimo en la cabeza de cualquier pilote no deberá exceder de 1.2.

Si se requiere un alto contenido de madera de durámen en los pilotes sin tratamiento, el diámetro de la madera de durámen no deberá ser menor de 0.8 del diámetro de la cabeza del pilote.

Los pilotes con madera de albura que se vayan a tratar con preservativos, no deberán tener menos de 2.5cm de espesor de madera de albura en la cabeza.

Las cabezas y puntas de los pilotes se deberán aserrar perpendicularmente al eje del pilote y los nudos y ramas deberán cortarse al ras de la superficie de éste, excepto las ramas que puedan cortarse a mano al ras de la superficie del borde que rodea al nudo.

ABLA NUM. LXXXII. CIRCUNFERENCIAS Y DIÁMETROS DE PILOTES DE MADERA

Longitud m	Clase "A"						Clase "B"						Clase "C"					
	En la cabeza				En la punta		En la cabeza				En la punta		En la cabeza				En la punta	
	Mínimo		Máximo		Mínimo		Mínimo		Máximo		Mínimo		Mínimo		Máximo		Mínimo	
	C cm	D aprox cm	C cm	D aprox cm	C cm	D aprox cm	C cm	D aprox cm	C cm	D aprox cm	C cm	D aprox cm	C cm	D aprox cm	C cm	D aprox cm	C cm	D aprox cm
<b>PINOS, ABETOS Y OYAMELES</b>																		
Menos de 12	112	35	145	46	71	23	97	30	160	51	64	20	* 97	* 31	160	51	64	20
12 a 15 incl.	112	35	145	46	71	23	97	30	160	51	56	18	97	31	160	51	48	15
15.5 a 21.5 incl	112	35	145	46	64	20	104	33	160	51	56	18	97	31	160	51	48	15
21.8 a 27.5 incl	112	35	160	51	56	18	104	33	160	51	48	15	97	31	160	51	48	15
Más de 27.5	112	35	160	51	48	15	104	33	160	51	41	13	97	31	160	51	41	13
<b>ENCINOS, CIPRÉS Y OTRAS MADERAS DURAS</b>																		
Menos de 9.20	112	35	145	46	71	23	97	30	145	46	64	20	* 97	* 31	160	51	64	20
9.20 a 12 incl.	112	35	145	46	71	23	104	33	160	51	56	18	97	31	160	51	56	18
Más de 12.0	112	35	145	46	64	20	104	33	160	51	48	15	97	31	160	51	48	15
<b>CEDRO</b>																		
Menos de 9.20	112	35	175	56	71	23	97	30	175	56	64	20	* 97	* 31	175	56	64	20
9.20 a 12 incl.	112	35	175	56	71	23	104	33	175	56	64	20	97	31	175	56	64	20
Más de 12.0	112	35	152	56	64	20	104	33	175	56	56	18	97	31	175	56	56	18

\*En pilotes de clase C puede especificarse una circunferencia mínima de 79cm o un diámetro de 25cm en la cabeza para longitudes de 6m o menos

### **2.1.2 Clasificación de los pilotes de acuerdo con la corteza que hay que retirarles**

De acuerdo con la cantidad de corteza que deberá ser retirado, los pilotes se clasifican de la siguiente manera.

a) Pilotes de descortezado completo.- son aquellos a los que se les quita toda la corteza exterior y además, en forma bien distribuida, por lo menos el 80% de la corteza interior. Para un tratamiento adecuado con preservativos, no deberán quedar fajas de corteza interior de más de 12mm. de ancho.

b) Pilotes de descortezado tosco.- son aquellos a los que se les elimina totalmente, sólo la corteza exterior.

c) Pilotes sin descortezar.- son aquellos a los que no se les quita la corteza.

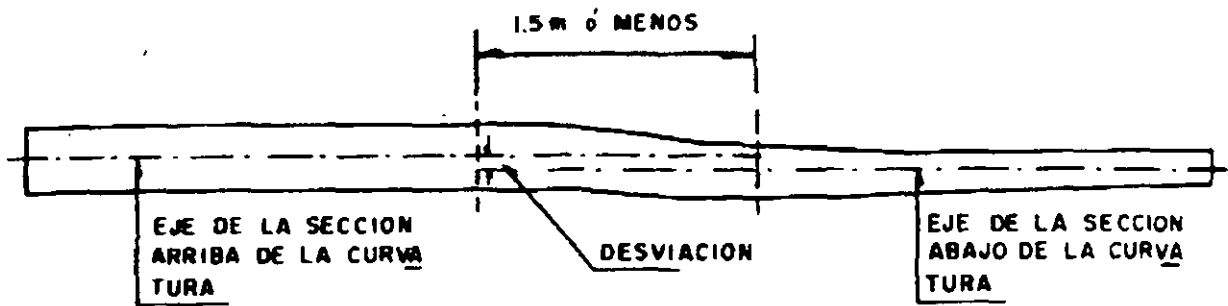
### **2.1.3 Pilotes clases A y B**

En los pilotes, la línea recta imaginaria que una el centro de la cabeza con el centro de la punta, deberá quedar íntegramente dentro del cuerpo del pilote.

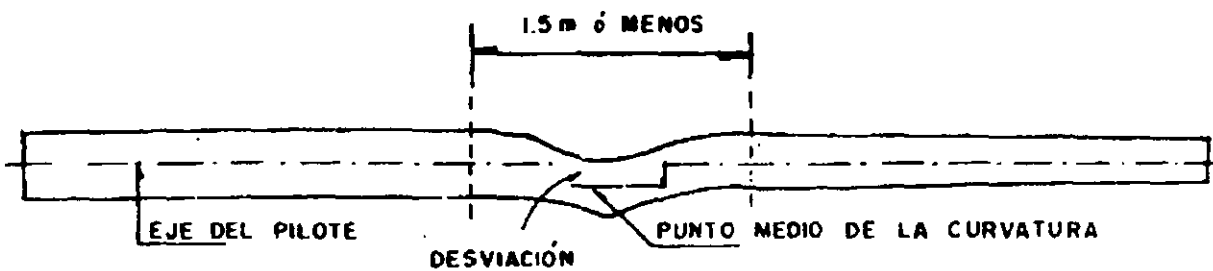
Los pilotes largos sometidos a carga no muy alta, pueden aceptarse si la línea recta que una el centro de la cabeza con el centro de la punta, queda parcialmente fuera del cuerpo del pilote, siempre y cuando la distancia máxima entre dicha línea y el pilote, no exceda de 0.5% de la longitud de éste o de 7.5cm, lo que sea menor.

Los pilotes también deberán estar libres de curvaturas cortas en las que la desviación respecto a la condición recta, en cualquier tramo de 1.5m, como se indica en la figura número 26, exceda de 6cm. Los pilotes con curvaturas cortas deberán satisfacer la condición de que la línea recta imaginaria que una el centro de la cabeza con el centro de la punta, deberá quedar íntegramente dentro del cuerpo del pilote.

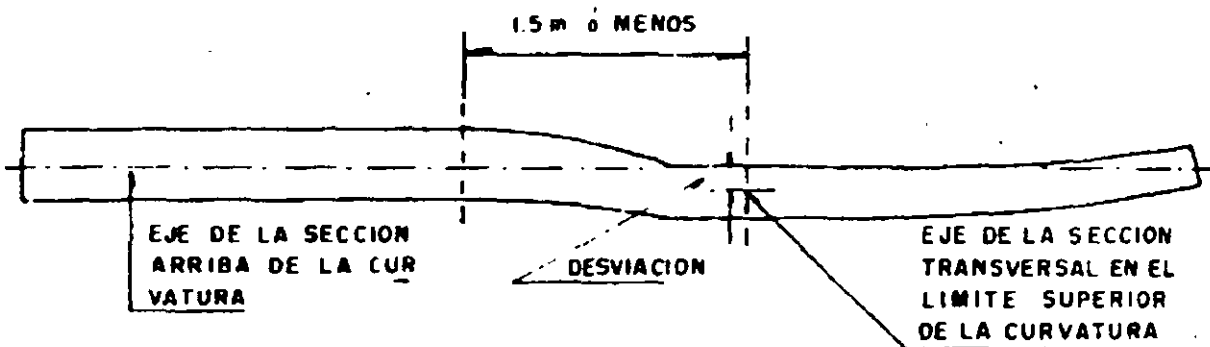




CASO 1.- LOS EJES DE LA SECCION ABAJO Y ARRIBA DE LA CURVATURA SON APROXIMADAMENTE PARALELOS



CASO 2.- LOS EJES DE LA SECCION ABAJO Y ARRIBA DE LA CURVATURA COINCIDE O SON PRACTICAMENTE COLINEALES



CASO 3.- LOS EJES DE LA SECCION ARRIBA DE LA CURVATURA NO SON PARALELOS NI COLINEALES CON EL EJE ABAJO DE LA CURVATURA

FIGURA 26

La curvatura de las fibras en espiral, en cualquier tramo de 6m de longitud, no deberá exceder de la mitad de la circunferencia.

Los pilotes con longitud hasta de 15m y en las tres cuartas partes de la longitud a partir de la cabeza, en pilotes que tengan longitudes mayores de 15m, los nudos sanos no deberán ser mayores de 10cm o de 1/3 del diámetro del pilote en la sección donde se presenten, lo que sea menor.

En la cuarta parte restante de los pilotes con longitudes mayores de 15m, los nudos sanos no deberán ser mayores de 12.5cm o de la mitad del diámetro del pilote en la sección donde se presenten, lo que sea menor.

No se permitirán nudos, no sanos, excepto en los casos que ya se describieron anteriormente.

No se aceptarán agrupamientos de nudos, en los cuales las fibras de la madera se curven rodeando toda la unidad. Un grupo de nudos sencillos, en donde las fibras se curven alrededor de cada uno por separado, no se considera agrupamiento aún cuando los nudos estén cerca uno de otro.

La suma de los tamaños de los nudos en cualquier tramo de 30cm de longitud del pilote, no deberá exceder del tamaño máximo de nudos que se permita.

Podrán permitirse agujeros que tengan un diámetro promedio menor de 13mm, siempre y cuando la suma de los diámetros promedio de todos los agujeros, en cualquier superficie de un 0.10m<sup>2</sup> del pilote, no exceda de 38mm.

La longitud de las rajaduras no deberá ser mayor que el diámetro de la cabeza de los pilotes. La abertura de cualquier grieta o la suma de las aberturas de un conjunto de grietas, medidas sobre el anillo de crecimiento anual, situado en la mitad del radio de la cabeza del pilote, tampoco deberá exceder del diámetro de la cabeza del pilote.

### **2.1.2.2 Pilotes clase C**

En los pilotes, la línea imaginaria que una el centro de la cabeza con el centro de la punta, podrá quedar parcialmente fuera del cuerpo del pilote, pero la distancia máxima entre dicha línea y el pilote, no deberá exceder del 1% de la longitud del pilote o de 7.5cm, lo que sea menor.

Los pilotes deberán estar libres de curvaturas en las que la desviación de la condición recta en cualquier tramo de 1.5m, como se indica en la figura 26, en ningún caso excederá de 6cm.

Las curvaturas cortas podrán aceptarse siempre que el pilote cumpla los requisitos de rectitud descritos anteriormente para pilotes clase C.

Las fibras en espiral no deberán exceder de una vuelta completa en cualquier tramo de 6m.

Los nudos sanos no deberán tener un diámetro mayor de 12.5cm o de la mitad del diámetro del pilote en la sección en donde se encuentren, lo que sea menor.

La magnitud de un nudo es la dimensión medida perpendicularmente al eje del pilote.

No se permitirán nudos no sanos, excepto en los casos descritos en los requisitos generales.

No se aceptarán nudos agrupados ; la suma de los tamaños de todos los nudos, en cualquier tramo de 30cm de longitud del pilote, no deberá exceder del doble del tamaño del mayor nudo permitido.

Se podrán permitir agujeros que tengan un diámetro promedio menor de 13mm, siempre y cuando la suma de los diámetros promedio de todos los agujeros, en cualquier superficie de 0.1m<sup>2</sup> del pilote, no exceda de 75mm.

La longitud de las rajaduras no deberá ser mayor de 1.5 veces el diámetro de la cabeza del pilote.

La abertura de cualquier grieta o la suma de las aberturas de un conjunto de ellas, medidas sobre el anillo de crecimiento anual situado en la mitad del radio de la cabeza del pilote, tampoco deberá exceder de 1.5 veces el diámetro de la cabeza del pilote.

## **2.2 MADERA ESTRUCTURAL**

La madera estructural es aquella empleada para la construcción de viaductos, puentes, edificios, tablaestacas, moldes, obras falsas, etc., para lo cual sus propiedades mecánicas y resistencia deben ser controladas.

La madera empleada podrá ser caoba, roble, oyamel, guapaque, sabino, pino, encino, abeto, nogal, ciprés, pinocote y cedro ; para determinar su calidad la madera estructural se clasificará en calidad A, B y C, de acuerdo con la tabla LXXXIII.

La madera deberá estar libre de daños por ataques biológicos que disminuyan su resistencia o durabilidad, tales como putrefacción y acción de hongos o de insectos. La mancha azul no se considera como deterioro y se permite en cualquier clase de madera.

No se aceptará ninguna pieza de madera con peso volumétrico menor de 300 kg/m<sup>3</sup>.

Cuando las piezas de madera tengan rebajo se removerá la corteza completamente y el rebajo se medirá donde éste tenga la mayor profundidad, para determinar la sección efectiva de la pieza.

Las piezas de madera aserrada podrán usarse sin preservativos, dependiendo del uso y ubicación de las piezas.

La inclinación de las fibras se determinará en una distancia suficientemente grande, para encontrar un valor general, sin tomar en cuenta las desviaciones cortas o locales.

Las maderas aserradas podrán tener un tercio o más de albura de verano, que es la porción más oscura y más dura del anillo anual, sobre una porción de 7.5cm de una línea radial situada como se describe en el párrafo siguiente. Las piezas que en promedio tengan menos de 12 anillos anuales en 5cm, se aceptarán si en promedio tiene 1/2 o más de albura de verano.

La velocidad decreciente del crecimiento se determinará en una línea radial que sea representativa del crecimiento promedio, en una sección transversal. Si la línea radial escogida no se considera representativa, se cambiará de sitio lo suficiente para obtener un promedio razonable, pero la distancia de la médula al principio de la porción de 7.5cm, sobre la que se cuentan los anillos, no se cambiará. En caso de duda se tomarán dos líneas radiales y el número de anillos y porcentaje de albura de verano será el promedio de estas líneas.

En la figura 27 se indican las zonas en que se divide un elemento estructural de madera sometida a flexión, para su clasificación y ubicación de defectos.

La ubicación y dimensiones máximas tolerables de nudos y agujeros que provengan de nudos o de otras causas, se indican en la tabla LXXXIV.

Las rajaduras anulares en polines, tablones, vigas y largueros, deberán medirse en los extremos de la pieza. Solamente se tendrán en cuenta aquellas rajaduras que queden en los dos cuartos centrales del peralte de la pieza.

El tamaño de rajadura anular es la distancia entre las líneas que la limiten paralelamente a las caras mayores de la pieza. El tamaño permisible será determinado en función de la cara menor de la pieza.

El tamaño de una rajadura anular en columnas o postes de sección rectangular, es la dimensión del menor rectángulo que contenga a la rajadura anular y que tenga sus lados paralelos a las aristas de la sección extrema de la pieza.

El tamaño de hendéaduras y rajaduras radiales en columnas y postes, dentro de tres veces el ancho de la pieza a partir de cualquier extremo, será igual a su área estimada a lo largo de la sección longitudinal dividida entre tres veces el ancho de la pieza.

Se considera como tamaño de una fisura o grieta, la máxima profundidad de ésta medida con un alambre de 0.125mm de diámetro. Para elementos en compresión se permitirá incrementar los valores correspondientes dados en la tabla LXXXIII en un 50%.

Las dimensiones normales de las piezas de madera estructural aserrada, son las indicadas en la tabla LXXXV, considerándose como madera de corte especial en su aserrado, cuando el proyecto indique dimensiones diferentes a las aquí consignadas.

TABLA LXXXIII.- CARACTERISTICAS ADMISIBLES DE LA MADERA ESTRUCTURAL

Tipo de defecto	Calidad A	Calidad B	Calidad C
Velocidad de crecimiento máximo	16 anillos / 5cm	12 anillos / 5cm	8 anillos / 5cm
Fisuras o grietas, profundidad máxima	1/4 del espesor	3/8 del espesor	1/2 del espesor
Inclinación de la fibra, no mayor de	1 en 14	1 en 11	1 en 8
Aristas faltantes o gema, no mayor de	1/8 de cualquier superficie	1/8 de cualquier superficie	1/4 de cualquier superficie
Bolsas de resina de menos de 3mm de ancho, profundidad máxima de	1/4 del espesor	1/3 del espesor	1/2 del espesor

ZONAS EN LAS QUE QUEDA DIVIDIDO UN ELEMENTO ESTRUCTURAL DE MADERA PARA SU CLASIFICACION

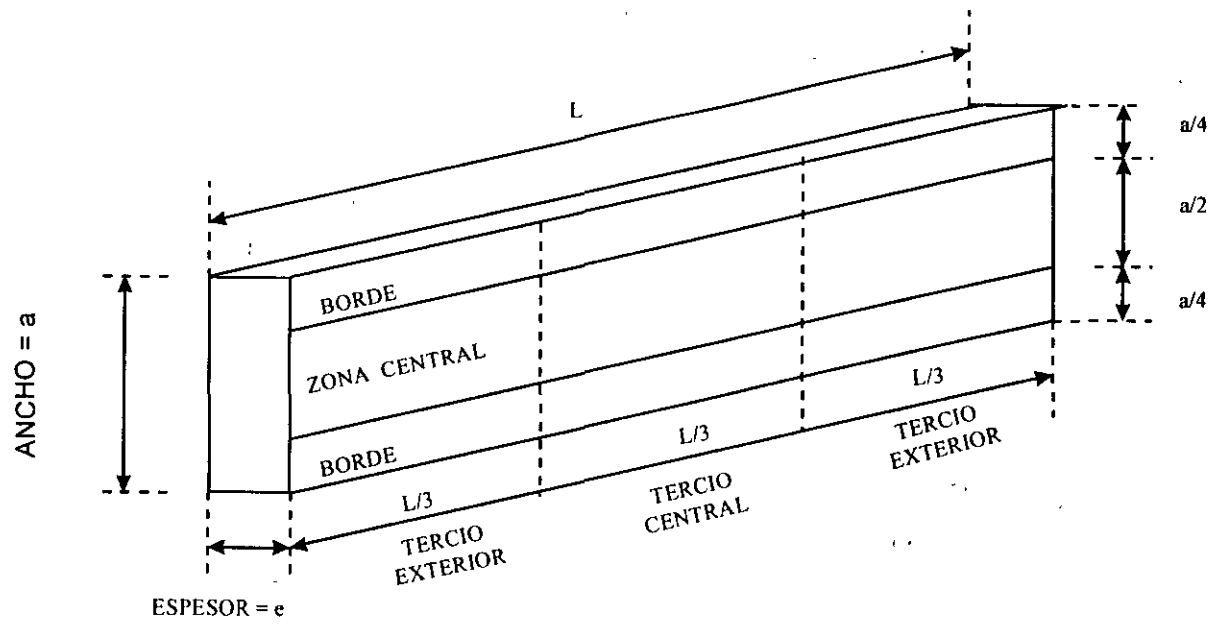


FIGURA 27.

TABLA NUM. LXXXIV DIMENSIONES MAXIMAS TOLERABLES DE NUDOS

Ancho nominal de la superficie de la pieza		CALIDAD A			CALIDAD B			CALIDAD C		
		Nudos en el canto dentro del tercio medio de un miembro en flexión	Nudos en la zona central de un miembro en flexión o en cualquier superficie de un miembro en compresión	Nudos en las aristas de un miembro en flexión o en cualquier superficie de un miembro en tensión	Nudos en el canto dentro del tercio medio de un miembro en flexión	Nudos en la zona central de un miembro en flexión o en cualquier superficie de un miembro en compresión	Nudos en las aristas de un miembro en flexión o en cualquier superficie de un miembro en tensión	Nudos en el canto dentro del tercio medio de un miembro en flexión	Nudos en la zona central de un miembro en flexión o en cualquier superficie de un miembro en compresión	Nudos en las aristas de un miembro en flexión o en cualquier superficie de un miembro en tensión
Pulg	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1	25	6	6	-	10	10	3	13	13	6
1 ½	38	10	10	-	13	13	6	19	16	10
2	51	13	13	3	19	19	10	25	22	13
2 ½	64	16	16	6	22	22	13	32	29	19
3	76	19	19	10	29	25	16	38	32	22
4	102	25	25	13	38	35	19	51	44	29
5	127	32	32	16	48	44	25	64	57	38
6	152	38	38	19	57	51	29	76	61	44
7	178	41	44	22	60	60	32	83	76	50
8	203	44	51	29	67	67	38	89	86	60
9	220	48	54	32	70	73	44	92	92	67
10	254	51	60	35	73	79	51	98	102	76
11	279	56	64	38	76	86	54	102	108	83
12	305	64	70	41	79	92	60	108	114	89

No se permite la presencia de dos más nudos de dimensión máxima en un mismo tramo de 305mm. Para miembros sujetos a flexión, de un sólo claro, las dimensiones de nudos que aparecen en la tabla pueden aumentarse cuando éstos se localicen en los tercios exteriores de la pieza ; estas dimensiones podrán aumentarse hacia los extremos hasta valores por 25%



**TABLA LXXXV. DIMENSIONES DE MADERA ESTRUCTURAL**

Concepto	Polines y Tablones	Vigas y Largueros	Columnas y Postes
Esesor nominal en mm	De 25 a 102	de 51 o mayor	de 127 o mayor
Ancho nominal en mm	De 102 o mayor	De 102 o mayor	De 127 o mayor
Longitud nominal en cm	Múltiplos de 60	Múltiplos de 61	Múltiplos de 61

Las dimensiones reales de las piezas de madera estructural de sección rectangular, sin secado, deberán sujetarse a las tolerancias indicadas en la tabla LXXXVI.

No se aceptarán lotes de madera, si por concepto de dimensiones el 20% o más de las piezas que lo forman no cumplen con los requisitos fijados.

Todas las piezas de madera estructural de sección rectangular serán razonablemente rectas, bien aserradas, cortadas en sus extremos con sierra, o con las caras opuestas paralelas descortezadas completamente y sin médula, donde ésta se considera perjudicial.

La madera estructural sin cepillar será cortada con sierra hasta obtener las dimensiones nominales, permitiéndose en forma ocasional que haya ligeras variaciones al efectuar los cortes.

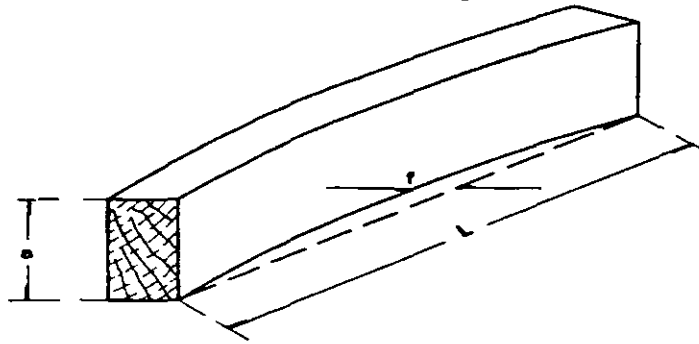
En ninguna parte de la longitud de cualquier pieza se permitirá que las variaciones causadas al efectuar los cortes con sierra, hagan que las dimensiones queden abajo de las nominales, en una cantidad mayor que la señalada en la tabla número LXXXV y en ningún lote se permitirá que haya más del 20% de piezas con dimensiones con tolerancias en menos de los anotados en la tabla número LXXXVI.

TABLA LXXXVI. TOLERANCIAS DE LAS DIMENSIONES EN PIEZAS DE MADERA

Concepto	Espesor nominal mm	En espesor sin cepillar mm	En espesor cepillado mm	Ancho nominal mm	En ancho sin cepillar mm	En ancho cepillado mm
Polines, tablones y otros miembros para tablero con carga aplicada sobre cualquiera de sus caras	25	± 3	± 10	102	± 5	± 10
	76	± 5	± 10	152	± 5	± 10
	102	± 5	± 10	203	± 6 *	± 13*
	o mayor			o mayor		
Vigas, largueros y otros miembros con carga aplicada sobre la cara menor.	51	± 5	± 13	102 o mayor	± 5*	± 10*
	152	± 6	± 13			
	203	± 8	± 13*			
	o mayor					
Columnas y postes de sección rectangular y otros miembros con cargas aplicadas sobre la cara menor	127	± 5	± 10	127	± 5	± 10
	152	± 5	± 13	152	± 5	± 13
	203	± 6	± 13*	203	± 6*	± 13*
	o mayor			o mayor		

\* Según la dimensión nominal que le corresponda.

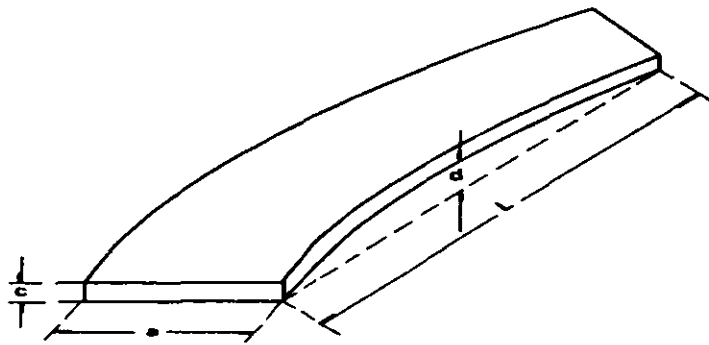
FIGURA 28



TOLERANCIAS PARA  $f$ , EN LA ENCORVADURA

Ancho "a"		Largo "L"		
		244 cm (8')	366 cm (12')	487 cm (16')
Pulg.	mm	Valores de $f$ , en mm		
3	76	11	25	44
4	102	9	19	33
5	127	6	16	25
6	152	6	13	22
7	178	5	11	19
8	203	5	9	17
10	254	3	8	14
12	305	3	6	11

FIGURA 29



TOLERANCIAS PARA  $d$ , EN LA ARQUEADA

Ancho "c"		LARGO "L"		
		244 cm (8')	366 cm (12')	487 cm (16')
Pulg.	mm	Valores de $d$ en mm		
1	25	33	76	135
1 1/2	38	22	51	90
2	51	17	38	68
2 1/2	64	14	30	57
3	76	11	25	44
4	102	8	19	33

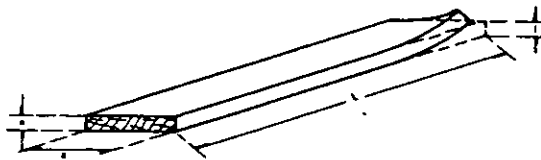


FIGURA 30

TORCEDURA

TOLERANCIAS PARA t. EN LA TORCEDURA

Tóbla correspondiente a la Figura 30

Longitud "L"	Espesor "e"		Ancho "a"							
			6 mm (3")	102 mm (4")	127 mm (5")	152 mm (6")	187 mm (7")	203 mm (8")	254 mm (10")	305 mm (12")
	Pulg.	mm	Valores de t en mm							
244 cm (8')	1	25	9	13	16	19	22	25	32	38
	1 1/2	38	6	8	11	13	14	16	21	25
	2	51	5	6	8	9	11	13	16	19
366 cm (12')	2 1/2	64	3	5	6	8	8	9	13	14
	3	76	3	5	5	6	8	8	11	13
	1	25	14	19	24	28	33	38	47	57
487 cm (16')	1 1/2	38	8	11	13	16	19	21	27	32
	2	51	6	8	10	11	14	16	19	24
	2 1/2	64	5	6	8	10	11	13	16	19
609 cm (20')	3	76	3	5	6	8	10	11	13	16
	1	25	19	25	32	38	44	51	64	76
	1 1/2	38	13	16	21	25	28	36	41	51
730 cm (24')	2	51	10	13	16	19	22	25	32	38
	2 1/2	64	8	10	13	14	17	21	25	30
	3	76	6	8	11	13	14	17	21	25

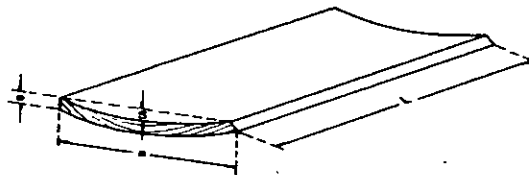


FIGURA 31

TOLERANCIAS PARA S. EN LA ACANALADURA

Pulg.	Ancho "a"		Valores de S mm
	mm		
3	76		3
4	102		4
5	127		5
6	152		6
7	178		7
8	203		8
10	254		10
12	305		12

## **2.3 MUESTREO**

El muestreo de pilotes de madera y madera estructural se sujetará a los siguientes lineamientos

### **2.3.1 Muestreo de pilotes de madera.**

Para efectos de muestreo, se entiende por lote de pilotes todas las piezas de las mismas dimensiones nominales, de la misma clase y que forman una orden de embarque.

La determinación de dimensiones, la derecha, las desviaciones y la presencia de defectos, se deberá hacer a la totalidad de los pilotes que forman el lote, ya que se trata de pruebas no destructivas.

La determinación de las dimensiones de los pilotes, así como del diámetro de la madera de duramen y de los defectos, se hará empleando un flexómetro o cinta métrica, aproximando al centímetro.

La derecha de los pilotes se podrá determinar uniendo con un cordel tenso los extremos de los diámetros de la cabeza y la punta y midiendo la distancia máxima entre el cordel y la superficie del pilote, aproximando a 0.5cm. Esta determinación deberá hacerse en dos planos a 90° entre sí. Las curvaturas locales deberán medirse haciendo mediciones similares dentro de una longitud de 1.5m.

Las desviaciones de fibras en pilotes, marcará en el pilote un tramo de 6m y a partir de un extremo de este tramo, se seguirá una fibra, la cual en general describirá una hélice y se determinará el ángulo central que quede comprendido entre los radios de los puntos de proyección de los extremos de esta fibra en la sección transversal del pilote.

La presencia de defectos en pilotes tales como madera esponjosa, putrefacción, manchas, plagas hongos, estalladuras, superficies desgarradas o no uniformes, rajaduras y nudos, se detectarán por inspección visual.

### **2.3.2 Muestreo de madera estructural**

Para el muestreo de la madera estructural se deberá seguir el siguiente procedimiento.

- a) La selección del material de cada lote, que servirá para fabricar probetas que se requieran en las determinaciones y pruebas, se hará escogiendo tramos que estén libres de daños ocasionados por condiciones inadecuadas de almacenamiento o por intemperismo.
- b) Se escogerán tramos en que las fibras sean sensiblemente rectas y sanas, teniendo en cuenta que puede permitirse la presencia de nudos ubicados de manera que no afecten fundamentalmente la resistencia de la probeta o puedan constituir un principio de falla.
- c) De cada lote se obtendrán 12 tramos con dimensiones de 6 x 6 x 120 cm, que servirán para fabricar las probetas de flexión, compresión, tensión, dureza, cortante,

desgarramiento y extracción de clavos, y para las determinaciones de peso volumétrico, contracciones y humedad.

- d) Por cada lote se obtendrán dos tramos con dimensiones de 2.5 x 2.5 x 10 cm, cortados transversalmente a las fibras, para determinación de la contracción tangencial.
- c) Cuando el tamaño de la sección de las piezas por muestrear sea mayor de 15 x 15 cm o de más de 20 cm de diámetro y muestren claramente los anillos de crecimiento, se fabricarán 2 probetas de 2.5 x 2.5 x 10 cm, cortándolas de tal modo que su longitud coincida con la dirección radial

## **2.4 PRUEBAS EN MADERA ESTRUCTURAL**

De acuerdo con el uso al que será destinada la madera estructural, ésta deberá ser muestreada y sometida a las siguientes pruebas para conocer su calidad.

- Flexión estática
- Compresión paralela a las fibras
- Compresión perpendicular a las fibras
- Dureza
- Esfuerzo cortante
- Desgarramiento
- Tensión paralela a las fibras
- Tensión perpendicular a las fibras
- Peso volumétrico
- Contracción volumétrica
- Grado de humedad

### **2.4.1 Flexión estática**

La prueba de flexión estática se inicia con la preparación de 6 probetas de aproximadamente 5 x 5 x 76 cm, las cuales se colocarán en dos apoyos con un claro de 70cm. La carga se aplica por medio de una cabeza de madera dura instalada en el cabezal de la máquina de ensaye. La velocidad de aplicación de carga será de 2.5mm por minuto.

Durante la prueba se deberá medir la flecha que en forma progresiva se teniendo durante la aplicación de carga hasta obtener la flecha máxima. Se traza la gráfica con las cargas y flechas registradas hasta la carga máxima o hasta una carga ligeramente menor a ésta en cada una de las probetas. Cuando no se alcance la ruptura, las mediciones de las flechas deben continuarse cuando menos en una tercera parte de las probetas, para que el trazo de la gráfica sea llevado hasta alcanzar una flecha de 15cm o hasta una carga de 90 kg. Las gráficas deben mostrar claramente la carga y deformación registrada al ocurrir la primera falla, los cambios bruscos observados en el comportamiento de las probetas y la carga máxima alcanzada.

Después de efectuada la prueba deberá ser clasificado el tipo de falla a través de una inspección visual

El reporte de los resultados de la prueba de flexión estática deberá contener los siguientes datos.

Módulo elástico.

$$E = (P / f) (L^3 / 48I)$$

E : módulo elástico de la madera, en kg/cm<sup>2</sup>

P : Carga correspondiente a la flecha f, dentro del rango elástico.

f : flecha medida en centímetros, producida por la carga P

L : claro de la viga en centímetros.

I : momento de inercia de la sección transversal, con relación al eje que pasa por su centroide, en centímetros a la cuarta potencia.

Módulo de ruptura.

$$MR = 3PL / 2bd^2$$

MR : módulo ruptura en kg/cm<sup>2</sup>

P : carga de ruptura de kg.

L : claro de la viga en centímetros.

b : ancho de la probeta en centímetros.

d : peralte de la probeta en centímetros

Debe reportarse el promedio, tanto del módulo elástico como del módulo de ruptura, determinados en cada una de las probetas que forman un lote. También deberá incluir el valor del grado de humedad.

#### 2.4.2 Compresión paralela a las fibras

La prueba de compresión paralela a las fibras deberá efectuarse previa la elaboración de 6 probetas de 5 x 5 x 20cm, midiendo cuidadosamente sus dimensiones, para determinar la sección transversal y la longitud de las probetas terminadas. Se aplica la carga en dirección del eje longitudinal de la probeta empleando una máquina de ensaye con asiento de rótula. La carga se aplica de manera continua a una velocidad de 0.6mm por minuto.

Durante la prueba deberán registrarse las cargas y las deformaciones correspondientes a intervalos regulares y hasta que se sobrepase ampliamente el límite elástico de la madera, teniendo cuidado de registrar la carga máxima alcanzada.

En esta prueba deberá reportarse lo siguiente.

Resistencia máxima

$$R = P / A$$

R : resistencia a la compresión paralela a las fibras, en kg/cm<sup>2</sup>

P : carga máxima alcanzada en kg.

A : área de la sección transversal original de la probeta, en  $\text{cm}^2$

En caso de que se tenga la gráfica esfuerzo-deformación, podrá calcularse el módulo elástico de la madera en compresión, en  $\text{kg}/\text{cm}^2$ . Este módulo será la pendiente de esta gráfica en su zona inicial ; cuando la zona inicial no sea recta, podrá usarse cualquier otro concepto de módulo como el secante o tangente, para una resistencia especificada.

Después de efectuada la prueba deberá ser clasificado el tipo de falla a través de una inspección visual. También se reportará el grado de humedad de la madera.

### **2.4.3 Compresión perpendicular a las fibras**

La prueba de compresión perpendicular a las fibras deberá ser efectuado empleando probetas de 5 x 5 x 15cm, la cual se coloca horizontalmente, para recibir carga a través de una placa rígida de 5cm de ancho, colocado en el tercio medio de la cara mayor de la probeta. Esta carga de compresión debe aplicarse por medio de un sistema de rótula y procurando que la dirección de la carga se aplique normal a los anillos de crecimiento ; la velocidad de desplazamiento del cabezal de la máquina deberá ser continua y de 0.3mm por minuto.

Durante la ejecución de la prueba deberán registrarse las deformaciones y las cargas correspondientes desde el inicio de la prueba hasta que se alcance una deformación de 2.5mm, después de la cual la prueba debe interrumpirse.

La carga requerida para producir la deformación de 2.5mm se reportará como la resistencia a la compresión perpendicular a las fibras. También se debe reportar el peso volumétrico y el grado de humedad de la probeta.

### **2.4.4 Dureza**

La prueba de dureza deberá efectuarse empleando probetas de 5 x 5 x 15cm y un penetrador de acero con punta esférica, con diámetro de 11.3mm.

La prueba consiste en hacer que el penetrador se introduzca a través de la superficie de la probeta hasta una profundidad de 5.65mm, el equivalente del radio de la esfera del penetrador ( $r = 11.3/2 = 5.65\text{mm}$ ).

Se efectúan dos penetraciones sobre una superficie tangencial y dos sobre una superficie radial de los anillos de crecimiento. Estas penetraciones se harán alejándose de los bordes de cada superficie seleccionada, para prevenir desgarramiento o rajaduras. La carga se aplicará de manera continua, con velocidad de desplazamiento del cabezal de la máquina de 6mm por minuto.



La carga necesaria para alcanzar la penetración de 5.65mm, se considera como la dureza de la madera ; se debe reportar el promedio de los valores de dureza determinados en cada cara de la probeta, así como el grado de humedad.

#### **2.4.5 Esfuerzo cortante**

La prueba de esfuerzo cortante paralelo a las fibras, deberá efectuarse empleando probetas de 5 x 5 x 6cm. La probeta tiene un rebaje de 1cm para provocar la falla en una de las caras de 5 x 5cm. Se aplicará la carga empleando el dispositivo de corte. La superficie de falla y el borde de la superficie de apoyo más cercana a dicho plano, será de 3mm.

La carga se aplica sobre la cara que muestra los extremos de las fibras ; se tendrá cuidado de verificar que al colocar las probetas, el travesaño del dispositivo se sujete de tal modo que las aristas longitudinales de la probeta queden colocadas verticalmente.

Durante la prueba, la carga se aplica de manera continua, con una velocidad de desplazamiento del cabezal de la máquina, de 0.6mm por minuto ; no se tomarán en cuenta las pruebas en las que la falla localizada en la base de la probeta, se extienda dentro de la superficie de apoyo.

El reporte de resultados deberá consignar, además de las características dimensionales y de la humedad de la probeta, la carga máxima registrada en el ensaye y el esfuerzo cortante calculado con la siguiente fórmula.

$$v = V / A$$

v : esfuerzo cortante en kg/cm<sup>2</sup>.

V : carga máxima en kg.

A : área de la sección resistente en cm<sup>2</sup>

#### **2.4.6 Desgarramiento**

La prueba de desgarramiento deberá efectuarse usando probetas elaboradas con las características específicas para esta prueba. Durante el ensaye la probeta se sujeta con mordazas y la carga se aplica de manera continua, con una velocidad de desplazamiento del cabezal de la máquina de 2.5mm por minuto.

En esta prueba, además de las características dimensionales y de humedad de la probeta, se reporta la carga máxima registrada en el ensaye y la resistencia unitaria al desgarramiento, calculada con la siguiente fórmula.

$$D = P / l$$

D : resistencia unitaria al desgarramiento en kg/cm<sup>2</sup>.

P : carga máxima en kg.

l : ancho del área de desgarramiento.

Deberá reportarse también el esquema descriptivo de la falla.

#### **2.4.7 Tensión paralela a las fibras**

La prueba de tensión paralela a las fibras deberá efectuarse usando probetas de sección reducida, elaboradas de tal manera que los anillos de crecimiento queden perpendicularmente al lado mayor de la sección transversal crítica de la probeta.

La carga se aplica a una velocidad de desplazamiento del cabezal de la máquina de ensaye, de 1 mm por minuto. La sujeción se hace preferentemente con mordazas especiales y en caso de requerirse la medición de las deformaciones éstas se tomarán en una longitud de 5cm en la porción central de la probeta. Las lecturas simultáneas de carga y deformación se suspenden cuando se rebasa el límite de proporcionalidad.

En esta prueba debe reportarse lo siguiente.

- 1) Esfuerzo máximo, calculado con la carga máxima y el área de la sección crítica original de la probeta.
- 2) Gráfica carga-deformación, cuando se requiera.
- 3) Esfuerzo en el límite de proporcionalidad, cuando se requiera.
- 4) Características dimensionales y de identificación de la probeta.
- 5) Grado de humedad.
- 6) Diagrama del tipo de falla, cuando se requiera

#### **2.4.8 Tensión perpendicular a las fibras**

La prueba de tensión perpendicular a las fibras deberá efectuarse usando probetas elaboradas con las características específicas para esta prueba, las cuales se sujetarán con mordazas a la máquina de ensaye. La carga se aplica en forma continua a una velocidad de desplazamiento del cabezal de la máquina, de 2.5mm por minuto durante toda la prueba.

En esta prueba debe reportarse lo siguiente.

- 1) Características dimensionales y de identificación de la probeta.

- 2) Esfuerzo máximo, calculado con la carga máxima dividida entre el área de la sección crítica original de la probeta.
- 3) Diagrama del tipo de falla si se requiere.
- 4) Grado de humedad.

#### **2.4.9 Peso volumétrico y contracción volumétrica.**

La determinación del peso volumétrico y la contracción volumétrica, deberán efectuarse empleando una misma probeta, cuyas dimensiones nominales son de 5 x 5 x 15cm secados a un grado de humedad de 12% aproximadamente y en la condición de secado al horno.

Se pesan las probetas y se determina su volumen por el método de inmersión al recibirse la madera en el laboratorio. Se dejan secar a la temperatura ambiente, teniendo cuidado de que al dejarla reposar no estén en contacto entre sí para que el aire pueda circular libremente entre ellas, hasta que tenga un grado de humedad del 12% aproximadamente ; posteriormente se vuelven a pesar las probetas y se determina nuevamente su volumen por inmersión.

Después se secan las probetas en un horno, de tal modo que el aire circule libremente entre ellas, a una temperatura de  $103 \pm 2$  °C hasta que alcancen un peso aproximadamente constante. Se pesan después del secado y mientras permanecen calientes, se sumergen en un baño de parafina fundida, extrayéndose rápidamente, para conseguir que queden recubiertas por una capa delgada.

El peso volumétrico y la contracción volumétrica se determinan a partir de la probeta secada al horno y con 12% de humedad, con la siguiente fórmula.

$$P_v = P / V$$

$P_v$  : peso volumétrico en g/cm<sup>3</sup>.

$P$  : peso de la probeta en gramos.

$V$  : volumen de la probeta en cm<sup>3</sup>

Se debe reportar 3 valores de peso valores de peso volumétrico, tomando el volumen de la probeta en condición de recepción, con 12% de humedad y secada en horno. La contracción volumétrica se calcula con la fórmula siguiente.

$$C_v = 100(V_i - V_f) / (V_i)$$

$C_v$  : Contracción volumétrica en %.

$V_i$  : Volumen de la probeta en condición de recepción en cm<sup>3</sup>

$V_f$  : Volumen de la probeta secada al horno, en cm<sup>3</sup>

#### 2.4.10 Grado de humedad

La determinación del grado de humedad debe efectuarse de acuerdo al siguiente procedimiento.

En cada prueba de resistencia mecánica se requiere determinar y reportar el grado de humedad, para lo cual, inmediatamente después de efectuar la prueba, se toma una muestra en la zona cercana a la ruptura, de aproximadamente 70cm<sup>3</sup>.

En cuanto se obtiene la muestra se eliminan las astillas y se determina el peso de la misma, con aproximación de ±0.2%.

Las muestras se colocan en un horno de modo que el aire caliente circule libremente entre ellas y se secan a una temperatura de 103±2°C, hasta que alcancen aproximadamente peso constante, después de lo cual se vuelve a determinar su peso con la misma aproximación.

El grado de humedad se calcula con la siguiente fórmula.

$$H = 100(P_h - P_s) / (P_s)$$

H : grado de humedad, en %.

Ph : peso de la muestra en estado húmedo, en g.

Ps : peso de la muestra secada al horno, en g.

### 3.0 APOYOS INTEGRALES DE NEOPRENO

Los apoyos integrales de neopreno son elementos de formas prismáticas constituidos por una o varias capas de elastómero denominado neopreno y placas de acero intercaladas; se fabrican a partir de la vulcanización del hule con placas de acero intercalado, en moldes bajo presión y calor, para obtener las dimensiones especificadas.

El componente elastomérico usado en la construcción de los apoyos deberá contener solo policloropreno (neopreno) virgen resistente a la cristalización, o polisopreno (hule natural) natural virgen como polímero crudo. Todos los materiales deberán ser nuevos ; no se aceptará la incorporación de material reciclado para dar el acabado al producto.

### 3.1 REQUISITOS QUE DEBE SATISFACER EL NEOPRENO.

El neopreno debe ser resistente a los efectos nocivos del ozono atmosférico y a las temperaturas extremas ; no deben aparecer grietas en el elastómero después de ser sometido a la acción del ozono a una concentración de 100 PPCM (partes por cien millones) en volumen, sometiendo el elastómero a un esfuerzo de tensión que produzca un alargamiento de 20% de su longitud inicial y a una temperatura de  $38^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  durante 100 horas.

Los apoyos podrán ser fabricados con tres distintos grados de dureza Shore "A" : 50, 60 y 70 con una tolerancia de  $\pm 5$ , seleccionados de acuerdo con las condiciones climáticas reinantes en la zona donde será empleado ; además, el neopreno deberá cumplir con los requisitos de desgarramiento, tensión y alargamiento indicados en la siguiente tabla.

DUREZA SHORE "A" Grado	DESGARRAMIENTO kg/cm <sup>2</sup>	TENSION kg/cm <sup>2</sup>	ALARGAMIENTO %
50±5	51 mínimo	178 mínima	400 mínimo
60±5	46 mínimo	178 mínima	350 mínimo
70±5	41 mínimo	178 mínima	300 mínimo

El elastómero, después de un envejecimiento acelerado durante 70 horas y a una temperatura de 100°C, no deberá sufrir alteraciones en sus características iniciales superiores a los indicados en la siguiente tabla.

PRUEBA DE ENVEJECIMIENTO ACELERADO	
Tensión :	15% máximo 40% máximo
Pérdida de resistencia a la ruptura Pérdida de alargamiento a la ruptura	
Dureza :	0 a 15
Shore "A", en grados	

La deformación permanente del neopreno no debe ser mayor del 25% de la deformación original obtenida en la probeta ; el ensaye se realizará bajo una deformación constante y a una temperatura de 70°C, durante 22 horas.

### 3.2 REQUISITOS QUE DEBEN SATISFACER LAS PLACAS DE ACERO INTERCALADAS EN EL APOYO Y LAS PLACAS DE CARGA.

Las placas de acero intercaladas en el apoyo de neopreno deberán ser de acero suave que cumpla con la norma ASTM A 366 o A 569.

Las placas de acero denominadas de carga deberán satisfacer los requisitos de un acero estructural cuyos valores se indican a continuación.

Prueba de Tensión :	
Esfuerzo máximo.	4 060 a 5 600 kg/cm <sup>2</sup>
Límite elástico, mínimo.	2 520 kg/cm <sup>2</sup>
Alargamiento en 200mm, mínimo.	20 %
Alargamiento en 50mm, mínimo.	23 %
Doblado	Debe pasar

### 3.3 REQUISITOS QUE DEBEN SATISFACER LOS APOYOS DE NEOPRENO.

Los apoyos integrales de neopreno deberán cumplir con los requisitos mecánicos en las pruebas de compresibilidad, resistencia a la compresión y compresión combinada con esfuerzo cortante ; además también deberá cumplir con las tolerancias en dimensiones y acabado.

#### REQUISITOS MECANICOS DE APOYOS INTEGRALES DE NEOPRENO

PRUEBA	REQUISITO
Deformación bajo carga : Para 35 kg/cm <sup>2</sup> Para 56 kg/cm <sup>2</sup> ó mayor	5 % 8 %
Resistencia a la compresión	6 veces el esfuerzo de proyecto
Compresión combinada con esfuerzo cortante, módulo "G"	±15 % del valor de proyecto

## REQUISITOS DIMENSIONALES DE APOYOS INTEGRALES DE NEOPRENO.

DIMENSIONES	TOLERANCIAS
Largo Ancho Espesor medio de las capas de neopreno Espesor medio de cada apoyo de neopreno :	$\pm 1\%$ dimensión nominal $\pm 1\%$ dimensión nominal $\pm 7\%$ espesor nominal
Hasta 13mm	de 0 a 0.8 mm
Mayor de 13 hasta 25mm	de 0 a 1.5 mm
Mayor de 25 hasta 70mm	de 0 a 2.0 mm
Mayor de 70mm	de 0 a 3.0 mm

El factor de forma de las placas de neopreno no deberá ser menor de 5 ni mayor de 12. Adicionalmente en ningún momento la relación de longitud a altura del apoyo deberá ser menor de 3, ni que la relación ancho altura del mismo sea menor que 2.

El espesor del elastómero de recubrimiento de las caras del apoyo no deberá ser mayor de 5mm ni menor de 3mm.

El espesor de las placas de acero no debe ser menor de 2.4mm

Los apoyos no deberán mostrar rajaduras, incrustaciones de material extraño o lajeaduras, ni tener grasa o cualquier otro material que altere sus propiedades mecánicas.

### 3.4 MUESTREO

#### 3.4.1 MUESTREO DE MATERIAL ELASTOMÉRICO

Se deberán tomar dos muestras por cada lote y por colada de producción, cuyo tamaño debe estar definido de acuerdo con las pruebas que se vayan a realizar.

#### 3.4.2 MUESTREO DE APOYOS DE NEOPRENO

El muestreo de apoyos integrales de neopreno se llevará a cabo de acuerdo con los siguientes criterios.



- 1.- Los apoyos de neopreno de un mismo tamaño y para una misma obra deberán identificarse por lote. Un lote debe contener como mínimo dos apoyos.
- 2.- Los apoyos deberán ser marcados en forma legible y clara, con la marca del fabricante y un número progresivo que identifique el apoyo y el lote.
- 3.- Para lotes con número de apoyo menor o igual a 4, deberá seleccionarse dos apoyos.
- 4.- Para lotes que contengan más de 4 apoyos, el número de muestras será la raíz cuadrada del número de apoyos en el lote.

### **3.5 PRUEBAS EN EL MATERIAL ELASTOMÉRICO**

El elastómero empleado en la construcción de los apoyos de neopreno deberán someterse a las pruebas de tensión y alargamiento, compresión, desgarramiento y envejecimiento acelerado; así como la prueba de la flama y resistencia al ozono.

#### **3.5.1 TENSION Y ALARGAMIENTO**

Este procedimiento, se refiere a las determinaciones de resistencia a la tensión, alargamiento y deformación permanente del neopreno efectuadas a la temperatura ambiente.

Para la realización de esta prueba, deberán elaborarse probetas de sección reducida por troquelado. Las probetas troqueladas se prepararán a partir de placas planas y lisas, con espesores uniformes no menor de 1.5 mm ni mayor de 3 mm., las muestras se sujetarán con mordazas cilíndricas en la máquina de ensaye de tal manera que se eviten deslizamientos; previamente se marcará la zona de calibración en la probeta y se aplicará la carga observando el alargamiento y registrando los esfuerzos a la deformación especificada y en el momento de la ruptura. Inmediatamente antes de la ruptura, se determinará el alargamiento.

La determinación del esfuerzo de tensión para un alargamiento especificado, llamado módulo de tensión y del alargamiento a la ruptura, se hará colocando las probetas en las mordazas de la máquina de tal manera que la sujeción sea simétrica para que el esfuerzo sea uniforme en toda la sección transversal de la probeta; para comprobar que la aplicación de esfuerzo es uniforme en la zona de tensión de la probeta, se observa continuamente las marcas de la zona calibrada, en donde puede apreciarse el ensanchamiento uniforme de dichas marcas.

durante la aplicación de la carga deberán registrarse los esfuerzos a la deformación especificada y en el momento de la ruptura, si es posible. Inmediatamente antes de la ruptura, se hará la determinación del alargamiento redondeando al 0.1. El registro del esfuerzo desarrollado al alcanzar el alargamiento especificado y en el momento de la ruptura, deberá hacerse preferentemente con un graficador. En el momento de la ruptura se medirá la distancia entre los centros de los rodillos, con una aproximación de 2.5mm.

### 3.5.1.1 Deformación permanente por tensión.

Para la determinación de la deformación permanente después de la ruptura, se juntarán las dos partes de la probeta, 10 minutos después de ocurrida la falla. Se medirá la distancia entre las marcas de calibración calculando la deformación permanente con la siguiente fórmula.

$$D_p = 100 (L_f - L_i) / L_i$$

### 3.5.2 Compresión

Es el procedimiento para medir la deformación permanente por compresión del neopreno para conocer su capacidad de retener sus propiedades elásticas, después de ser sometidos a la acción prolongada de esfuerzos de compresión. Durante la realización de esta prueba la probeta es sometida a una deformación constante por un tiempo de 22 horas y a una temperatura de 100°C en un ambiente seco.

Se realiza esta prueba colocando las probetas cilíndricas de 12.5mm de diámetro, elaboradas previamente, en el dispositivo integrado por dos o más placas planas de acero con las caras paralelas, entre las que serán comprimidas las probetas. Las barras separadoras, que sirven para limitar el porcentaje de deformación se colocarán a cada lado de las probetas para controlar su espesor, dejando espacio suficiente para la expansión lateral al momento de ser comprimidas. Se aprietan las tuercas del dispositivo de tal modo que las placas se desplacen de manera uniforme, hasta entrar en contacto con los separadores. El porcentaje de deformación inicial será de aproximadamente el 25%.

Una vez colocadas las probetas en el dispositivo se introducen en un horno y se mantienen por un período de 22 horas a una temperatura de 100°C.

#### 3.5.2.1 Deformación permanente por compresión.

Terminado el período de calentamiento se retira la probeta del dispositivo, dejándola enfriar sobre una superficie de madera durante 30 minutos.

Se mide el espesor final de la probeta en su parte central, con una aproximación de 0.02 y se calcula el porcentaje de deformación permanente por compresión empleando la siguiente expresión.

$$C = 100(e_o - e_f) / (e_o - e_b)$$

C : es la deformación permanente por compresión expresada como un porcentaje de la deformación original.

E<sub>o</sub> : es el espesor original de la probeta en mm.

$e_f$  : es el espesor final de la probeta en mm.

$e_b$  : es el espesor de la barra separadora en mm.

El reporte de prueba debe incluir las dimensiones originales de la probeta, el porcentaje de deformación empleado, el espesor de la probeta después de los 30 minutos de haberla sacados del horno y la deformación permanente por compresión.

### 3.5.3 DESGARRAMIENTO

Este método de prueba mide la resistencia al desgarramiento del neopreno y debe ser empleado únicamente para fines comparativos.

La resistencia al desgarramiento puede ser determinado con cualquiera de los tipos de probetas cuyas características se indican a continuación, así como el tipo de dado que se requiere en cada caso, haciendo la aclaración de que no existe correlación entre los resultados obtenidos.

- a) Probeta de sección variable, con extremos redondeados, ranurada a una profundidad de 0.5mm con navaja y preparada según el dado "A".
- b) Probeta de sección variable, con extremos planos, ranurada con navaja a una profundidad de 0.5mm y preparada según el dado "B".
- c) Probeta con ángulo de 90°, sin ranurar, preparada según el dado "C".

La forma de las probetas deberá ser igual al perfil de los cortadores A, B y C, indicadas en la figura número 6 ; y su espesor será de 1.5 a 3mm.

Las probetas se colocarán en la máquina de ensaye con mordazas del tipo de levas ajustables o del tipo de pinza. Cuando se ensayen probetas del tipo A, deberá tenerse cuidado de que al aplicar la carga los ejes de la probeta, queden alineados en la dirección de aplicación de la carga ; y cuando se ensayen probetas tipo B o C, el agarre de las mordazas deberá coincidir con el centro de las partes planas y quedar alineado con la dirección de aplicación de la carga. La carga se aplicará a una velocidad de 50 cm/minuto.

La resistencia al desgarramiento se obtendrá mediante la siguiente fórmula.

$$R_d = F / e$$

$R_d$  : resistencia al desgarramiento, en kg/cm.

$F$  : carga máxima de desgarramiento, en kg.

e : espesor de la probeta, en cm.

El valor reportado será el promedio de tres probetas de cada muestra. Si cualquiera de los valores obtenidos excede en más del 20% del valor promedio, se ensayarán dos probetas adicionales y se reportará la media de los cinco valores.

### 3.5.4 ENVEJECIMIENTO ACELERADO

Es la resistencia al deterioro por envejecimiento del neopreno. Esta prueba acelerada se hace únicamente con fines comparativos, ya que no existe correlación exacta entre los resultados de esta prueba y la vida útil del neopreno.

Esta prueba consiste en someter las probetas a una temperatura de 100°C dentro de un horno con circulación de aire y a la presión atmosférica, sin exposición a fuentes de luz ; después se someten a las pruebas de tensión y alargamiento para finalmente calcular el la pérdida de tensión y alargamiento, en porcentaje, que sufren. No deberán someterse a esta prueba las probetas que tengan menos de 24 horas de haber sido vulcanizadas.

El procedimiento inicia colocando probetas para la prueba de tensión y alargamiento, previamente elaborados, dentro del horno con una temperatura de 100°C. Las probetas son mantenidas a esta temperatura durante 70 horas, contado a partir del momento que fueron introducidas las probetas en el horno.

Al cumplirse las 70 horas de envejecimiento, se retiran las probetas del horno y se dejan enfriar a la temperatura ambiente, dejándolas en reposo sobre una superficie plana, por no menos de 16 horas ni más de 96, antes de efectuar la prueba de tensión y alargamiento.

Los resultados de la prueba de tensión y alargamiento después del envejecimiento, será el promedio de los resultados de tres probetas como mínimo ; si cualquiera de los valores de las probetas no cumple con lo especificado, se repetirá la prueba en dos probetas más y el resultado final se considerará como el promedio de las cinco probetas ensayadas.

Todas las probetas ensayadas se someterán a un examen visual y al tacto, registrando sus condiciones de apariencia física.

La disminución de las propiedades elásticas del neopreno envejecido con respecto a las del neopreno original, se calculará, como un porcentaje del cambio sufrido en su resistencia a la tensión y alargamiento a la ruptura, con la fórmula siguiente.

$$P_e = 100 (E - N) / N$$

$P_e$  : disminución del valor de tensión o de alargamiento, en %.

E : valor promedio de resistencia a la tensión o de alargamiento obtenido del neopreno envejecido.

N : valor promedio de resistencia a la tensión o de alargamiento obtenido del neopreno original.

El reporte deberá incluir el porcentaje de cambio a la tensión o al alargamiento a la ruptura, el tiempo de calentamiento y la temperatura de envejecimiento, y las dimensiones de las probetas.

### **3.5.5 PRUEBAS DE IDENTIFICACIÓN**

La identificación del polímero son rápidos y seguros cuando se trata de vulcanizados que contienen un sólo polímero. La mezcla de diversos polímeros causa interferencias que requieren pruebas de confirmación.

La prueba de identificación se lleva a cabo mediante el empleo de reactivos, los cuales se prepararán de la siguiente manera.

#### **3.5.5.1 Reactivo número 1**

Disuelva 2 gramos de acetato cúprico y 0.25 gramos de amarillo metanil en 500ml de metanol absoluto. Impregne cuadros de papel filtro con la disolución, seque y corte en tiras. Para preparar la disolución humectante, disuelva 2.5 gramos de dihidrocloruro de benzidina en una mezcla de 500ml de metanol y 500ml de agua. Agregue 10ml de 0.1% solución acuosa de hidroquinona. Almacénese en un frasco oscuro. Puede llegar a formarse un precipitado que no afecta la eficiencia de la disolución. Si ésta se protege del aire y de la luz, puede usarse por varios meses.

#### **3.5.5.2 Reactivo número 2**

Papeles de prueba de poliisobutileno y solución humectante. Use tiras de papel filtro incoloro. Para preparar la solución humectante agregue 5.0 gramos de óxido mercúrico amarillo a una mezcla de 15ml de ácido sulfúrico ( $D = 1.84$ ) y 80ml de agua ; hierva hasta el punto de ebullición y continúese calentando hasta que se disuelva el óxido ; enfríe y diluya a 100ml con agua destilada.

#### **3.5.5.3 Reactivo número 3**

Solución humectante y papeles de prueba de hule estireno. Imprégñese cuadros de papel filtro con una solución de 3 gramos de p-dimetilaminobenzaldehido y 0.5 gramos de hidroquinona en 100ml de éter etílico. Séquese y córtese en tiras, estas tiras almacenadas en frascos oscuros mantendrán su estabilidad por varias semanas, pero perderán eficiencia si se dejan en frascos transparentes. Para preparar la disolución humectante, disuelva 30 gramos de ácido tricloroacético en isopropanol y diluya a 100ml con isopropanol. Evítese el contacto con la piel.

### 3.5.5.4 Procedimiento

Moje una tira de papel de prueba con la solución humectante respectiva y manténgala en una posición paralela como a 5mm arriba de la superficie de un elemento de calentamiento el cual está en contacto con el hule sometido a prueba. El elemento de calentamiento debe estar lo suficientemente caliente para provocar humos de la pirólisis del producto pero no tanto como para llegar a provocar la ignición del hule. Se debe tener cuidado de obtener un detalle del color en la superficie del papel impregnado que queda del lado de los humos, sin quemar el papel o los materiales impregnantes. Califíquese de acuerdo con la siguiente tabla.

TABLA DE COLORACIONES

Tipo de hule	Prueba número 1	Prueba número 2	Prueba número 3
Neopreno	Rojo-violeta	Incoloro*	Verde
Nitrilo	Verdegris-azul	Café pálido	Amarillo
Neopreno/Nitrilo	Rojo-verde	Café pálido	Verde
poliisobutileno	Incoloro*	Amarillo amarillo-verde	Amarillo Pálido
Hule natural	Incoloro*	Café	Azul
Estireno	Incoloro*	Café	Verde-esmeralda

\*Puede llegar a ser un café muy claro más que incoloro.

### 3.5.6 RESISTENCIA AL OZONO

El procedimiento consiste en exponer, dentro de una cámara de acero inoxidable con un volumen de 0.160m<sup>3</sup>, especímenes de forma trapezoidal de 10cm de base inferior, 5cm de base superior, 13cm de altura, y espesor igual al del elastómero entre las placas de acero, en

una cámara con aire ozonizado sometida a una atmósfera de presión y una concentración de 100 PPCM en volumen; la muestra debe estar sometida a un esfuerzo de tensión o de doblado, que aumente en 20% su longitud, y a una temperatura de 38°C durante 100 horas.

La cámara de ozono debe contar con un generador de ozono localizado exteriormente, capaz de proporcionar y mantener la circulación y temperatura constantes dentro de ella; además debe estar provisto del dispositivo para medir la concentración de ozono.

Se deben hacer observaciones frecuentes para detectar la aparición de las primeras grietas en la superficie de las muestras, se recomienda que estas observaciones se hagan con una lupa de 7 aumentos.

### **3.6 PRUEBAS EN APOYOS DE NEOPRENO**

#### **3.6.1 VERIFICACIÓN DE LA HORIZONTALIDAD DE LAS PLACAS DE NEOPRENO Y DE LAS DE ACERO**

El paralelismo de las placas de acero de refuerzo interno de los apoyos se determina midiendo la base del apoyo hasta la base de cada placa en los 4 puntos correspondientes a las caras laterales del apoyo. La diferencia entre la medición mayor y la menor de las cuatro mediciones deberán ser registradas para cada placa de refuerzo. La suma de estas diferencias correspondiente a cada apoyo no deberá exceder de 25% del espesor efectivo de hule.

#### **3.6.2 DUREZA**

La prueba de dureza que se le practica a los apoyos de neopreno es la denominada Shore "A", la cual se realiza mediante la penetración de un punzón de dimensiones especificadas sobre la superficie de una capa de elastómero. El dispositivo de penetración se denomina durómetro, el cual antes de efectuar la prueba debe comprobarse su calibración mediante lecturas hechas sobre una placa patrón de dureza conocida. La superficie en la que se determine la dureza debe ser plana y lisa, sin ondulaciones o rugosidades.

La dureza se determina presionando el punzón del durómetro sobre la superficie del apoyo de neopreno, durante 5 segundos para obtener una lectura. Deben tomarse de entre 5 y 10 lecturas en cada muestra, distribuida uniformemente sobre la superficie, separadas de las orillas del apoyo 1.5 cm como mínimo. Se considera como el valor de dureza Shore "A", el promedio de 5 a 10 lecturas.

#### **3.6.3 COMPRESIBILIDAD**

Esta prueba consiste en la determinación de la deformación unitaria de un apoyo integral de neopreno al ser sometido a un esfuerzo unitario de compresión especificado.

Para la realización de esta prueba se requiere una máquina de ensaye de compresión con rótula, en donde se colocará el apoyo entre las platinas de carga ; la máquina debe garantizar la aplicación de carga lenta para el esfuerzo estático de compresión.

Se utilizan por lo menos dos micrómetros o indicadores de carátula, con sensibilidad de 0.01mm, para medir la deformación de proyecto. Se efectúan dos ciclos de carga, aplicando un esfuerzo igual al del proyecto y es en el segundo ciclo donde se deben registrar los datos de la deformación, como porcentaje del espesor efectivo del neopreno, el cual es igual al espesor total del apoyo menos el espesor de las placas de acero y de las placas de neopreno de recubrimiento.

Durante el segundo ciclo de carga, se aplica un esfuerzo inicial de 2 kg/cm<sup>2</sup> y a partir de este punto se ajustan los micrómetros a cero y se comienza el registro de los valores de deformación hasta alcanzar el valor de la carga de proyecto manteniéndola por espacio de tres segundos. La finalidad de aplicar el esfuerzo inicial es para compensar cualquier irregularidad de la superficie del apoyo.

La deformación unitaria del apoyo de neopreno, en porciento, se calculará con la siguiente fórmula.

$$d = 100 D / E$$

d : deformación unitaria, en %.

D : deformación del apoyo, en mm.

E : espesor efectivo del neopreno, en mm.

Cuando hay dudas sobre los resultados de la deformación unitaria del apoyo, se trazará la curva completa esfuerzo-deformación para que a través de ésta se dé el dictamen del apoyo en cuestión.

#### **3.6.4 RESISTENCIA MAXIMA A LA COMPRESIÓN**

La resistencia máxima a la compresión se realiza aplicando carga al apoyo hasta llevarlo a la falla y si por el tamaño del apoyo o por la capacidad de la máquina esto no fuera posible, se deberá tomar una muestra de 100 x 100mm del mismo, la cual se llevará a la falla.

Los resultados deberán reportarse como resistencia máxima a la compresión, indicando también las dimensiones de la muestra y la carga máxima aplicada ; de preferencia deben elaborarse gráficas esfuerzo-deformación con los resultados obtenidos.

#### **3.6.5 COMPRESION COMBINADA CON ESFUERZO CORTANTE. MODULO "G"**



La prueba se realiza empleando dos apoyos y tres placas de acero, arreglados de tal manera que una placa de acero queda entre dos placas de neopreno y las dos placas de acero restantes se colocan en la parte inferior y superior del grupo de los dos apoyos.

Al conjunto de apoyos de neopreno y placas de acero arreglados en forma de emparedados se colocan en la máquina de ensaye y se les aplica una carga constante que genere un esfuerzo de  $51 \text{ kg/cm}^2$ . Posteriormente se aplica por etapas una fuerza horizontal "H" a la placa de acero intermedia, registrando la deformación horizontal correspondiente. Se continúa el ensaye hasta obtener un ángulo de deslizamiento  $\delta$ , de tal manera que  $\delta = 0.9$ . La velocidad de aplicación de la carga no deberá exceder de una tonelada por minuto.

En ensaye se efectuará dos veces y el módulo "G" se determinará a partir de la segunda aplicación de carga. Convencionalmente el módulo "G" se determina en el intervalo comprendido entre  $\delta = 15^\circ$  y  $\delta = 30^\circ$ .

El módulo "G" se calculará con las siguientes fórmulas.

$$G = H/(ab \tan \delta)$$

En donde  $\tan \delta = U/T$

a : ancho de la probeta, en cm.

b : longitud de la probeta, en cm

H : fuerza horizontal, en kg

U : deformación horizontal, en mm.

T : espesor efectivo del neopreno, en mm.

G : módulo "G", en  $\text{kg/cm}^2$

La prueba se considera satisfactoria si los valores obtenidos no difieren en más de 15% del valor de proyecto.

## **4.0 GEOTEXTILES**

Los geotextiles son telas que se fabrican con fibras elaboradas a partir de los derivados del petróleo, tales como el polipropileno, poliéster, poliamida y polietileno.

### **4.1 CLASIFICACIÓN Y USOS**

Los geotextiles son textiles en el sentido tradicional de la palabra, aunque en su fabricación se emplean fibras sintéticas, los cuales se clasifican en tejidos y no tejidos.

#### **4.1.1 GEOTEXTILES TEJIDOS**

Son aquellos geotextiles que presentan un patrón particular, determinado por la secuencia en la que las fibras se entrelazan en el telar y por la posición de las agujas, dando lugar a los nombres de dirección de máquina (warp direction) o dirección transversal (cross section), pie y trama, en ingeniería textil. Se emplean en cimentación, suelo, roca, tierra o cualquier material geotécnico, como parte integral del producto hecho por el hombre, estructura o sistema.

#### **4.1.2 GEOTEXTILES NO TEJIDOS**

El proceso de fabricación de los geotextiles no tejidos incluyen cuatro pasos básicos: preparación de la fibra, formación del velo, ligado del velo y el punzonado.

A partir de la materia prima, la cual está compuesto por miles de filamentos con longitud que varía de una a cuatro pulgadas, se inicia el proceso de desgarrado para separar y orientar las fibras hasta alcanzar un aspecto esponjoso.

Una vez preparado el material, se colocan en forma continua sobre una banda transportadora el material de manera uniforme para formar el velo, el cual se realiza en varias capas, dependiendo del espesor del geotextil que desea fabricar.

Finalmente se da el proceso de ligado del velo ya sea por soldado o ligado mediante calor o medios químicos o mecánicos. Entre los procesos más empleados es el mecánico denominado punzonado, el cual se lleva a cabo haciendo pasar el velo a través de una máquina con un grupo de agujas que en la punta llevan un gancho hacia abajo, las cuales mediante el proceso de punzonado entrelazan las fibras.

La tela geotextil que se obtiene mediante este proceso es más fuerte que la que se obtiene con las telas tejidas.

## 4.2 REQUISITOS DE CALIDAD

De acuerdo con el uso al que se destinan y con la finalidad de establecer los requisitos de calidad de los geotextiles, éstos se clasifican en geotextiles para pavimentos, para separar materiales con diferentes granulometrías, para estabilizar, para control de erosión, como barrera temporal en rellenos sanitarios y para drenaje subterráneo.

Los geotextiles deben ser telas elaboradas a base de fibras sintéticas no tejidas y termofijadas, que sean resistentes al ataque químico y al moho, debiendo reunir las siguientes características, de acuerdo con su uso.

Tabla 1.- Requisitos de Propiedades de Resistencia de los Geotextiles

Pruebas	Métodos	Unidades	Clase de Geotextiles (1)					
			Clase 1		Clase 2		Clase 3	
			Elongación <50% <sup>(2)</sup>	Elongación ≥ 50% <sup>(2)</sup>	Elongación <50% <sup>(2)</sup>	Elongación ≥ 50% <sup>(2)</sup>	Elongación <50% <sup>(2)</sup>	Elongación ≥ 50% <sup>(2)</sup>
Resistencia a la ruptura	ASTM D 4632	N	1400	900	1100	700	800	500
Resistencia de la costura	ASTM D 4632	N	1260	810	990	630	720	450
Resistencia al corte	ASTM D 4533	N	500	350	400 <sup>(4)</sup>	250	300	180
Resistencia al punzón	ASTM D 4833	N	500	350	400	250	300	180
Resistencia al estallamiento	ASTM D 3786	KPa	3500	1700	2700	1300	2100	950
Permitividad	ASTM D 4491	sec <sup>-1</sup>	Requisitos de propiedades mínimas para Permitividad, AOS y – Estabilidad a los Rayos Ultravioletas, basados en el uso de geotextiles Para Drenaje Subterráneo, tabla; para Separación, Tabla 3; para Estabilización, Tabla 4 y para Control Permanente de la Erosión, Tabla 5.					
Tamaño aparente de abertura	ASTM D 4751	mm						
Estabilidad a los rayos ultravioletas	ASTM D 4355	%						

### Nota de las propiedades de la tabla 1.

1.- La clase requerida de geotextil está designada en las tablas 2, 3, 4 y 5 para la aplicación indicada. La severidad de las condiciones de instalación para la aplicación generalmente dictan la clase requerida de geotextil. La clase 1 está especificada para condiciones más severas o ásperas donde existe un mayor potencial de daño para el geotextil. Y las clases 2 y 3 están especificadas para condiciones menos severas.

2.- Medido de acuerdo con ASTM D-4632.

3.- Cuando se requieren uniones cosidas, consultar el apéndice XX para los requisitos de uniones traslapadas.

4.- La resistencia al corte "Marv" requerida para geotextiles de filamentos continuos tejidos, es de 250 N.

Tabla 2. Requisitos de Propiedades de Geotextiles para Refuerzo de Pavimento.

Pruebas	Método de Prueba	Unidades	Requerimientos
Resistencia a la Ruptura	ASTM d 4632	N	450
Masa por Area Unitaria	ASTM d 3776	gm/m <sup>2</sup>	140
Elongacion Ultima	ASTM d 4632	%	≥ 50
Retención de Asfalto <sup>(1)</sup>	Texas D.O.T. item 3099	l/m <sup>2</sup>	(1,2)
Punto de Fusión	ASTM d 276	°C	150

Notas a las Propiedades de la Tabla 7.

1. Asfalto requerido solo para saturar la fibra de pavimentado. La retención del asfalto debe proporcionarse en la certificación del fabricante (referirse a la sección 4). Los valores no indican la velocidad de aplicación del asfalto para la construcción. Refiérase al apéndice titulado guías de construcción/instalación para discusión de la velocidad de aplicación del asfalto.
2. la propiedad de retención del asfalto del producto debe reunir el MARV brindado por la certificación del fabricante (referirse a la sección 4).

Tabla 3 Requisitos de Propiedades de Geotextiles para Separación.

Pruebas	Métodos de Prueba	Unidades	Requerimientos
Geotextil Clase 2 de la Tabla 1 (2)			
Permitividad	ASTM d 4491	seg <sup>-1</sup>	0.02 <sup>(2)</sup>
Tamaño Aparente de Abertura AOS	ASTM d 4751	mm	0.60 del valor máximo promedio del rollo
Estabilidad Ultravioleta (Resistencia Retenida)	ASTM d 4355	%	50 % después de 500 hr de exposición.

Notas a las Propiedades de la Tabla 3.

1. Selección estándar del geotextil. el ingeniero puede especificar un geotextil clase 3 de a partir de la Tabla 1 basado en uno o mas de los siguientes:
  - a) El ingeniero ha encontrado que la clase 3 de los geotextiles tiene suficiente supervivencia basado en experiencia de campo.
  - b) El ingeniero ha encontrado que los geotextiles clase 3 tienen suficiente supervivencia basado en pruebas de laboratorio e inspección visual de una muestra geotextil removida de una sección de prueba en campo construida bajo condiciones de campo anticipadas.
  - c) El espesor del recubrimiento del agregado de la primera carga sobre el geotextil excede los 300 mm y el diámetro del agregado es menor a 50 mm.
  - c) El espesor del recubrimiento del agregado de la primera carga sobre el geotextil excede los 150 mm y el diámetro del agregado es menor a 30 mm y la presión de contacto del equipo de construcción es menor a 550 kPa.
2. Valor estándar. La permitividad del geotextil debe ser mayor que aquella del suelo ( $\Psi_g > \Psi_s$ ). El ingeniero puede también requerir la permeabilidad del geotextil mayor que la del suelo ( $k_g > k_s$ ).

Tabla 4 Requisitos de Propiedades de Geotextiles para Estabilización.

Pruebas	Métodos de Prueba	Unidades	Requerimientos
Geotextil Clase 1 de la Tabla 1 (1)			
Permitividad	ASTM D 4491	seg <sup>-1</sup>	0.05 <sup>(2)</sup>
Tamaño Aparente de Abertura AOS	ASTM D 4751	mm	0.43 del valor máximo promedio del rollo
Estabilidad Ultravioleta (Resistencia Retenida)	ASTM D 4355	%	50 % después de 500 hr de exposición.

Notas a las Propiedades de la Tabla 4.

- Selección estándar del geotextil. el ingeniero puede especificar un geotextil clase 2 o 3 a partir de la tabla 1 basado en lo siguiente:
  - El ingeniero ha encontrado que la clase del geotextil tiene una supervivencia basado en la experiencia en campo.
  - el ingeniero ha encontrado que la clase del geotextil tiene suficiente supervivencia basado en las pruebas de laboratorio y en la inspección visual de una muestra de geotextil removida de la sección de prueba en campo construido bajo condiciones anticipadas de campo.
- valor estándar. la permitividad del geotextil debe ser mayor que aquella del suelo  $(\Psi_g) \Psi_s$ . el ingeniero puede también requerir la permeabilidad del geotextil mayor que la del suelo  $(k_g > k_s)$ .

Tabla 5 Requisitos de Propiedades de Geotextiles para Control de Erosión Permanente.

pruebas	Métodos de Prueba	Unidades	Requerimientos		
			Porcentaje In-Situ de Suelo que Pasa la Malla .075 mm (1)		
			< 15	15 a 50	> 50
Geotextiles tejidos de un sólo filamento clase 2 de la tabla 1 (2) El resto de los geotextiles clase 1 de la tabla 1 (2,3)					
Permitividad	ASTM d 4491 <sup>(4)</sup>	seg <sup>-1</sup>	0.7	0.2	0.1
Tamaño Aparente de Abertura AOS	ASTM d 4751 <sup>(4)</sup>	mm	0.43 valor máximo promedio del rollo	0.25 valor máximo promedio del rollo	0.22 <sup>(5)</sup> valor máximo promedio del rollo
Estabilidad Ultravioleta (Resistencia Retenida)	ASTM d 4355	%	50 % después de 500 hr de exposición.		

**Notas a las Propiedades de la Tabla 5.**

- 1 Basado en el análisis del tamaño del grano del suelo in-situ de acuerdo con AASHTO T88.
2. Como una guía general la selección estándar del geotextil es apropiada para condiciones de severidad menor o igual que una de las siguientes
  - a) La capa ARMOR de piedra no pese en exceso de 100 kg, la altura de caída de la piedra sea menor a 1 m y que no se requiera de capa de bedding de agregado.
  - b) La capa ARMOR de piedra pese en exceso a 100 kg, la altura de caída de la piedra sea menor a 1 m y que el geotextil este protegido por una capa bedding de agregado de 150 mm de espesor diseñado ser compatible con la capa ARMOR. Aplicaciones más severas requieren un aseguramiento de la supervivencia del geotextil basado en una sección trial de campo y puede requerir un geotextil con propiedades de resistencia mayores.
- 3 El ingeniero puede especificar un geotextil clase 2 de la tabla 1 basado
  - a) el ingeniero ha encontrado que la clase 2 del geotextil de la tabla 1 tiene supervivencia suficiente basado en la experiencia en campo.
  - b) El ingeniero ha encontrado que los geotextiles de la clase 2 tienen suficiente supervivencia basado en las pruebas de laboratorio y en la inspección visual de una muestra de geotextil removida de la sección de prueba en campo construido bajo condiciones anticipadas de campo.
  - c) Que la piedra de la capa ARMOR pesa menos de 100 kg, la altura de la caída de la piedra es menos a 1 m y que el geotextil esta protegido por una capa bedding de agregado de 150 mm diseñada para ser compatible con la capa ARMOR.
  - d) La piedra de la capa ARMOR no exceda a 100 kg, la piedra este colocada con una altura de caída cero.
4. Estos valores de la propiedad de filtración están basados en los tamaños predominantes de partículas del suelo in-situ. Además del valor estándar de la permitividad, el ingeniero puede requerir pruebas de desempeño y/o permeabilidad del geotextil basado en el diseño de ingeniería para los sistemas del control de erosión sobre ambientes de suelos problemáticos.
5. El diseño del geotextil del sitio específico debe ser desarrollado especialmente si se encuentran uno o mas de los siguientes ambientes de suelos problemáticos: suelos altamente erosionables tales como sedimentos no cohesivos, suelos gap graduado, suelos laminados alternos arena/sedimento, todos?? dispersos y/o piedra flúor.
6. para suelos cohesivos con un índice de plasticidad mayor a 7, el valor del rollo máximo promedio del geotextil para un tamaño aparente de abertura es 0.30 mm.

Tabla 6. Requisitos de Propiedades de Geotextiles para Barrera Temporal de Sedimento.

Pruebas	Métodos de Prueba	Unidades	Requerimientos		
			Barrera Sedimentada Soportada	Barrera Sedimentada No Soportada	
				Elongacion del Geotextil $\geq 50\%$ (1)	Elongacion del Geotextil $< 50\%$ (1)
Espaciamiento Máximo de Postes			1.2 m	1.2 m	2 m
Resistencia a la Ruptura en Dirección de Máquina Dirección Transversal de Máquina	ASTM d 4632	N	400	550	550
			400	450	450
Permitividad(1)	ASTM d 4491	seg <sup>-1</sup>	0.05	0.05	0.05
Tamaño Aparente de Abertura	ASTM d 4751	mm	0.60 del valor promedio máximo del rollo	0.60 del valor promedio máximo del rollo	0.60 del valor promedio máximo del rollo
Estabilidad ultravioleta (Resistencia Retenida)	ASTM d 4355	%	70% después de 500 hr de exposición	70% después de 500 hr de exposición	

Notas a las Propiedades de la Tabla 6.

1. Como se midió de acuerdo con el ASTM d 4632.
2. El soporte de la barrera de sedimento deberá consistir de alambre calibre 14 con un espaciamento de malla de 150 mm por 150 mm o malla prefabricada polimérica de longitud equivalente.
3. Estos valores estándar de la propiedad de filtración están basados en evidencia empírica con una variedad de sedimentos. Para las áreas ambientalmente sensibles, se debe efectuar una revisión de experiencias previas y/o en sitio o efectuar pruebas del geotextil específicos de la región por una agencia que confirme lo adecuado de estos requerimientos.



Tabla 7.- Requerimientos de Geotextiles para Drenaje Subterráneo.

Pruebas	Métodos de Prueba	Unidades	Requerimientos		
			Porcentaje In-Situ de Suelo que Pasa la Malla 0.075 mm (1)		
			< 15	15 a 50	> 50
Geotextiles Clase 2 de la Tabla 1 (2)					
Permitividad (3)(4)	ASTM D 4491	seg <sup>-1</sup>	0.5	0.2	0.1
Tamaño de Abertura Aparente AOS(3)(4)	ASTM D 4751	mm	0.43 valor máximo promedio del rollo	0.25 valor máximo promedio del rollo	0.22 <sup>(5)</sup> valor máximo promedio del rollo
Estabilidad Ultravioleta	ASTM D 4355	%	50 % después de 500 hr de exposición		

### Notas a las Propiedades de la Tabla 2

- 1 Basado en el análisis del tamaño del grano del suelo en sitio de acuerdo con AASHTO t88.
2. Selección estándar del geotextil. El ingeniero puede especificar un geotextil clase 3 de la Tabla 1 para usos de drenaje en trinchera basado en una o mas de las siguientes:
  - a) El ingeniero ha encontrado que la clase 3 de los geotextiles tiene suficiente supervivencia basado en experiencia de campo.
  - b) El ingeniero ha encontrado que los geotextiles clase 3 tienen suficiente supervivencia basado en pruebas de laboratorio e inspección visual de una muestra geotextil removida de una sección de prueba en campo construida bajo condiciones de campo anticipadas.
  - c) La profundidad del drenaje subterráneo es menos de 2 metros, el diámetro del agregado del drenaje es menor a 30 mm y el requerimiento de la compactación es igual o menor al 95% de AASHTO 7-99.
3. Estos valores estándar de la propiedad de filtración están basados en los tamaños predominantes de partícula del suelo in-situ. Además del valor estándar de la permitividad, el ingeniero puede requerir pruebas de desempeño y/o permeabilidad del geotextil basado en el diseño de la ingeniería para sistemas de drenaje en ambientes de suelo problemáticos.
4. El diseño del geotextil específico del sitio debe ser desarrollado especialmente si se encuentra uno o mas de los siguientes ambientes de suelo problemáticos: suelos inestables o altamente erosionables tales como sedimentos no cohesivos; suelos de gap graduado; suelos alternos arena/sedimentos laminados; arcillas dispersas y/o piedra flúor.
- 5 Para suelos cohesivos con un índice plástico mayor a 7, el valor del rollo máximo promedio del geotextil para un tamaño aparente de abertura es 0.30mm.

## **4.3 MUESTREO**

### **4.3.1 Definición de conceptos**

Para el muestreo de los geotextiles es necesario establecer la definición de los conceptos de unidad de producción, lote, muestra, muestra de laboratorio y espécimen.

#### **4.3.1.2 Unidad de producción.-**

Es la máxima porción de material, fabricada dentro de un período de tiempo determinado empleando materia prima de características similares dentro del proceso, que se prepara para el manejo, almacenamiento y transporte adecuados del mismo ; se le puede denominar, rollo, paquete, paca, etc.

#### **4.3.1.3 Lote**

El lote es la denominación que se le da a un grupo de una o más unidades de producción, con características similares tanto de producción como del material constituyente, seleccionadas con fines de almacenamiento, embarque o de muestreo para análisis estadístico.

#### **4.3.1.4 Muestra**

Es la porción de material ( rollo, paquete, etc.) representativa del lote de procedencia para llevar registros de producción o para obtener muestras de laboratorio.

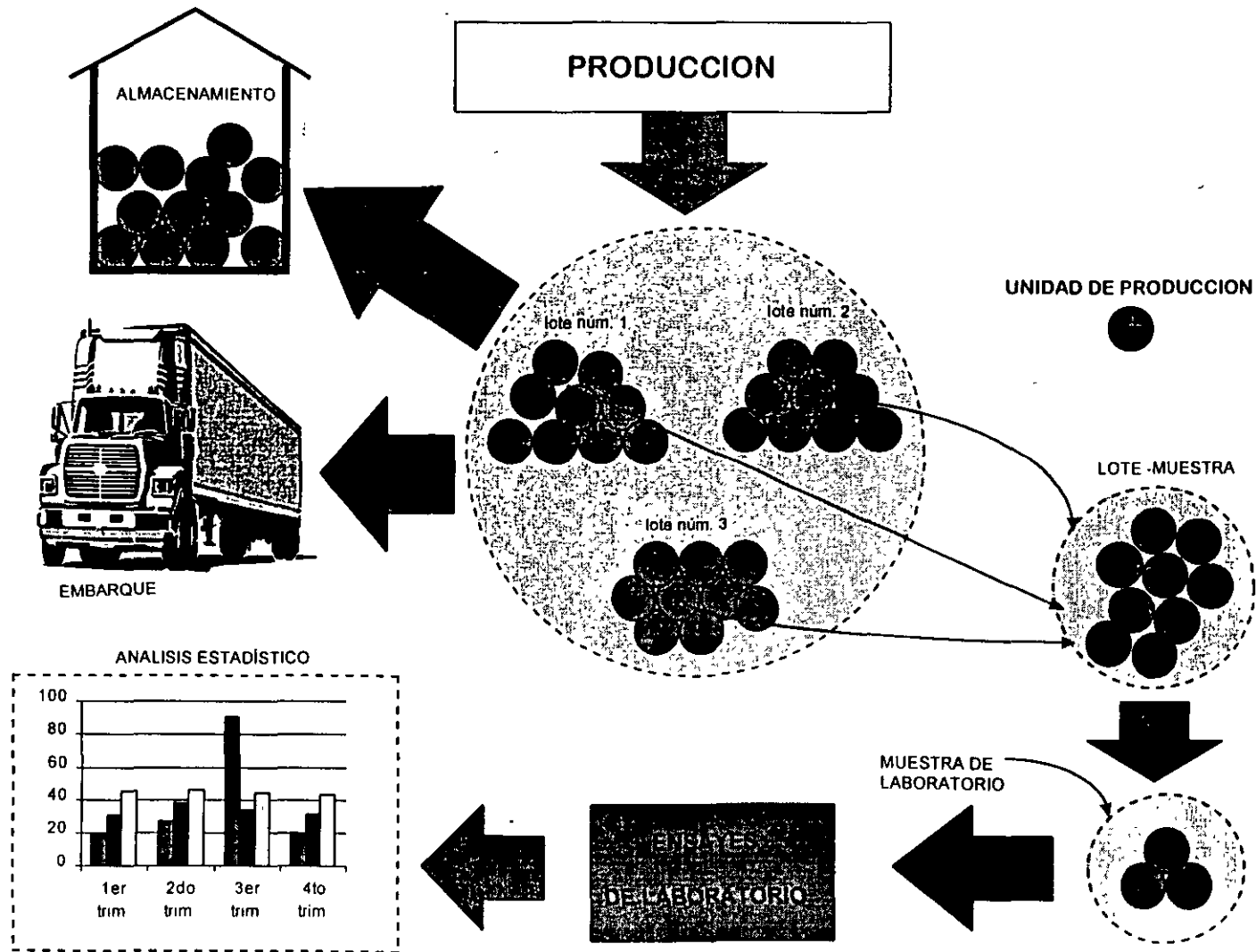
#### **4.3.1.5 Muestra de laboratorio**

Es la porción de material representativa de la unidad de producción, rollo, paquete, etc., de procedencia para obtener los especímenes necesarios para la realización de los ensayos de laboratorio.

#### **4.3.1.6 Especímenes de prueba**

Se obtienen a partir de la muestra de laboratorio, sobre las que se ejecutan las pruebas para determinar las características específicas del material.

# ESQUEMA DE MUESTREO DE GEOTEXILES



El muestreo del geotextil puede realizarse en diferentes lugares y condiciones, tales como durante la producción, en el almacén de la planta o de la obra y en el momento del embarque o desembarque, para lo cual las unidades de producción, rollos, paquetes, etc., deben estar perfectamente identificadas con la fecha de producción, periodo, materia prima, espesor, densidad y dimensiones de la unidad de producción.

Si el muestreo se realiza durante la producción, para formar los lotes es necesario conocer la longitud del geotextil que contiene cada rollo, tipo de materia prima empleado, espesor y densidad del producto.

Cuando el muestreo se realiza en el almacén, se debe emplear el registro que se tenga del material, verificando que las unidades de producción estén perfectamente identificados para proceder a formar el o los lotes. En caso de que algunos rollos no estén identificados de acuerdo con lo establecido, éstos deberán ser retirados y no formarán parte del o los lotes por muestrear.

Durante el embarque o recepción del geotextil el muestreo debe realizarse tomando en cuenta la nota de envío o la factura, verificando que físicamente las unidades de producción estén perfectamente identificados.

Independientemente del lugar de muestreo, una vez identificado y clasificado el geotextil, se formarán el o los lotes, con los cuales se formará un lote muestra que a su vez será la fuente para la obtención de las muestras de laboratorio, de donde finalmente se obtendrán los especímenes de prueba.

Para determinar el tamaño del lote muestra o el de muestra para laboratorio se empleará la siguiente tabla

#### DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE LOTE MUESTRA Y MUESTRAS DE LABORATORIO

NUMERO DE UNIDADES EN EL LOTE O EN EL LOTE MUESTRA	NÚMERO DE UNIDADES QUE DEBEN SELECCIONARSE
1 a 2	1
3 a 8	2
9 a 27	3
28 a 64	4
65 a 125	5
126 a 216	6
217 a 343	7
344 a 512	8
513 a 729	9
730 a 1000	10

## **4.4 ENSAYES**

### **4.4.1 Resistencia a la tensión y alargamiento**

La resistencia a la tensión se realiza en probetas rectangulares de 100 x 200mm ; deben obtenerse dos grupos de probetas uno, con el lado más largo paralelo a la dirección de fabricación y el otro, con el lado más largo perpendicular a la dirección de fabricación. La aplicación de carga debe hacerse con una máquina de desplazamiento de platina constante o con una de deformación constante. El número de especímenes que debe ser ensayado en cada sentido dependerá de la experiencia que tenga el laboratorio que realiza la prueba, para lo cual deberá contar con un valor de coeficiente de variabilidad aceptable, y en caso contrario debe obtenerlo mediante la realización de un número de pruebas suficientes y emplear la siguiente ecuación.

### **4.4.2 Temperatura de fusión**

### **4.4.3 Retención de asfalto**

### **4.4.4 Resistencia al punzonamiento**

### **4.4.5 Permeabilidad**

### **4.4.6 Resistencia al estallamiento Mullen**

### **4.4.7 Resistencia a la abrasión**

### **4.4.8 Tamaño de abertura aparente, AOS**

### **4.4.9 Resistencia al desgarre trapezoidal**

### **4.4.10 Resistencia de la costura**

### **4.4.11 Resistencia a la exposición de rayos ultravioleta**

## **5.0 BIBLIOGRAFIA**

**Especificaciones Generales de Construcción. Parte Novena, Libro Cuarto  
Secretaría de Comunicaciones y Transportes. 2ª Edición. México 1977.**

**Normas de Calidad de Calidad de los Materiales. Libro 4.01.01.  
Secretaria de Comunicaciones y Transportes. México 1995.**

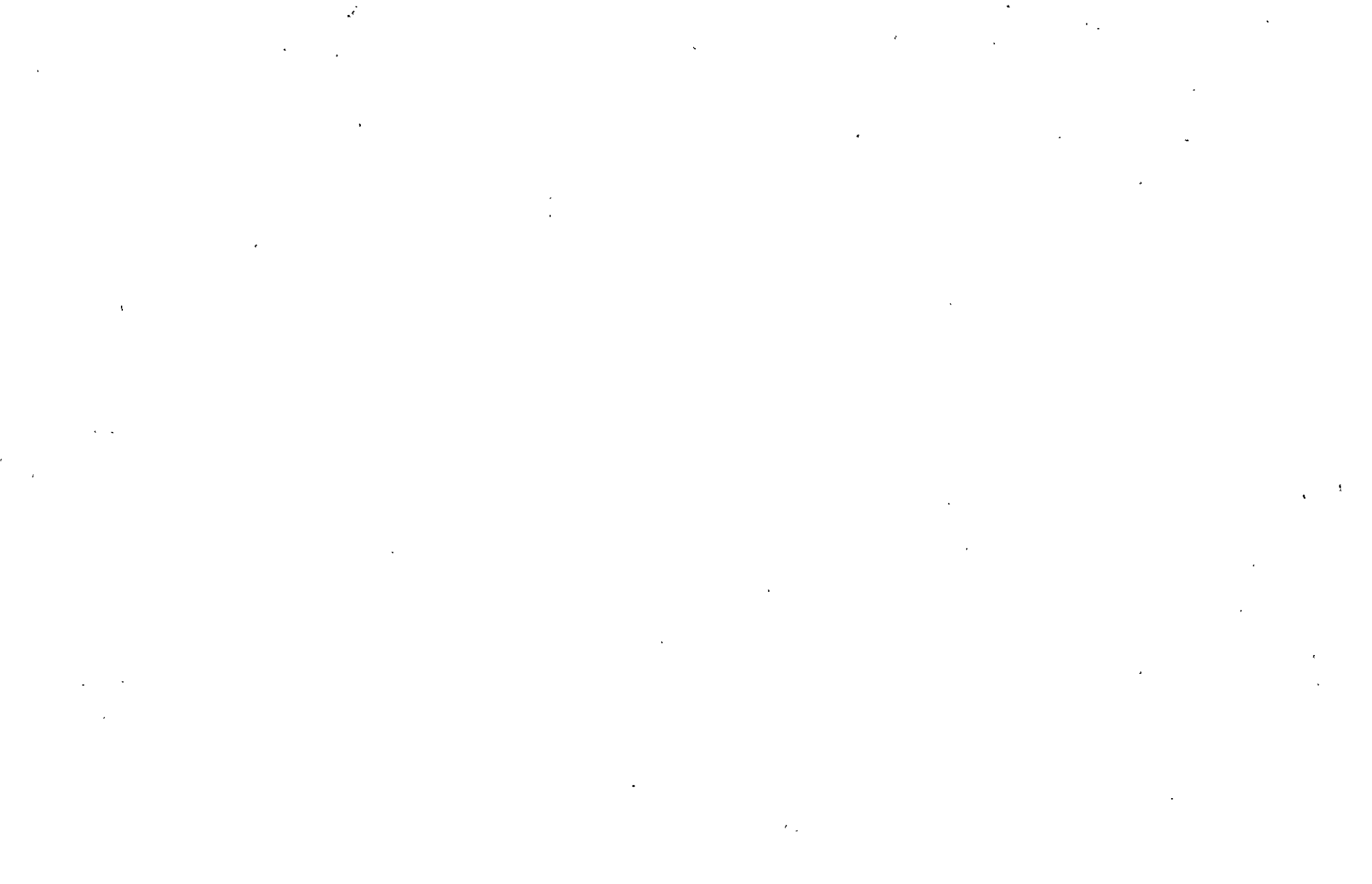
**Norma Mexicana NMX-B-292-1988  
Secretaría de Comercio y Fomento Industrial**

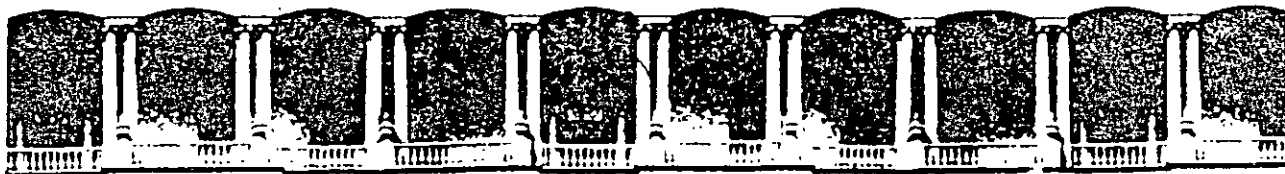
**Especificación Estándar para Geotextiles AASHTO M 288-96**

**Designación ASTM D 4354 - 84.**

**Designación ASTM D 4759 - 88.**

**Designación ASTM D 4873 - 88.**





**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**DIPLOMADO EN SISTEMAS DE CALIDAD EN INGENIERÍA  
DE PROYECTO Y CONSTRUCCIÓN**

**MODULO II**

**CONTROL DE CALIDAD DE  
MATERIALES Y OBRAS**

**PARTE 2  
SUPERVISIÓN Y CONTROL DE  
LA CALIDAD DE OBRAS**

**TEMA**

**DISEÑO Y CONTROL DE  
MEZCLAS DE CONCRETO**

**EXPOSITOR: M. en C. RAÚL VICENTE OROZCO SANTOYO**

**PALACIO DE MINERÍA  
1997**



# **Diseño y control de mezclas de concreto**

**Steven H. Kosmatka y William C. Panarese**

**Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.**

# Diseño y control de mezclas de concreto

Título original en inglés:  
**Design and Control of Concrete Mixtures**  
13th edition.

© 1988 Portland Cement Association  
© 1992 Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.

Traducción y adaptación:  
**Ing. Manuel Santiago Bringas**

Producción editorial:  
**Arq. Heraclio Esqueda Huidobro**  
**Ing. Raúl Huerta Martínez**

Tipografía:  
**Sr. Jorge A. Lavadores M.**

Este libro fue publicado originalmente en inglés. Por lo tanto, cuando existan dudas respecto de algún significado preciso, deberá tomarse en cuenta la versión en inglés. En esta publicación se respetan escrupulosamente las ideas, puntos de vista y especificaciones que presenta. Por lo tanto el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. no asume responsabilidad alguna (incluyendo, pero no limitando, la que se derive de riesgos, calidad de materiales, métodos constructivos, etc.) por la aplicación de los principios o procedimientos de este volumen.

Copyright © 1988 Portland Cement Association

Todos los derechos reservados incluyendo los derechos de reproducción y uso de cualesquier forma o medio, incluyendo el fotocopiado por cualquier proceso fotográfico, o por medio de dispositivo mecánico o electrónico, de impresión, escrito u oral, o grabación para reproducción audio o visual o para el uso en cualquier sistema o dispositivo de almacenamiento y recuperación de la información, a menos que exista permiso escrito obtenido de los propietarios del Copyright.

*La presentación y disposición en conjunto del DISEÑO Y CONTROL DE MEZCLAS DE CONCRETO son propiedad del editor. Ninguna parte de esta obra puede ser reproducida o transmitida, mediante ningún sistema o método, electrónico o mecánico (incluyendo el fotocopiado, la grabación o cualquier sistema de almacenamiento y recuperación de información), sin consentimiento por escrito del editor.*

Derechos reservados:

© 1992 Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.  
Av. Insurgentes Sur 1846, Col. Florida, Méx. D.F. C.P. 01030

Miembro de la Cámara Nacional de la  
Industria Editorial. 1052

Primera edición: 1992.

*Impreso en México*

ISBN 968-464-074-9

# Contenido

Prefacio . . . . .	vii	Calor de hidratación . . . . .	23
<b>Capítulo 1 Fundamentos sobre el concreto . . . . .</b>	<b>1</b>	Pérdida por ignición . . . . .	25
Concreto recién mezclado . . . . .	2	Peso específico . . . . .	25
Mezclado . . . . .	2	Embarque del cemento . . . . .	25
Trabajabilidad . . . . .	2	Almacenamiento del cemento . . . . .	25
Consolidación . . . . .	2	Cemento caliente . . . . .	26
Hidratación, tiempo de fraguado, endurecimiento <sup>3</sup>		<b>Capítulo 3 Agua de mezclado para el concreto . . . . .</b>	<b>27</b>
Concreto endurecido . . . . .	4	Carbonatos y bicarbonatos alcalinos . . . . .	27
Curado húmedo . . . . .	4	Clouros . . . . .	28
Velocidad de secado del concreto . . . . .	4	Sulfatos . . . . .	28
Resistencia . . . . .	5	Otras sales comunes . . . . .	29
Peso Unitario . . . . .	6	Sales de hierro . . . . .	29
Resistencia a congelación y deshielo . . . . .	7	Diversas sales inorgánicas . . . . .	29
Permeabilidad y hermeticidad . . . . .	8	Agua de mar . . . . .	29
Resistencia al desgaste . . . . .	9	Aguas ácidas . . . . .	29
Estabilidad volumétrica . . . . .	10	Aguas alcalinas . . . . .	29
Control de agrietamientos . . . . .	11	Aguas de enjuague . . . . .	29
<b>Capítulo 2 Cementos Portland . . . . .</b>	<b>13</b>	Aguas de desperdicios industriales . . . . .	30
Fabricación del cemento portland . . . . .	13	Aguas negras . . . . .	30
Tipos de cemento portland . . . . .	16	Impurezas orgánicas . . . . .	30
Tipo I . . . . .	16	Azúcar . . . . .	30
Tipo II . . . . .	17	Sedimentos o partículas en suspensión . . . . .	30
Tipo III . . . . .	17	Aceites . . . . .	30
Tipo IV . . . . .	17	Algas . . . . .	30
Tipo V . . . . .	17	<b>Capítulo 4 Agregados para concreto . . . . .</b>	<b>31</b>
Cementos portland con inclusores de aire . . . . .	17	Características de los agregados . . . . .	32
Cemento portland blanco . . . . .	18	Granulometría . . . . .	32
Cementos hidráulicos mezclados . . . . .	18	Granulometría de los agregados finos . . . . .	35
Tipo IS . . . . .	18	Granulometría de los agregados gruesos . . . . .	36
Tipo IP y tipo P . . . . .	18	Agregados con granulometría discontinua . . . . .	37
Tipo I (PM) . . . . .	18	Forma de partícula y textura superficial . . . . .	37
Tipo S . . . . .	18	Peso volumétrico y vacíos . . . . .	38
Tipo I (SM) . . . . .	18	Peso específico . . . . .	38
Cementos de albañilería . . . . .	19	Absorción y humedad superficial . . . . .	38
Cementos expansivos . . . . .	19	Resistencia a congelación y deshielo . . . . .	39
Cementos especiales . . . . .	20	Propiedades de humedecimiento y secado . . . . .	41
Cementos para pozo de petróleo . . . . .	20	Resistencia al desgaste y al derrapamiento . . . . .	41
Cementos portland impermeabilizados . . . . .	20	Resistencia y contracción . . . . .	41
Cementos plásticos . . . . .	20	Resistencia a los ácidos y a otras sustancias	
Cementos de fraguado regulado . . . . .	20	corrosivas . . . . .	41
Cementos con adiciones funcionales . . . . .	20	Resistencia al fuego y propiedades térmicas . . . . .	42
Disponibilidad de cementos . . . . .	20	Materiales perjudiciales y reactividad con los álcalis . . . . .	42
Compuestos químicos en el cemento portland . . . . .	21	Reactividad álcali-agregado . . . . .	43
Propiedades del cemento portland . . . . .	22	Beneficio de agregados . . . . .	45
Finura . . . . .	23	Manejo y almacenamiento de agregados . . . . .	45
Sanidad . . . . .	23	Agregado de dragado marítimo . . . . .	45
Consistencia . . . . .	23	Reciclado de concreto viejo . . . . .	45
Tiempo de fraguado . . . . .	23	<b>Capítulo 5 Concreto con aire incluido . . . . .</b>	<b>49</b>
Fraguado falso . . . . .	23	Propiedades del concreto con aire incluido . . . . .	49
Resistencia a la compresión . . . . .	23		

Resistencia a congelación-deshielo . . . . .	50	Agentes a prueba de humedad . . . . .	79
Resistencia a compuestos y sales descongelantes . . . . .	52	Agentes impermeabilizantes . . . . .	79
Secado al aire . . . . .	53	Aditivos colorantes . . . . .	79
Tratamiento de superficies descascaradas . . . . .	53	Ayudas de bombeo . . . . .	79
Resistencia a los sulfatos . . . . .	53	Aditivos químicos para reducir la reactividad con los álcalis . . . . .	80
Resistencia a la reactividad álcali-sílice . . . . .	53	Aditivos y agentes para unir . . . . .	80
Resistencia . . . . .	53	Lechadas . . . . .	80
Trabajabilidad . . . . .	54	Agentes productores de gas . . . . .	80
Materiales inclusores de aire . . . . .	55	Exclusores de aire . . . . .	80
Factores que afectan el contenido de aire . . . . .	56	Aditivos fungicidas, germicidas e insecticidas . . . . .	80
Cemento . . . . .	56	<b>Capítulo 7 Proporcionamiento de mezclas de concreto normal . . . . .</b>	<b>83</b>
Agregado grueso . . . . .	56	Elección de las características de la mezcla . . . . .	83
Agregado fino . . . . .	57	Relación entre la relación agua-cemento y la resistencia . . . . .	83
Agua de mezclado y revenimiento . . . . .	57	Resistencia . . . . .	84
Revenimiento y vibración . . . . .	58	Relación agua-cemento . . . . .	84
Temperatura del concreto . . . . .	58	Agregados . . . . .	84
Aditivos y agentes colorantes . . . . .	58	Aire incluido . . . . .	86
Efecto del mezclado . . . . .	60	Exposición ligera . . . . .	86
Transporte y manejo . . . . .	61	Exposición moderada . . . . .	86
Acabados prematuros . . . . .	61	Exposición severa . . . . .	86
Pruebas para determinar el contenido de aire . . . . .	61	Revenimiento . . . . .	86
Contenidos de aire recomendados . . . . .	63	Contenido de agua . . . . .	87
<b>Capítulo 6 Aditivos para el concreto . . . . .</b>	<b>67</b>	Contenido de cemento y tipo de cemento . . . . .	88
Aditivos inclusores de aire . . . . .	69	Aditivos . . . . .	88
Aditivos reductores de agua . . . . .	69	Proporcionamiento . . . . .	89
Aditivos retardantes . . . . .	70	Proporcionamientos a partir de datos de campo . . . . .	89
Aditivos acelerantes . . . . .	70	Proporcionamientos por mezclas de prueba . . . . .	90
Superfluidizantes (Reductores de agua de alto rango) . . . . .	71	Mediciones y cálculos . . . . .	91
Aditivos minerales finamente divididos . . . . .	72	Peso volumétrico y rendimiento . . . . .	
Materiales cementantes . . . . .	72	Volumen absoluto . . . . .	
Materiales puzolánicos . . . . .	73	Ejemplos de proporcionamiento de mezcla . . . . .	91
Materiales puzolánicos y cementantes . . . . .	74	Ejemplo 1. Método de volúmenes absolutos . . . . .	91
Materiales nominalmente inertes . . . . .	74	Condiciones y especificaciones . . . . .	91
Efectos en el concreto debidos a los aditivos minerales . . . . .	74	Resistencia . . . . .	92
Efecto sobre el concreto fresco . . . . .	74	Relación agua-cemento . . . . .	92
Requerimientos de agua . . . . .	74	Tamaño del agregado grueso . . . . .	92
Contenido de aire . . . . .	74	Contenido de aire . . . . .	92
Trabajabilidad . . . . .	75	Revenimiento . . . . .	92
Segregación y sangrado . . . . .	75	Contenido de agua . . . . .	92
Calor de hidratación . . . . .	75	Contenido de cemento . . . . .	92
Tiempo de fraguado . . . . .	75	Contenido de agregado grueso . . . . .	92
Acabados . . . . .	75	Contenido de aditivo . . . . .	92
Bombeo . . . . .	75	Contenido de agregado fino . . . . .	92
Proporcionamiento . . . . .	75	Humedad . . . . .	93
Curado . . . . .	75	Mezcla de prueba . . . . .	93
Efectos en el concreto endurecido . . . . .	76	Ajustes a la mezcla . . . . .	94
Resistencia . . . . .	76	Reductores de agua . . . . .	94
Contracción por secado y fluencia . . . . .	76	Puzolanas . . . . .	95
Permeabilidad y absorción . . . . .	76	Ejemplo 2. Mezcla de prueba de laboratorio haciendo uso del método PCA de la relación agua-cemento . . . . .	95
Color del concreto . . . . .	77	Especificaciones . . . . .	95
Reactividad álcali-agregado . . . . .	77	Relación agua-cemento . . . . .	96
Resistencia al ataque de sulfatos . . . . .	77	Tamaño de agregado . . . . .	96
Corrosión del acero ahogado . . . . .	77	Contenido de aire . . . . .	96
Carbonatación . . . . .	77	Revenimiento . . . . .	96
Resistencia a congelación y deshielo . . . . .	78	Cantidades a dosificar . . . . .	96
Descascaramiento por productos químicos descongelantes . . . . .	78	Trabajabilidad . . . . .	
Resistencia química . . . . .	78	Proporciones de la mezcla . . . . .	
Sanidad . . . . .	78		
Agentes para la trabajabilidad . . . . .	78		
Inhibidores de corrosión . . . . .	78		

Ajustes de la mezcla . . . . .	96	Agregado expuesto . . . . .	131
Concreto para trabajos pequeños . . . . .	101	Pinturas y recubrimientos claros . . . . .	131
Conclusiones sobre el diseño . . . . .	101	Colocación de concreto bajo el agua . . . . .	132
<b>Capítulo 8 Dosificación, mezclado, transporte y manejo del concreto . . . . .</b>	<b>103</b>	Técnicas de colado especiales . . . . .	133
Dosificación . . . . .	103	Precauciones . . . . .	133
Mezclado del concreto . . . . .	103	<b>Capítulo 10 Curado del concreto . . . . .</b>	<b>135</b>
Mezclado estacionario . . . . .	104	Métodos y materiales de curado . . . . .	136
Concreto premezclado . . . . .	104	Estancamiento o inmersión . . . . .	136
Concreto mezclado con dosificadora móvil (Mezclador continuo) . . . . .	105	Rociado o aspersión . . . . .	136
Mezcladoras de alta energía . . . . .	105	Cubiertas húmedas . . . . .	136
Remezclado de concreto . . . . .	106	Papel impermeable . . . . .	137
Transporte y manejo del concreto . . . . .	106	Láminas de plástico . . . . .	137
Equipo para el transporte y manejo del concreto . . . . .	106	Compuestos para curado formadores de membrana . . . . .	138
Elección del mejor método . . . . .	108	Cimbras dejadas en su lugar . . . . .	139
Trabajo a nivel del terreno y por abajo del mismo . . . . .	110	Curado al vapor . . . . .	139
Trabajo por encima del nivel del terreno . . . . .	111	Mantas o cubiertas aislantes . . . . .	140
<b>Capítulo 9 Colocación y acabado del concreto . . . . .</b>	<b>113</b>	Curado por métodos eléctricos, con aceite y con rayos infrarrojos . . . . .	140
Preparación anterior al colado . . . . .	113	Periodo de curado y temperatura . . . . .	140
Forma de depositar el concreto . . . . .	113	<b>Capítulo 11 Colocación de concreto en climas cálidos . . . . .</b>	<b>143</b>
Consolidación del concreto . . . . .	114	Toma de precauciones . . . . .	143
Vibración . . . . .	115	Efectos de las temperaturas elevadas en el concreto . . . . .	143
Vibración interna . . . . .	115	Enfriamiento de los materiales del concreto . . . . .	144
Vibración externa . . . . .	116	Preparación antes del colado . . . . .	147
Losas de concreto . . . . .	117	Transporte, colado, acabado . . . . .	147
Preparación de la subrasante . . . . .	117	Agrietamientos por contracción plástica . . . . .	148
Sub-base . . . . .	117	Curado y protección . . . . .	149
Barreras de vapor y prevención de problemas de humedad . . . . .	118	Aditivos . . . . .	149
Cimbras . . . . .	118	Calor de hidratación . . . . .	149
Colado y tendido . . . . .	118	<b>Capítulo 12 Colocación de concreto en climas fríos . . . . .</b>	<b>151</b>
Nivelación (Enrasado) . . . . .	118	Efecto del congelamiento del concreto fresco . . . . .	151
Aplanado . . . . .	119	Desarrollo de resistencia del concreto a bajas temperaturas . . . . .	151
Bordeado y junteado . . . . .	120	Calor de hidratación . . . . .	153
Emparejado . . . . .	120	Mezclas especiales de concreto . . . . .	153
Alisado . . . . .	120	Concreto con aire incluido . . . . .	154
Escobillado . . . . .	121	Temperatura del concreto . . . . .	154
Patrones y texturas . . . . .	121	Temperatura del concreto al mezclarlo . . . . .	154
Curado y protección . . . . .	121	Temperatura de los agregados . . . . .	155
Colados sobre concreto endurecido . . . . .	122	Temperatura del agua de mezclado . . . . .	156
Juntas de construcción de liga en concreto estructural . . . . .	122	Ecuación para la temperatura del concreto . . . . .	156
Preparación del concreto endurecido . . . . .	122	Temperatura del concreto al colarlo y conservarlo . . . . .	156
Unión de concreto nuevo a concreto previamente endurecido . . . . .	122	Pruebas de control . . . . .	156
Elaboración de juntas en pisos y en muros . . . . .	124	Colados a nivel del terreno . . . . .	158
Juntas de aislamiento . . . . .	124	Colados por encima del terreno . . . . .	159
Juntas de contracción . . . . .	124	Recintos . . . . .	161
Juntas de construcción . . . . .	126	Materiales para aislamiento . . . . .	162
Relleno de juntas para pisos . . . . .	127	Calefactores . . . . .	163
Disposición de juntas de pisos . . . . .	127	Duración de la calefacción . . . . .	164
Pisos sin juntas . . . . .	127	Concepto de madurez . . . . .	164
Descimbrado . . . . .	128	Curado húmedo . . . . .	164
Resanado, limpieza y acabado . . . . .	128	Conclusión del periodo de calefacción . . . . .	165
Agujeros, defectos y capas superpuestas . . . . .	129	Remoción de cimbras y apuntalamiento . . . . .	165
Curado de parches . . . . .	130	<b>Capítulo 13 Cambios de volumen en el concreto . . . . .</b>	<b>167</b>
Limpieza de las superficies de concreto . . . . .	130	Cambios de temperatura . . . . .	167
Acabado de superficies como se obtienen de la cimbra . . . . .	131	Temperaturas bajas . . . . .	168
Acabados superficiales especiales . . . . .	131	Temperaturas elevadas . . . . .	169

Cambios de humedad		Evaluación de los resultados de las	
(Contracción por secado) . . . . .	170	pruebas de compresión . . . . .	191
Efecto de los ingredientes del concreto		<b>Capítulo 15 Tipos especiales de concreto . . . . .</b>	<b>195</b>
en la contracción por secado . . . . .	171	Concreto ligero estructural . . . . .	195
Alabeo (Combadura) . . . . .	172	Agregados ligeros estructurales . . . . .	195
Deformación elástica e inelástica . . . . .	173	Resistencia a compresión . . . . .	196
Deformación unitaria por compresión . . . . .	173	Aire incluido . . . . .	197
Módulo de elasticidad . . . . .	173	Especificaciones . . . . .	197
Deflexión . . . . .	174	Mezclado . . . . .	197
Relación de Poisson . . . . .	174	Trabajabilidad y capacidad de acabado . . . . .	197
Deformación unitaria por cortante . . . . .	174	Revenimiento . . . . .	197
Deformación unitaria por torsión . . . . .	174	Vibrado . . . . .	197
Fluencia . . . . .	174	Colado, acabado y curado . . . . .	198
Cambios químicos y sus efectos . . . . .	175	Concretos ligeros de baja densidad y de	
Carbonatación . . . . .	176	resistencia moderada . . . . .	198
Ataque de sulfatos . . . . .	176	Proporciones de la mezcla . . . . .	198
Reacciones álcali-agregado . . . . .	176	Trabajabilidad . . . . .	199
<b>Capítulo 14 Pruebas para controlar la calidad</b>		Mezclado y colado . . . . .	199
<b>del concreto . . . . .</b>	<b>179</b>	Conductividad térmica . . . . .	200
Clases de prueba . . . . .	179	Resistencia . . . . .	200
Frecuencia de las pruebas . . . . .	179	Resistencia a la congelación y deshielo . . . . .	200
Prueba de los agregados . . . . .	180	Contracción por secado . . . . .	201
Muestreo de agregados . . . . .	180	Juntas de expansión . . . . .	201
Impurezas orgánicas . . . . .	180	Concreto de gran peso . . . . .	201
Material fino objetable . . . . .	180	Agregados de densidad elevada . . . . .	201
Granulometría . . . . .	180	Adiciones . . . . .	202
Contenido de humedad de los agregados . . . . .	181	Propiedades del concreto de	
Pruebas de concreto fresco . . . . .	181	gran peso . . . . .	202
Muestreo de concreto fresco . . . . .	181	Proporcionamiento, mezclado y colocación . . . . .	202
Consistencia . . . . .	181	Concreto de alta resistencia . . . . .	203
Medición de la temperatura . . . . .	182	Selección de los materiales . . . . .	203
Peso volumétrico y rendimiento . . . . .	183	Cemento . . . . .	203
Contenido de aire . . . . .	183	Puzolana . . . . .	203
Resistencia . . . . .	184	Agregados . . . . .	204
Pruebas de curado acelerado . . . . .	185	Aditivos . . . . .	205
Contenido de cloruros . . . . .	186	Proporcionamiento . . . . .	205
Contenido de agua y de cemento . . . . .	186	Colocación, consolidación y curado . . . . .	205
Contenido de aditivos minerales . . . . .	186	Control de calidad . . . . .	206
Sangrado del concreto . . . . .	186	Concreto de alta resistencia a edad temprana . . . . .	206
Prueba para el concreto endurecido . . . . .	186	Concreto masivo . . . . .	207
Pruebas de resistencia para el concreto		Concreto con el agregado precolocado . . . . .	209
endurecido . . . . .	186	Concreto de revenimiento nulo . . . . .	209
Contenido de aire . . . . .	187	Concreto compactado con rodillos . . . . .	210
Densidad, peso específico, absorción y vacíos . . . . .	187	Suelo-cemento . . . . .	210
Contenido de cemento . . . . .	188	Concreto lanzado . . . . .	211
Contenido de aditivos minerales y aditivos		Concreto compensador de contracción . . . . .	211
orgánicos . . . . .	188	Concreto poroso . . . . .	212
Contenido de cloruros . . . . .	188	Concreto blanco y de color . . . . .	212
Análisis petrográfico . . . . .	188	Concreto blanco . . . . .	212
Cambios de volumen y de longitud . . . . .	188	Concreto de color . . . . .	212
Carbonatación . . . . .	188	Método de agitado en seco . . . . .	213
Durabilidad . . . . .	189	Concreto con cemento portland	
Contenido de humedad . . . . .	189	polimerizado . . . . .	213
Permeabilidad . . . . .	189	Fero cemento . . . . .	213
Métodos de prueba no destructivos . . . . .	189	Concreto reforzado con fibras . . . . .	213
Método de esclerómetro . . . . .	189	<b>Apéndices . . . . .</b>	<b>217</b>
Método de penetración . . . . .	189	A.-Normas ASTM . . . . .	217
Pruebas de arranque (pullout) . . . . .	190	B.-Normas Oficiales Mexicanas . . . . .	220
Pruebas dinámicas o de vibración . . . . .	191	Factores de conversión métrica . . . . .	223
Otras pruebas . . . . .	191	<b>Índice . . . . .</b>	<b>225</b>

# PREFACIO

El concreto hecho con cemento portland es un material simple en apariencia con una naturaleza interna muy compleja, como lo ilustra este texto. En contraste con su complejidad interna, la versatilidad, durabilidad y economía del concreto lo han convertido en el material de construcción más usado en el mundo. Esto se puede ver en la variedad de estructuras en que se emplea, desde carreteras, puentes, edificios y presas hasta pisos, banquetas y aún obras de arte. El uso del concreto es ilimitado, y no se restringe a nuestro planeta, como lo muestra el interés reciente de la National Aeronautics and Space Administration en estructuras lunares de concreto.

El libro "Diseño y Control de Mezclas de Concreto" ha sido la referencia inicial de la industria del cemento y del concreto sobre tecnología del concreto por más de 60 años. Desde que se publicó la primera edición a principios de la década de los años veinte, ha sido actualizado diecisiete veces (13 ediciones de USA y 4 canadienses), para reflejar los avances en tecnología del concreto y satisfacer las crecientes necesidades de arquitectos, ingenieros, constructores, tecnólogos e instructores del concreto.

Esta décimotercera edición, totalmente revisada y aumentada, se escribió como referencia vasta y concisa sobre el concreto e incluir los amplios avances que han ocurrido en la tecnología del concreto desde que se publicó la última edición en 1979. El texto está respaldado por más de 70 años de investigaciones en la Portland Cement Association y en muchas otras organizaciones, y refleja los requisitos de las últimas ediciones de normas, especificaciones y métodos de ensayos de la American Society for Testing and Materials (ASTM) y del American Concrete Institute (ACI).

Aparte de presentar información reciente en abundancia, la 13a. edición es más amigable con el lector que las ediciones anteriores. Los índices se han aumentado para suministrar al lector un acceso más sencillo y rápido a la información deseada. Las referencias hacia otras partes del mismo libro son amplias, y las referencias con respecto a información relacionada se proporcionan al final de cada uno de los 15 capítulos. Se han preparado muchas tablas de referencia rápida y un nuevo apéndice incluye tablas de conversión al sistema métrico así como una extensa lista de normas ASTM relacionados con el concreto y el cemento.

El diseño del libro permanece sin cambios - quince capítulos que esencialmente son los mismos títulos que en la 12a. edición. Los temas actualizados, aumentados o recientemente incluidos en los capítulos 1-5 comprenden la permeabilidad y resistencia al desgaste del concreto; los cementos calientes, mezclados y

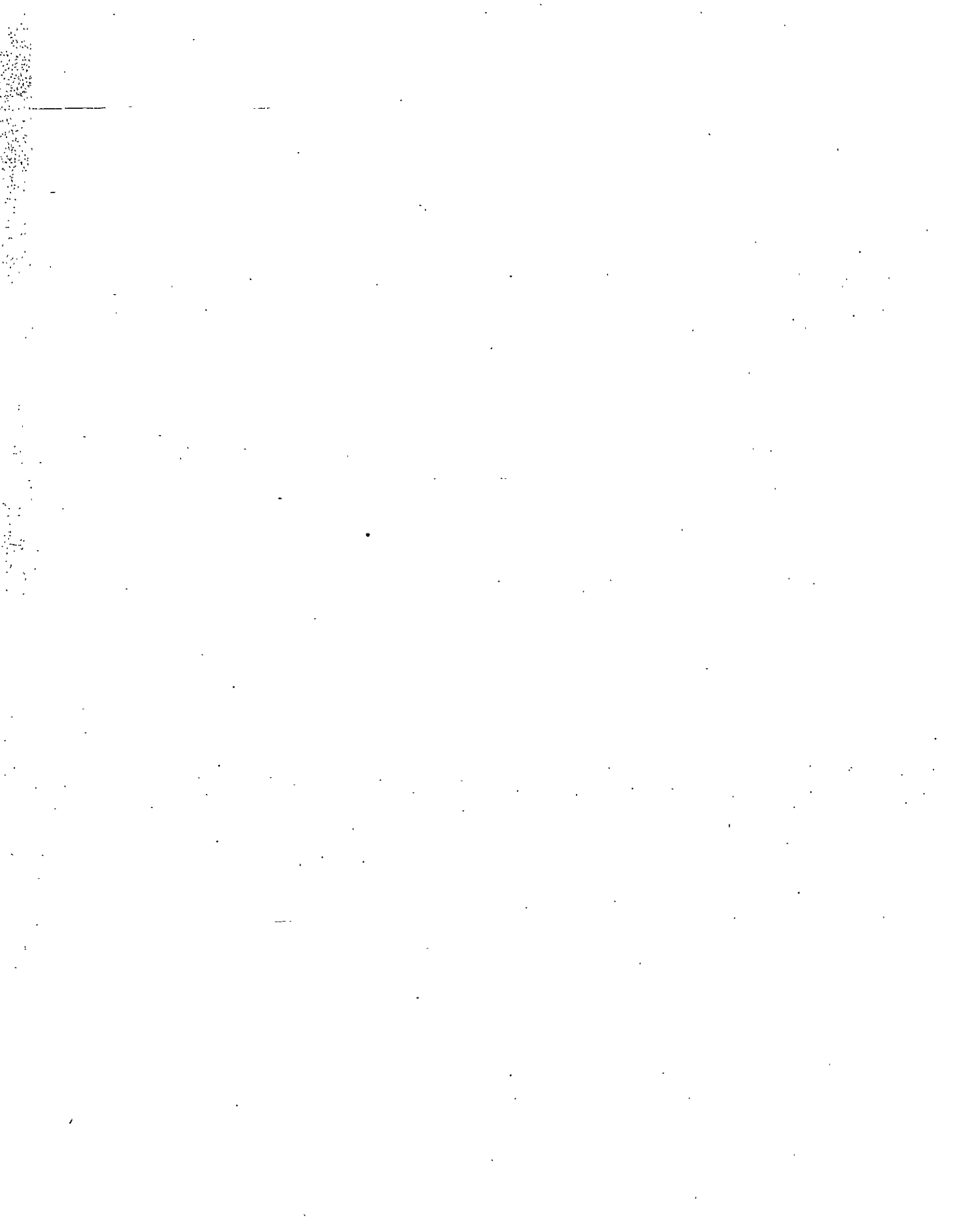
expansivos; la resistencia del cemento y la transformación de compuestos; el agregado de dragado marítimo, concreto reciclado, propiedades térmicas del agregado, reactividad álcali-agregado; y una amplia discusión sobre el efecto que tienen varias prácticas de colado sobre el contenido de aire.

Los capítulos 6-10 tienen nuevas secciones sobre escorias, cenizas volantes, humo de sílice, inhibidores de corrosión, superfluidizantes, excluidores de aire, procedimiento para el diseño de mezclas incluyendo un diagrama de flujo, bombas, bandas transportadoras, mezcladoras de alta energía, barreras de vapor, juntas, y el efecto de la temperatura en el tiempo de fraguado.

Los nuevos tópicos en los capítulos 11-15 incluyen a los retardantes de evaporación, módulo de elasticidad, relación de Poisson, deformación por cortante, cambios volumétricos químicos, carbonatación, efectos de altas y bajas temperaturas, cilindros de prueba colados en obra así como nuevos procedimientos de control de calidad y de ensayos de investigación. También se incluyen tipos especiales de concreto, como concreto ligero, pesado, de alta resistencia, compactado con rodillos, poroso, modificado con polímeros, y masivo. La mayor parte del material recientemente incluido o ampliado va acompañada de fotos explicativas, tablas o gráficas - 250 ilustraciones en total.

Los autores desean agradecer las contribuciones hechas por muchas personas y organizaciones quienes prestaron una invaluable asistencia en la escritura y publicación de esta 13a. edición aumentada. Se agradece especialmente a Paul Klieger, consultor de concreto y de materiales para concreto con más de 45 años de experiencia con los laboratorios de investigación y desarrollo de la PCA, quien revisó la precisión técnica del manuscrito; a Richard C. Spring, gerente de servicios de publicaciones de la PCA, quien coordinó las actividades editoriales, de diseño, producción e impresión; a Arden Orr por su labor editorial; a Richard C. Wagner de Wagner Design Services por su plan de diseño y producción; a Robert D. Kuhart y a Curtis F. Steer de Construction Technology Laboratories, Inc. (CTL), por el dibujo de las muchas figuras; a Cynthia Spigelman, bibliotecaria del CTL, por haber obtenido oportunamente tantos materiales de referencia; y por último, al American Concrete Institute y a la American Society for Testing and Materials, cuyos artículos y publicaciones son frecuentemente citados.

Los autores han intentado hacer esta edición de "Diseño y Control de Mezclas de Concreto" una referencia concisa y común sobre tecnología de concreto. Como siempre hay ocasión de mejorar, se invita a los lectores a presentar comentarios para mejorar las reimpressiones y ediciones futuras de este libro.





## CAPITULO 1

# Fundamentos Sobre el Concreto

El concreto es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento portland y agua, une a los agregados (arena y grava o piedra triturada) para formar una masa semejante a una roca pues la pasta endurece debido a la reacción química entre el cemento y el agua.\*

Los agregados generalmente se dividen en dos grupos: finos y gruesos. Los agregados finos consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que pueden llegar hasta 10 mm; los agregados gruesos son aquellos cuyas partículas se retienen en la malla No. 16 y pueden variar hasta 152 mm. El tamaño máximo de agregado que se emplea comúnmente es el de 19 mm o el de 25 mm.

La pasta está compuesta de cemento portland, agua y aire atrapado o aire incluido intencionalmente. Ordinariamente, la pasta constituye del 25 al 40 por ciento del volumen total del concreto. La Fig. 1-1 muestra que el volumen absoluto del cemento está comprendido usualmente entre el 7 y el 15 por ciento y el agua entre el 14 y el 21 por ciento. El contenido de aire en concretos con aire incluido puede llegar hasta el 8 por ciento del volumen del concreto, dependiendo del tamaño máximo del agregado grueso.

Como los agregados constituyen aproximadamente del 60 al 75 por ciento del volumen total del concreto, su selección es importante. Los agregados deben consistir en partículas con resistencia adecuada así como resistencia a condiciones de exposición a la intemperie y no deben contener materiales que pudieran causar deterioro del concreto. Para tener un uso eficiente de la pasta de cemento y agua, es deseable contar con una granulometría continua de tamaños de partículas. Durante todo el texto, se toma en consideración el empleo agregados adecuados, salvo donde se considere de otra manera.

La calidad del concreto depende en gran medida de la calidad de la pasta. En un concreto elaborado adecuadamente, cada partícula de agregado está completamente cubierta con pasta y también todos los espacios entre partículas de agregado, como se ilustra en la Fig. 1-2.

\* Este texto se enfoca al uso del cemento portland en la producción del concreto. El término "cemento portland" se refiere a un cemento hidráulico calcáreo producido por calentamiento de los óxidos de silicio, calcio, aluminio y hierro. El término "cemento", utilizado a lo largo del texto se refiere a cemento portland, a menos que se señale de otra manera.

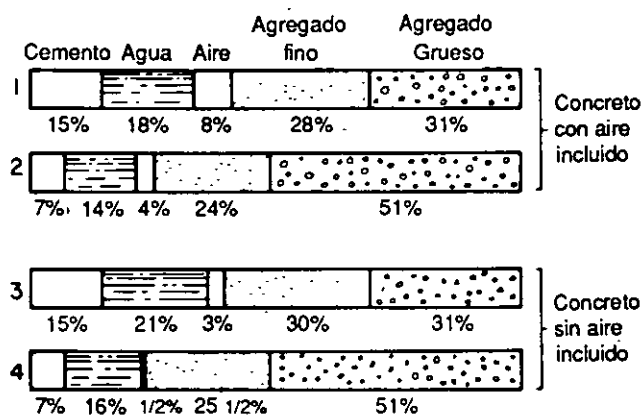


Figura 1-1. Variación de las proporciones en volumen absoluto de los materiales usados en el concreto. Las barras 1 y 3 representan mezclas ricas con agregados pequeños. Las barras 2 y 4 representan mezclas pobres con agregados grandes.

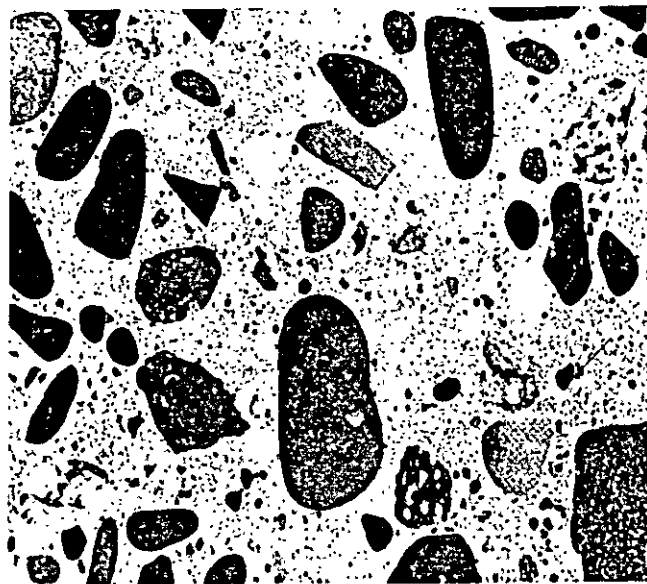


Figura 1-2. Sección transversal de concreto endurecido. La pasta de agua y cemento cubre completamente cada partícula de agregado y llena todos los espacios entre ellas.

Para cualquier conjunto específico de materiales y de condiciones de curado, la calidad del concreto endurecido está determinada por la cantidad de agua utilizada en relación con la cantidad de cemento. A continuación se presentan algunas ventajas que se obtienen al reducir el contenido de agua:

Se incrementa la resistencia a la compresión y a la flexión  
Se tiene menor permeabilidad, y por ende mayor hermeticidad y menor absorción.

Se incrementa la resistencia al intemperismo

Se logra una mejor unión entre capas sucesivas y entre el concreto y el refuerzo.

Se presenta menor cambio volumétrico causado por humedecimiento y secado

Se reducen las tendencias de agrietamientos por contracción.

Entre menos agua se utilice, se tendrá una mejor calidad del concreto - a condición que se pueda consolidar adecuadamente. Menores cantidades de agua de mezclado resultan en mezclas más rígidas; pero con vibración, aún las mezclas más rígidas pueden ser empleadas. Para una calidad dada de concreto, las mezclas más rígidas son las más económicas. Por lo tanto, la consolidación del concreto por vibración permite una mejora en la calidad del concreto y en la economía.

Las propiedades del concreto en estado fresco (plástico) y endurecido, se pueden modificar agregando aditivos al concreto, usualmente en forma líquida, durante su dosificación. Los aditivos se usan comúnmente para (1) ajustar el tiempo de fraguado o endurecimiento, (2) reducir la demanda de agua, (3) aumentar la trabajabilidad, (4) incluir intencionalmente aire, y (5) ajustar otras propiedades del concreto. Los aditivos se tratan en el Capítulo 6.

Después de un proporcionamiento adecuado, así como, dosificación, mezclado, colocación, consolidación, acabado, y curado, el concreto endurecido se transforma en un material de construcción resistente, no combustible, durable, resistencia al desgaste y prácticamente impermeable que requiere poco o nulo mantenimiento. El concreto también es un excelente material de construcción porque puede moldearse en una gran variedad de formas, colores y texturas para ser usado en un número ilimitado de aplicaciones.

## CONCRETO RECIEN MEZCLADO

El concreto recién mezclado debe ser plástico o semifluido y capaz de ser moldeado a mano. Una mezcla muy húmeda de concreto se puede moldear en el sentido de que puede colarse en una cimbra, pero esto no entra en la definición de "plástico" —aquel material que es plegable y capaz de ser moldeado o formado como un terrón de arcilla para modelar.

En una mezcla de concreto plástico todos los granos de arena y las piezas de grava o de piedra quedan encajonados y sostenidos en suspensión. Los ingredientes no están predispuestos a segregarse durante el transporte; y cuando el concreto endurece, se transforma en una mezcla homogénea de todos los componentes. El concreto de consistencia plástica no se desmorona, sino que fluye como líquido viscoso sin segregarse.

El revenimiento se utiliza como una medida de la consistencia del concreto. Un concreto de bajo revenimiento tiene una consistencia dura.

En la práctica de la construcción, los elementos delgados de concreto y los elementos de concreto fuertemente reforzado requieren de mezclas trabajables, pero jamás de mezclas similares a una sopa, para tener facilidad en su colocación. Se necesita una mezcla plástica para tener resistencia y para mantener su homogeneidad durante el manejo y la colocación. Mientras que una mezcla plástica es adecuada para la mayoría con trabajos con concreto, se pueden utilizar aditivos superfluidificantes para adicionar fluidez al concreto en miembros de concreto delgados o fuertemente reforzados.

## Mezclado

Los cinco componentes básicos del concreto se muestran separadamente en la figura 1-1. Para asegurarse que estén combinados en una mezcla homogénea se requiere de esfuerzo y cuidado. La secuencia de carga de los ingredientes en la mezcladora representa un papel importante en la uniformidad del producto terminado. Sin embargo, se puede variar esa secuencia y aún así producir concreto de calidad. Las diferentes secuencias requieren ajustes en el tiempo de adicionamiento de agua, en el número total de revoluciones del tambor de la mezcladora, y en la velocidad de revolución. Otros factores importantes en el mezclado son el tamaño de la revoltura en relación al tamaño del tambor de la mezcladora, el tiempo transcurrido entre la dosificación y el mezclado, el diseño, la configuración y el estado del tambor mezclador y las paletas. Las mezcladoras aprobadas, con operación y mantenimiento correctos, aseguran un intercambio de materiales de extremo a extremo por medio de una acción de rolado, plegado y amasado de la revoltura sobre sí misma a medida que se mezcla el concreto.

## Trabajabilidad

La facilidad de colocar, consolidar y acabar al concreto recién mezclado se denomina trabajabilidad. El concreto debe ser trabajable pero no se debe segregar ni sangrar excesivamente. El sangrado es la migración del agua hacia la superficie superior del concreto recién mezclado provocada por el asentamiento de los materiales sólidos - cemento, arena y piedra - dentro de la masa. El asentamiento es consecuencia del efecto combinado de la vibración y de la gravedad.

Un sangrado excesivo aumenta la relación agua-cemento cerca de la superficie superior, pudiendo dar como resultado una capa superior débil de baja durabilidad, particularmente si se llevan a cabo las operaciones de acabado mientras está presente el agua de sangrado. Debido a la tendencia del concreto recién mezclado a segregarse y sangrar, es importante transportar y colocar cada carga lo más cerca posible de su posición final. El aire incluido mejora la trabajabilidad y reduce la tendencia del concreto fresco de segregarse y sangrar.

## Consolidación

La vibración pone en movimiento a las partículas en el concreto recién mezclado, reduciendo la fricción entre ella y dándole a la mezcla las cualidades móviles de un fluido

denso. La acción vibratoria permite el uso de una mezcla más dura que contenga una mayor proporción de agregado grueso y una menor proporción de agregado fino. Empleando un agregado bien graduado, entre mayor sea el tamaño máximo del agregado en el concreto, habrá que llenar con pasta un menor volumen y existirá una menor área superficial de agregado por cubrir con pasta, teniendo como consecuencia que una cantidad menor de agua y de cemento es necesaria. Con una consolidación adecuada las mezclas más duras y ásperas pueden ser empleadas, lo que tiene como resultado una mayor calidad y economía.

Si una mezcla de concreto es lo suficientemente trabajable para ser consolidada de manera adecuada por varillado manual, puede que no exista ninguna ventaja en vibrarla. De hecho, tales mezclas se pueden segregar al vibrarlas. Solo al emplear mezclas más duras y ásperas se adquieren todos los beneficios del vibrado.

El vibrado mecánico tiene muchas ventajas. Los vibradores de alta frecuencia posibilitan la colocación económica de mezclas que son fáciles de consolidar a mano bajo ciertas condiciones. Como ejemplo, la figura 1-3, muestra concreto de consistencia dura (bajo revenimiento), que se vibró mecánicamente en cimbras que contenían el refuerzo con espaciamiento muy cerrado entre sí. Con el varillado manual hubiera sido necesaria una consistencia mucho más húmeda.



Figura 1-3. Concreto de consistencia rígida (bajo revenimiento).

## Hidratación, tiempo de fraguado, endurecimiento

La propiedad de liga de la pasta de cemento portland se debe a la reacción química entre el cemento y el agua llamada hidratación.

El cemento portland no es un compuesto químico simple, sino que es una mezcla de muchos compuestos. Cuatro de ellos conforman el 90 por ciento o más del peso del cemento portland y son: el silicato tricálcico, el silicato dicálcico, el aluminato tricálcico y el alúmino ferrito tetracálcico. Además de estos componentes principales, algunos otros desempeñan

papeles importantes en el proceso de hidratación. Los diversos tipos de cemento portland contienen los mismos cuatro compuestos principales, pero en proporciones diferentes (vea el Capítulo 2, "Cementos Portland").

Cuando el clinker (el producto del horno que se muele para fabricar el cemento portland) se examina al microscopio, la mayoría de los compuestos individuales del cemento se pueden identificar y se pueden determinar sus cantidades. Sin embargo, los granos más pequeños evaden la detección visual. El diámetro promedio de una partícula de cemento típica es de aproximadamente 10 micras, o una centésima de milímetro. Si todas las partículas de cemento fueran las promedio, el cemento portland contendría aproximadamente 298,000 millones de granos por kilogramo, pero de hecho existen unos 15 billones de partículas debido al amplio rango de tamaños de partícula. Las partículas en un kilogramo de cemento portland tienen una área superficial aproximada de 400 metros cuadrados.

Los dos silicatos de calcio, los cuales constituyen cerca del 75 % del peso del cemento portland, reaccionan con el agua para formar dos nuevos compuestos: el hidróxido de calcio y el hidrato de silicato de calcio. Este último es con mucho el componente cementante más importante en el concreto. Las propiedades ingenieriles del concreto, - fraguado y endurecimiento, resistencia y estabilidad dimensional - principalmente dependen del gel del hidrato de silicato de calcio. Es la médula del concreto.

La composición química del silicato de calcio hidratado es en cierto modo variable, pero contiene cal ( $\text{CaO}$ ) y sílice ( $\text{SiO}_2$ ), en una proporción sobre el orden de 3 a 2. El área superficial del hidrato de silicato de calcio es de unos 300 metros cuadrados por gramo. Las partículas son tan diminutas que solamente pueden ser vistas en un microscopio electrónico. En la pasta de cemento ya endurecida, estas partículas forman uniones enlazadas entre las otras fases cristalinas y los granos sobrantes de cemento sin hidratar; también se adhieren a los granos de arena y a piezas de agregado grueso, cementando todo en conjunto. La formación de esta estructura es la acción cementante de la pasta y es responsable del fraguado, del endurecimiento y del desarrollo de resistencia.

Cuando el concreto fragua, su volumen bruto permanece casi inalterado, pero el concreto endurecido contiene poros llenos de agua y aire, mismos que no tienen resistencia alguna. La resistencia está en la parte sólida de la pasta, en su mayoría en el hidrato de silicato de calcio y en las fases cristalinas.

Entre menos porosa sea la pasta de cemento, mucho más resistente es el concreto. Por lo tanto, cuando se mezcle el concreto no se debe usar una cantidad mayor de agua que la absolutamente necesaria para fabricar un concreto plástico y trabajable. Aún entonces, el agua empleada es usualmente mayor que la que se requiere para la completa hidratación del cemento. La relación mínima agua-cemento (en peso) para la hidratación total es de aproximadamente de 0.22 a 0.25.

El conocimiento de la cantidad de calor liberado a medida que el cemento se hidrata puede ser útil para planear la construcción. En invierno, el calor de hidratación ayudará a proteger el concreto contra el daño provocado por temperaturas de congelación. Sin embargo, el calor puede ser nocivo en estructuras masivas, tales como presas, porque puede producir esfuerzos indeseables al enfriarse luego de

endurecer. El cemento portland tipo I libera un poco más de la mitad de su calor total de hidratación en tres días. El cemento tipo III, de alta resistencia temprana, libera aproximadamente el mismo porcentaje de su calor en mucho menos de tres días. El cemento tipo II, un cemento de calor moderado, libera menos calor total que los otros y deben pasar más de tres días para que se libere únicamente la mitad de ese calor. El uso de cemento tipo IV, cemento portland de bajo calor de hidratación, se debe tomar en consideración donde sea de importancia fundamental contar con un bajo calor de hidratación.

Es importante conocer la velocidad de reacción entre el cemento y el agua porque la velocidad determina el tiempo de fraguado y de endurecimiento. La reacción inicial debe ser suficientemente lenta para que conceda tiempo al transporte y colocación del concreto. Sin embargo, una vez que el concreto ha sido colocado y terminado, es deseable tener un endurecimiento rápido. El yeso, que es adicionado en el molino de cemento durante la molienda del clínker, actúa como regulador de la velocidad inicial de hidratación del cemento portland. Otros factores que influyen en la velocidad de hidratación incluyen la finura de molienda, los aditivos, la cantidad de agua adicionada y la temperatura de los materiales en el momento del mezclado.

## CONCRETO ENDURECIDO

### Curado húmedo

El aumento de resistencia continuará con la edad mientras esté presente algo de cemento sin hidratar, a condición que el concreto permanezca húmedo o tenga una humedad relativa superior a aproximadamente el 80% y permanezca favorable la temperatura del concreto. Cuando la humedad relativa dentro del concreto cae aproximadamente al 80% o la temperatura del concreto desciende por debajo del punto de congelación, la hidratación y el aumento de resistencia virtualmente se detienen. La figura 1-4 ilustra la relación que existe entre el aumento de resistencia y el curado húmedo.

Si se vuelve a saturar el concreto luego de un período de secado, la hidratación se reanuda y la resistencia vuelve a aumentar. Sin embargo lo mejor es aplicar el curado húmedo al concreto de manera continua desde el momento en que se ha colocado hasta cuando haya alcanzado la calidad deseada debido a que el concreto es difícil de resaturar.

Los efectos de la temperatura del concreto durante el mezclado y el curado se discuten en los capítulos 10, 11 y 12: "Curado del concreto", "Colados en clima cálido" y "Colados en clima frío".

### Velocidad de secado del concreto

El concreto ni endurece ni se cura con el secado. El concreto (o de manera precisa, el cemento en él contenido) requiere de humedad para hidratarse y endurecer. El secado del concreto únicamente esta relacionado con la hidratación y el endurecimiento de manera indirecta. Al secarse el concreto, deja de ganar resistencia; el hecho que esté seco, no es indicación que haya experimentado la suficiente hidratación para lograr las propiedades físicas deseadas.

Resistencia a la compresión, referida en porcentaje respecto a la del concreto a 28 días con curado húmedo

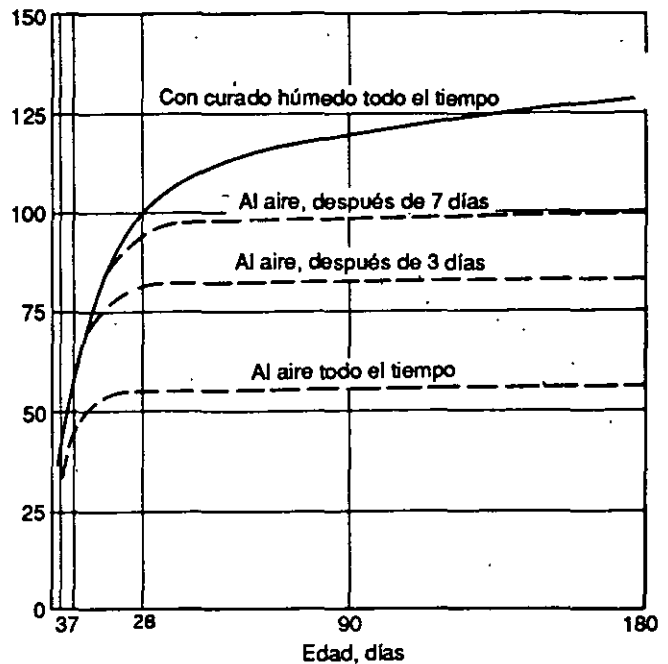


Figura 1-4. La resistencia del concreto se incrementa con la edad en tanto estén presentes una humedad y una temperatura favorable para la hidratación del cemento. Adaptación de la referencia 1-15, figura 9.

El conocimiento de la velocidad de secado es útil para comprender las propiedades o la condición física del concreto. Por ejemplo, tal como se mencionó, el concreto debe seguir reteniendo suficiente humedad durante todo el período de curado para que el cemento pueda hidratarse. El concreto recién colado tiene agua abundante, pero a medida que el secado progresa desde la superficie hacia el interior, el aumento de resistencia continuará a cada profundidad únicamente mientras la humedad relativa en ese punto se mantenga por encima del 80%.

La superficie de un piso de concreto que no ha tenido suficiente curado húmedo es una muestra común. Debido a que se seca rápidamente, el concreto de la superficie es débil y se produce descascaramiento en partículas finas provocado por el tránsito. Asimismo, el concreto se contrae al secarse, del mismo modo que lo hacen la madera, el papel y la arcilla (aunque no tanto). La contracción por secado es una causa fundamental de agrietamiento, y el ancho de las grietas es función del grado del secado.

En tanto que la superficie del concreto se seca rápidamente, al concreto en el interior le lleva mucho más tiempo secarse. La figura 1-5 ilustra las velocidades de secado natural y artificial para una losa o muro de concreto de 15 cm de espesor que se seca de ambos lados. Note que luego de 114 días de secado natural el concreto aún se encuentra muy húmedo en su interior y que se requiere de 850 días para que la humedad relativa en el centro descendiera al 50%. La figura es la que se derivó del ensaye, y no es típica para cualquier concreto.

El contenido de humedad en elementos delgados de concreto que han sido secados al aire con una humedad rela.

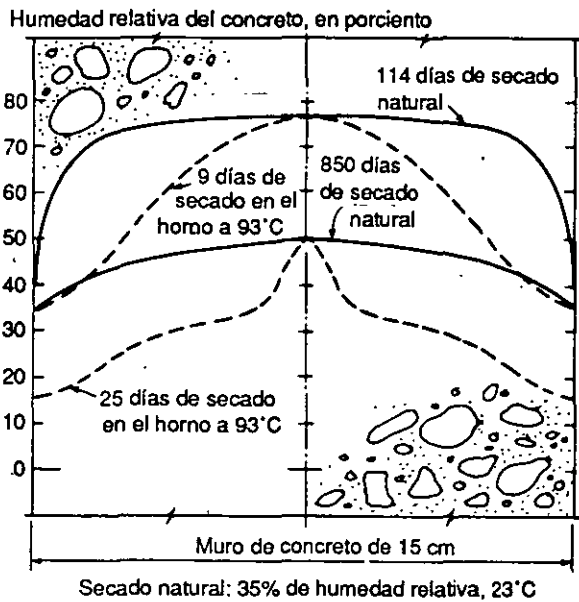


Figura 1-5. Distribuciones de humedad relativa resultantes de secados natural y artificial. La humedad de la línea central para la curva de 850 días está basada en datos de prueba mientras que el gradiente fue estimado. Referencia 1-9.

de 50% a 90% durante varios meses es de 1% a 2% en peso del concreto, dependiendo de los constituyentes del concreto, del contenido original de agua, de las condiciones de secado y del tamaño del elemento de concreto (para mayor información refiérase al capítulo 13).

El tamaño y la forma de un miembro de concreto mantienen una relación importante con la velocidad de secado. Los elementos de concreto de gran área superficial en relación a su volumen (tales como las losas de piso) se secan con mucho mayor rapidez que los grandes volúmenes de concreto con áreas superficiales relativamente pequeñas (tales como los estribos de puentes).

Muchas otras propiedades del concreto endurecido se ven también afectadas por su contenido de humedad; en ellas se incluye la elasticidad, flujo plástico, valor de aislamiento, resistencia al fuego, resistencia al desgaste, conductividad eléctrica, y durabilidad.

## Resistencia

La resistencia a la compresión se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto o de mortero a carga axial. Generalmente se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) a una edad de 28 días y se le designa con el símbolo  $f'_c$ . Para determinar la resistencia a la compresión, se realizan pruebas sobre especímenes de mortero o de concreto; en los Estados Unidos, a menos que se especifique de otra manera, los ensayos a compresión de mortero se realizan sobre cubos de 5 cm, en tanto que los ensayos a compresión del concreto se efectúan sobre cilindros que miden 15 cm de diámetro y 30 cm de altura (ver figura 1-6).

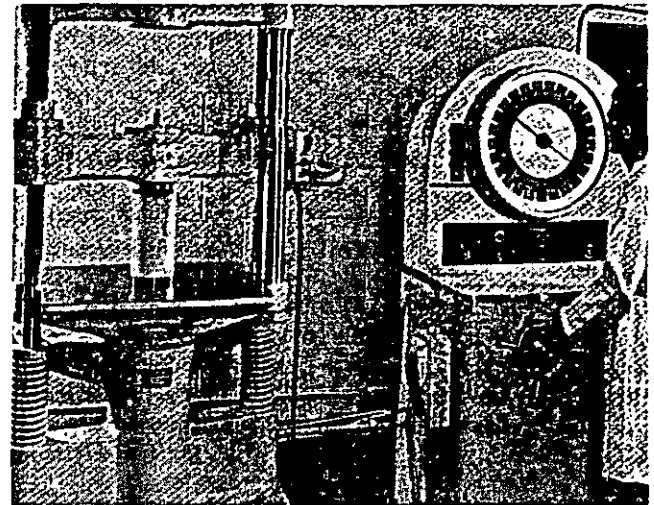


Figura 1-6. Ensayo de un cilindro de concreto de 15 x 30 cm a la compresión. La carga en el cilindro de prueba se registra en la carátula.

La resistencia del concreto a la compresión es una propiedad física fundamental, y es frecuentemente empleada en los cálculos para diseño de puentes, de edificios y otras estructuras. El concreto de uso más generalizado tiene una resistencia a la compresión entre 210 y 350  $\text{kg}/\text{cm}^2$ . Un concreto de alta resistencia tiene una resistencia a la compresión de cuando menos 420  $\text{kg}/\text{cm}^2$ . Resistencias de 1,400  $\text{kg}/\text{cm}^2$  se han llegado a utilizar en aplicaciones de construcción.

La resistencia a la flexión del concreto se utiliza generalmente al diseñar pavimentos y otras losas sobre el terreno. La resistencia a la compresión se puede utilizar como un índice de la resistencia a la flexión, una vez que entre ellas se ha establecido la relación empírica para los materiales y el tamaño del elemento en cuestión. La resistencia a la flexión, también llamada módulo de ruptura, para un concreto de peso normal se aproxima a menudo de 1.99 a 2.65 veces el valor de la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión.

El valor de la resistencia a la tensión del concreto es aproximadamente de 8% a 12% de su resistencia a compresión y a menudo se estima como 1.33\* a 1.99 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión.\*\*

La resistencia a la torsión para el concreto está relacionada con el módulo de ruptura y con las dimensiones del elemento de concreto.†

La resistencia al cortante del concreto puede variar desde el 35% al 80% de la resistencia a compresión. La correlación existente entre la resistencia a compresión y resistencia a flexión, tensión, torsión y cortante, varía de acuerdo a los

\* Referencia 1-11.

\*\* El comité ACI 207.2R estima la resistencia a la tensión en 1.78 veces la raíz cuadrada de  $f'_c$ .

† En la referencia 1-11 se presentan correlaciones de la resistencia a la torsión.

componentes del concreto y al medio ambiente en que se encuentre.

El módulo de elasticidad, denotado por medio del símbolo  $E$ , se puede definir como la relación del esfuerzo normal a la deformación correspondiente para esfuerzos de tensión o de compresión por debajo del límite de proporcionalidad de un material. Para concretos de peso normal,  $E$  fluctúa entre 140,600 y 422,000  $\text{kg/cm}^2$ , y se puede aproximar como 15,100 veces el valor de la raíz cuadrada de la resistencia a compresión.††

Los principales factores que afectan a la resistencia son la relación agua-cemento y la edad, o el grado al que haya progresado la hidratación. La figura 1-7 muestra valores de resistencias a compresión para una serie de relaciones agua-cemento a diferentes edades. Las pruebas se efectuaron sobre cilindros de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Note que las resistencias aumentan con la edad y aumentan a medida que disminuyen las relaciones agua-cemento. Estos factores también afectan a las resistencias a flexión y a tensión, así como a la adherencia del concreto con el acero.

Las relaciones edad-resistencia a compresión que aparecen en la figura 1-7 están dadas para concretos típicos con aire incluido y sin aire incluido. Cuando se requiera de valores más precisos para el concreto se deberán desarrollar curvas para los materiales específicos y para las proporciones de mezclado que se utilicen en el trabajo.

Para una trabajabilidad y una cantidad de cemento dadas, el concreto con aire incluido necesita menos agua de mezclado que el concreto sin aire incluido. La menor relación agua-cemento que es posible lograr en un concreto con aire incluido tiende a compensar las resistencias mínimas inferiores del concreto con aire incluido, particularmente en mezclas con contenidos de cemento pobres e intermedios.

### Peso unitario

El concreto convencional, empleado normalmente en pavimentos, edificios y en otras estructuras tiene un peso unitario dentro del rango de 2,240 a 2,400  $\text{kg}$  por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ). El peso unitario (densidad) del concreto varía, dependiendo de la cantidad y de la densidad relativa del agregado, de la cantidad del aire atrapado o intencionalmente incluido, y de los contenidos de agua y de cemento, mismos que a su vez se ven influenciados por el tamaño máximo del agregado. En la tabla 1-1 se dan valores del peso unitario del concreto fresco. Para el diseño de estructuras de concreto, comúnmente se supone que la combinación del concreto convencional y de las barras de refuerzo pesa  $2400 \text{ kg/m}^3$ .

El peso del concreto seco iguala al peso del concreto recién mezclado menos el peso del agua evaporable. Una parte del agua de mezclado se combina químicamente con el cemento durante el proceso de hidratación, transformando al cemento en gel de cemento. También un poco de agua permanece

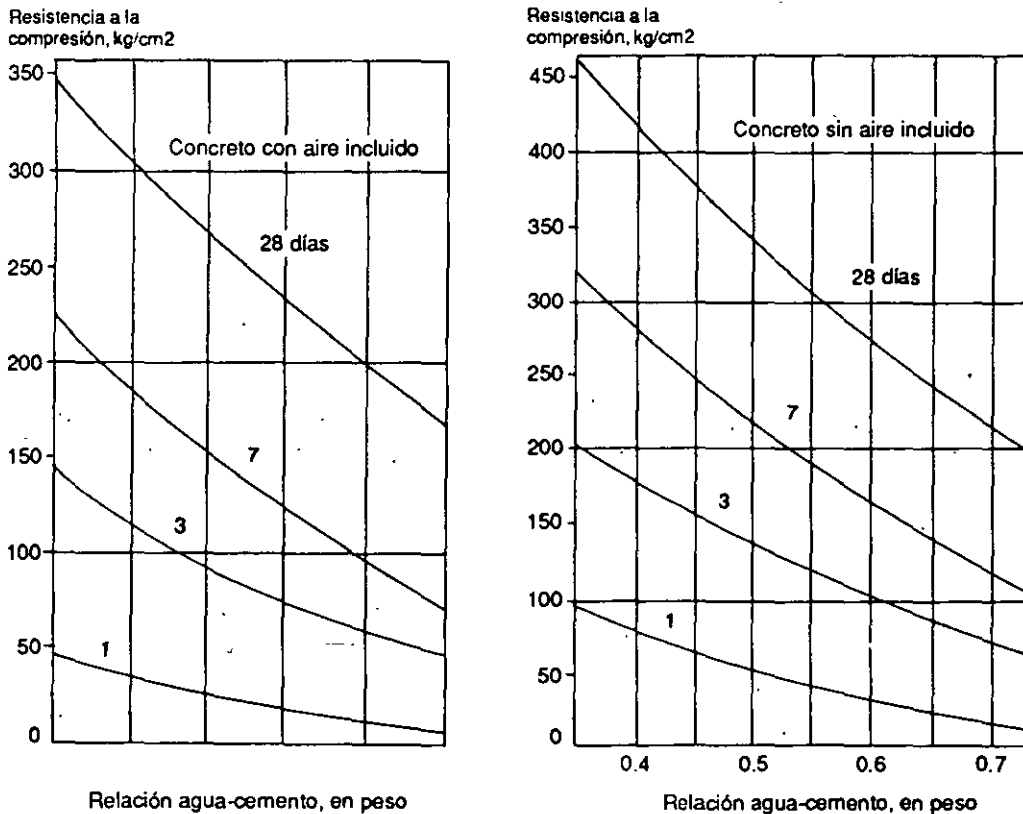


Figura 1-7. Relaciones edad-resistencia típicas del concreto basadas en ensayos a compresión de cilindros de 15 x 30 cm, empleando cemento portland tipo I y un curado húmedo a 21°C.

†† Vea la sección 8.5 del ACI 318.

**Tabla 1-1. Peso promedio observado en el concreto fresco\***

Tamaño máximo del agregado, mm	Contenido de aire, por ciento	Agua, kilogramos por metro cúbico	Cemento, kilogramos por metro cúbico	Peso unitario, kilogramos por metro cúbico**				
				Gravedad específica del agregado †				
				2.55	2.60	2.65	2.70	2.75
19	6.0	168	336	2195	2227	2259	2291	2323
38	4.5	145	291	2259	2291	2339	2371	2403
76	3.5	121	242	2307	2355	2387	2435	2467
152	3.0	97	167	2355	2387	2435	2467	2515

\* Fuente: Referencia 1-15, Tabla 4.

\*\* Concreto con aire incluido, con el contenido de aire indicado.

† En condición saturada y superficialmente seca.

retenida herméticamente en poros y capilares y no se evapora bajo condiciones normales. La cantidad de agua que se evaporará al aire a una humedad relativa del 50% es de aproximadamente 2% a 3% del peso del concreto, dependiendo del contenido inicial de agua del concreto, de las características de absorción de los agregados, y del tamaño de la estructura.

Además del concreto convencional, existe una amplia variedad de otros concretos para hacer frente a diversas necesidades, variando desde concretos aisladores ligeros con pesos unitarios de 240 kg/m<sup>3</sup>, a concretos pesados con pesos unitarios de 6400 kg/m<sup>3</sup>, que se emplean para contrapesos o para blindajes contra radiaciones (vea el capítulo 15, "Tipos Especiales de Concreto").

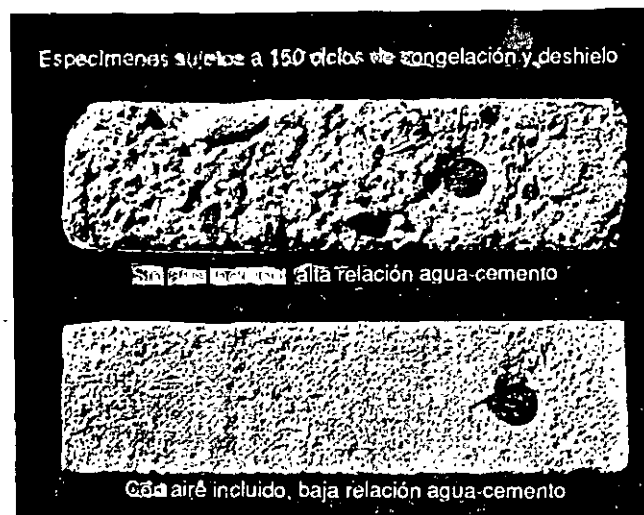
## Resistencia a congelación y deshielo

Del concreto utilizado en estructuras y pavimentos, se espera que tenga una vida larga y un mantenimiento bajo. Debe tener buena durabilidad para resistir condiciones de exposición anticipadas. El factor de intemperismo más destructivo es la congelación y el deshielo mientras el concreto se encuentra húmedo, particularmente cuando se cuenta con la presencia de agentes químicos descongelantes. El deterioro es provocado por el congelamiento del agua en la pasta, en las partículas del agregado o en ambos.

Con la inclusión de aire el concreto es sumamente resistente a este deterioro, como se puede apreciar en la figura 1-8. Durante el congelamiento, el agua desplazada por la formación del hielo en la pasta se acomoda de tal forma que no resulta perjudicial; las burbujas de aire en la pasta suministran cámaras donde se introduce el agua y así se alivia la presión hidráulica generada.

Cuando la congelación ocurre en un concreto que contenga agregado saturado, se pueden generar presiones hidráulicas nocivas dentro del agregado. El agua desplazada desde las partículas del agregado durante la formación del hielo no puede escapar lo suficientemente rápido hacia la pasta circundante para aliviar la presión. Sin embargo, bajo casi todas las condiciones de exposición, una pasta de buena calidad (de baja relación agua-cemento) evitará que la mayor parte de las partículas de agregado se saturen. También, si la pasta tiene aire incluido, acomodará las pequeñas cantidades de agua en exceso que pudieran ser expulsadas por los agregados, protegiendo así al concreto contra daños por congelación y deshielo.

La figura 1-9 ilustra, para una serie de relaciones agua-cemento, que: (1) el concreto con aire incluido es mucho más



**Figura 1-8. El concreto con aire incluido es altamente resistente a los ciclos repetidos de congelación y deshielo.**

resistente a los ciclos de congelación y deshielo que el concreto sin aire incluido, (2) el concreto con una relación agua-cemento baja es más durable que el concreto con una relación agua-cemento alta, y (3) un período de secado antes de la exposición a la congelación y deshielo beneficia sustancialmente la resistencia a congelación y deshielo del concreto con aire incluido, pero no beneficia de manera significativa al concreto sin aire incluido.\* El concreto con aire incluido con una relación agua-cemento baja y con un contenido de aire de 4% a 8% soportará un gran número de ciclos de congelación y deshielo sin presentar fallas.

La durabilidad a la congelación y deshielo se puede determinar por el procedimiento de ensaye de laboratorio ASTM C 666, "Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing". A partir de la prueba se calcula un factor de durabilidad que refleja el número de ciclos de congelación y deshielo requeridos para producir una cierta cantidad de deterioro. La resistencia al descascaramiento provocado por compuestos descongelantes se puede determinar por medio del procedimiento ASTM C 672 "Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals".

\* Vea las referencias 1-5 y 1-6.

Ciclos de congelación y deshielo para una pérdida en peso de 25%

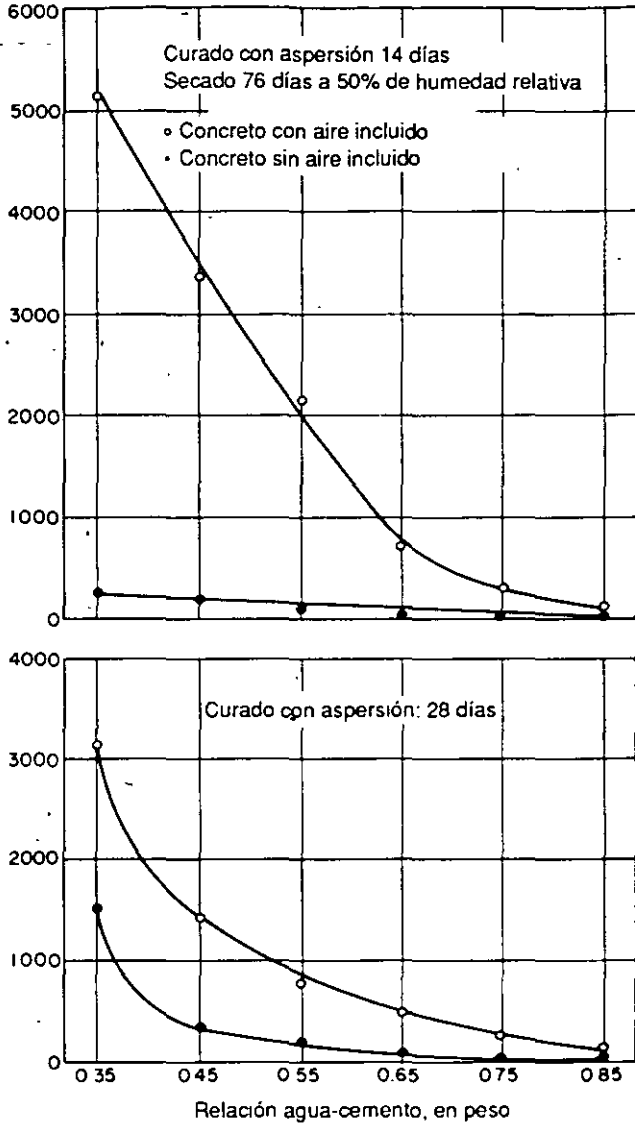


Figura 1-9. Relación entre la resistencia a congelación y deshielo, la relación agua-cemento, y el secado para concreto con y sin aire incluido hecho con cemento tipo I. La alta resistencia a congelación y deshielo se asocia con la inclusión de aire, con una baja relación agua-cemento, y con un período de curado anterior a la exposición a la congelación y deshielo. Referencia 1-5.

### Permeabilidad y hermeticidad

El concreto empleado en estructuras que retengan agua o que estén expuestas a mal tiempo o a otras condiciones de exposición severa debe ser virtualmente impermeable y hermético. La hermeticidad se refiere a menudo como la capacidad del concreto de refrenar o retener el agua sin escapes visibles. La permeabilidad se refiere a la cantidad de migración de agua a través del concreto cuando el agua se encuentra a presión, o a la capacidad del concreto de resistir la penetración de agua u otras sustancias (líquido, gas, iones, etc.). Generalmente las mismas propiedades que convierten al concreto menos permeable también lo vuelven más hermético.

La permeabilidad total del concreto al agua es una función de la permeabilidad de la pasta, de la permeabilidad y granulometría del agregado, y de la proporción relativa de la pasta con respecto al agregado. La disminución de permeabilidad mejora la resistencia del concreto a resaturación, al ataque de sulfatos y otros productos químicos y a la penetración del ión cloruro.

La permeabilidad también afecta la capacidad de destrucción por congelamiento en condiciones de saturación. Aquí la permeabilidad de la pasta es de particular importancia porque la pasta recubre a todos los constituyentes del concreto. La permeabilidad de la pasta depende de la relación agua-cemento y del grado de hidratación del cemento o duración del curado húmedo. Un concreto de baja permeabilidad requiere de una relación agua-cemento baja y un período de curado húmedo adecuado. La inclusión de aire ayuda a la hermeticidad aunque tiene un efecto mínimo sobre la permeabilidad. La permeabilidad aumenta con el secado.\*

La permeabilidad de una pasta endurecida madura mantuvo continuamente rangos de humedad de  $0.1 \times 10^{-12}$  a  $120 \times 10^{-12}$  cm por seg para relaciones agua-cemento que variaban de 0.3 a 0.7.\* La permeabilidad de rocas comúnmente utilizadas como agregado para concreto varía desde aproximadamente  $1.7 \times 10^{-9}$  hasta  $3.5 \times 10^{-13}$  cm por seg. La permeabilidad de un concreto maduro de buena calidad es de aproximadamente  $1 \times 10^{-10}$  cm por seg.

En la figura 1-10 se ilustra la relación que existe entre la permeabilidad, la relación agua-cemento, y el curado inicial para especímenes de concreto cilíndricos de 10 x 20 cm ensayados luego de 90 días de secado al aire y sujetos a una presión de agua de  $210 \text{ kg/cm}^2$ . El aparato de prueba se muestra en la figura 1-11. A pesar de que los valores de permeabilidad serían distintos para otros líquidos y gases, la relación que existe entre la rela

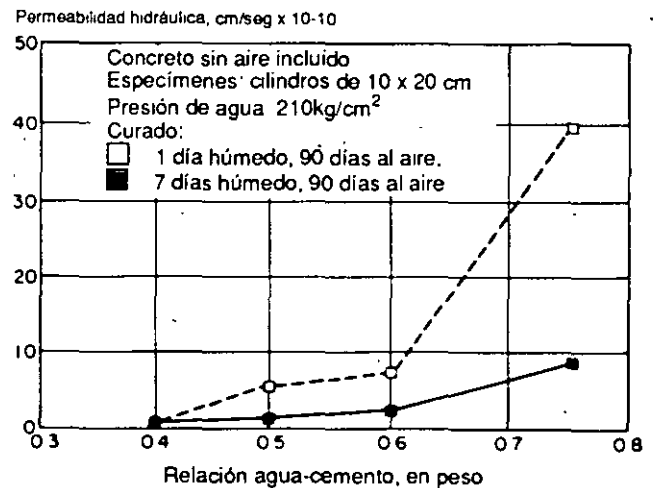


Figura 1-10. Relación entre permeabilidad hidráulica (agua), relación agua-cemento y curado inicial de los especímenes de concreto. Referencia PCA HM 1170.

\* Referencia 1-4



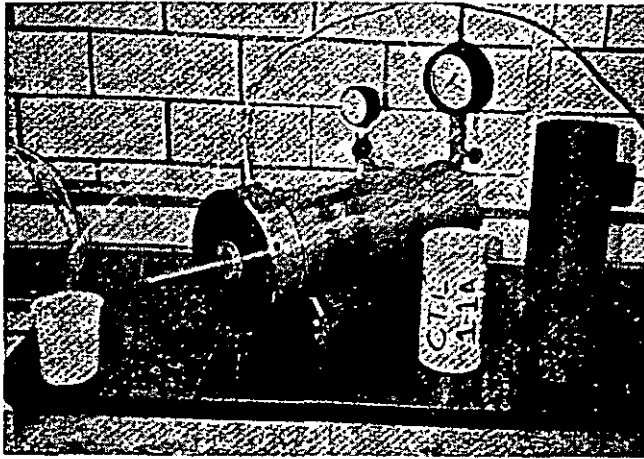


Figura 1-11. Aparato de prueba de permeabilidad hidráulica empleado para obtener los datos ilustrados en la figura 1-10.

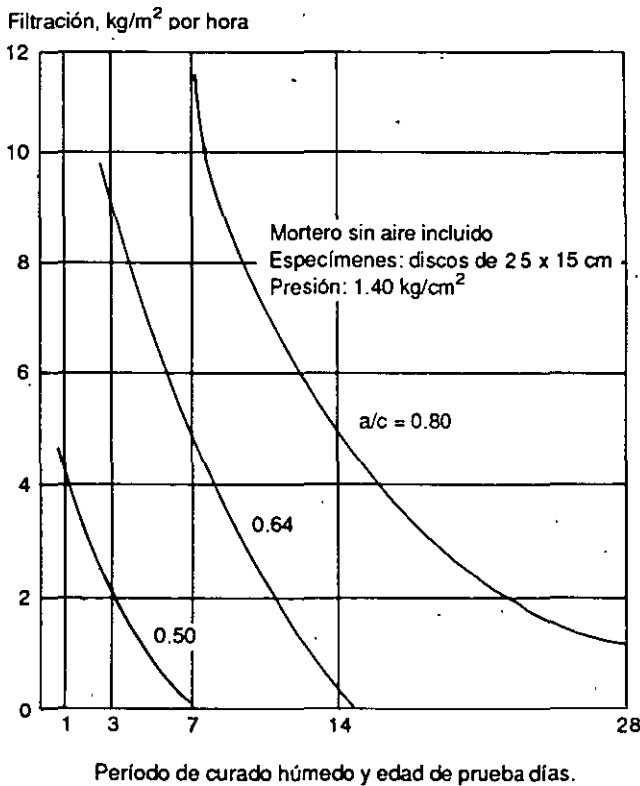


Figura 1-12. Efecto de la relación agua-cemento (a/c) y de la duración del curado sobre la permeabilidad del concreto. Note que la filtración se reduce a medida que la relación agua-cemento descende y se aumenta el período de curado. Referencia 1-1 y manual PCA Manual Series 227.

agua-cemento, el período de curado, y la permeabilidad se mantendría similar.

Los resultados de ensayos obtenidos al sujetar discos de mortero sin aire incluido de 2.5 cm de espesor a una presión

de agua de  $1.4 \text{ kg/cm}^2$  están dados en la figura 1-12. En estos ensayos, no existieron fugas de agua a través de los discos de mortero que tenían relaciones agua-cemento en peso iguales a 0.50 ó menores y que hubieran tenido un curado húmedo de siete días. Cuando ocurrieron fugas, estas fueron mayores en los discos de mortero hechos con altas relaciones agua-cemento. También, para cada relación agua-cemento, las fugas fueron menores a medida que se aumentaba el período de curado húmedo. En los discos con una relación agua-cemento de 0.80, el mortero permitía fugas a pesar de haber sido curado durante un mes. Estos resultados ilustran claramente que una relación agua-cemento baja y un período de curado reducen la permeabilidad de manera significativa.

Las relaciones agua-cemento bajas también reducen la segregación y el sangrado, contribuyendo adicionalmente a la hermeticidad. Para ser hermético, el concreto también debe estar libre de agrietamientos y de celdillas.

Ocasionalmente el concreto poroso - concreto sin finos que permite fácilmente el flujo de agua a través de sí mismo - se diseña para aplicaciones especiales. En estos concretos, el agregado fino se reduce grandemente o incluso se remueve totalmente produciendo un gran volumen de huecos de aire. El concreto poroso ha sido utilizado en canchas de tenis, pavimentos, lotes para estacionamientos, invernaderos y estructuras de drenaje. El concreto excluido de finos también se ha empleado en edificios debido a sus propiedades de aislamiento térmico. En el capítulo 15, "Tipos Especiales de Concreto", se presenta información adicional sobre concreto poroso.

## Resistencia al desgaste

Los pisos, pavimentos y estructuras hidráulicas están sujetos al desgaste; por tanto, en estas aplicaciones el concreto debe tener una resistencia elevada a la abrasión. Los resultados de pruebas indican que la resistencia a la abrasión o desgaste está estrechamente relacionada con la resistencia a compresión del concreto. Un concreto de alta resistencia a compresión tiene mayor resistencia a la abrasión que un concreto de resistencia a compresión baja. Como la resistencia a la compresión depende de la relación agua-cemento y del curado, una relación agua-cemento baja, así como un curado adecuado son necesarios para obtener una buena resistencia al desgaste. El tipo de agregado y el acabado de la superficie o el tratamiento utilizado también tienen fuerte influencia en la resistencia al desgaste. Un agregado duro es más resistente a la abrasión que un agregado blando o esponjoso, y una superficie que ha sido tratada con llana de metal resiste más el desgaste que una que no lo ha sido.

La figura 1-13 muestra los resultados de pruebas de abrasión hechas en concretos con distintas resistencias a compresión y tipos de agregado. La figura 1-14 ilustra el efecto que el allanado de acero y los tratamientos de superficie tienen sobre la resistencia al desgaste. Se pueden conducir ensayos de resistencia a la abrasión rotando balines de acero, ruedas de afilar o discos a presión sobre la superficie (ASTM 779). En la figura 1-15 se muestra un tipo de aparato para prueba. Se dispone también de otros tipos de ensayos de resistencia a la abrasión (ASTM C 418 y C944).

Pérdida por abrasión-erosión,  
por ciento en peso

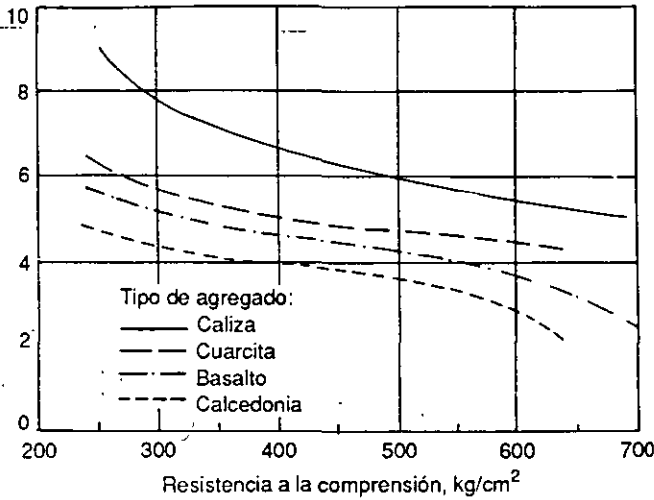


Figura 1-13. Efecto de la resistencia a compresión y del tipo de agregado sobre la resistencia al desgaste del concreto. El concreto de elevada resistencia fabricado con un agregado duro es altamente resistente al desgaste. Referencia 1-16.

Tiempo, minutos

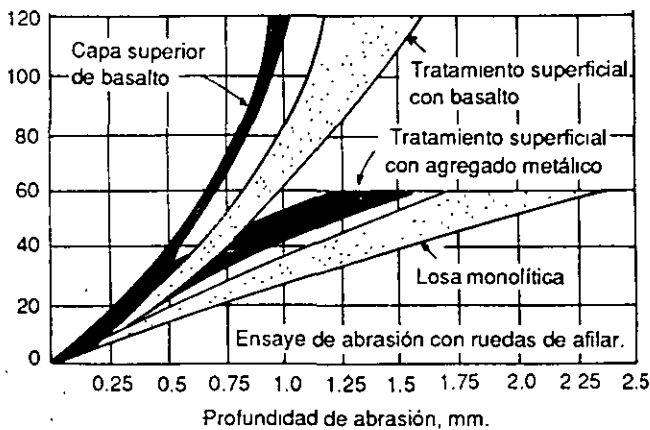


Figura 1-14. Efecto del acabado con llama de acero y de los tratamientos superficiales sobre la resistencia al desgaste del concreto. La resistencia a compresión de la losa base fue de 420 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días. Todas las losas fueron acabadas con llana de acero. Referencia 1-12.

## Estabilidad volumétrica

El concreto endurecido presenta ligeros cambios de volumen debido a variaciones en la temperatura, en la humedad y en los esfuerzos aplicados. Estos cambios de volumen o de longitud pueden variar de aproximadamente 0.01% hasta 0.08%. En el concreto endurecido los cambios de volumen por temperatura son casi los mismos que para el acero.

El concreto que se mantiene continuamente húmedo se dilatará ligeramente. Cuando se permite que seque, el concreto se contrae. El principal factor que influye en la magnitud de la contracción por secado es el contenido de agua del concreto recién mezclado. La contracción por secado aumenta directamente con los incrementos de este contenido de agua. La magnitud de la contracción también depende de otros factores, como las cantidades de agregado empleado,

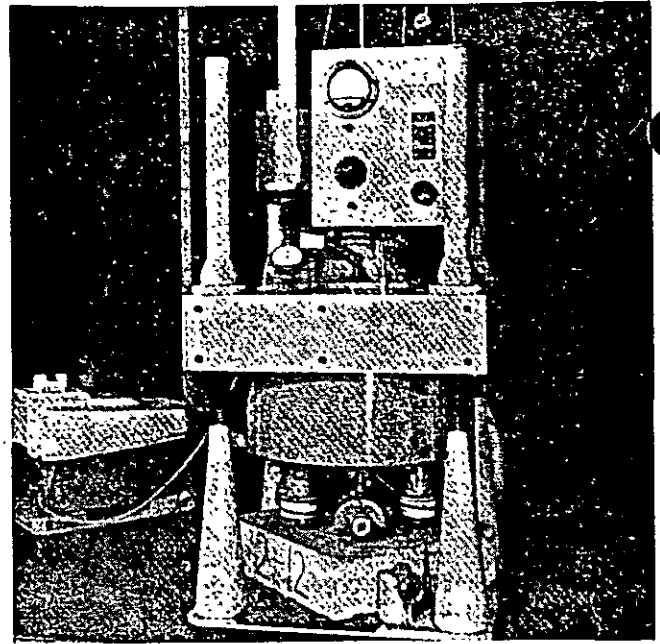


Figura 1-15. Aparato de prueba para medir la resistencia al desgaste del concreto. Se puede ajustar la máquina para emplear discos giratorios o ruedas de afilar. Con una máquina diferente se ruedan ballenas a presión sobre la superficie del espécimen. Las pruebas se describen en la norma ASTM 779, "Método estándar de prueba para la resistencia al desgaste de superficies horizontales de concreto".

las propiedades del agregado, tamaño y forma de la masa de concreto, temperatura y humedad relativa del medio ambiente, método de curado, grado de hidratación, y tiempo. El contenido de cemento tiene un efecto mínimo a nulo sobre la contracción por secado para contenidos de cemento entre 280 y 450 kg por metro cúbico.

Cuando el concreto se somete a esfuerzos, se deforma elásticamente. Los esfuerzos sostenidos resultan en una deformación adicional llamada fluencia. La velocidad de la fluencia (deformación por unidad de tiempo) disminuye con el tiempo.

La magnitud de los cambios de volumen y de los factores que en ellos influyen se estudian en el Capítulo 13, "Cambios volumétricos del concreto".

## Control de agrietamientos

Las dos causas básicas por las que se producen grietas en el concreto son (1) esfuerzos debidos a cargas aplicadas y (2) esfuerzos debidos a contracción por secado o a cambios de temperatura en condiciones de restricción.

La contracción por secado es una propiedad inherente e inevitable del concreto, por lo que se utiliza acero de refuerzo colocado en una posición adecuada para reducir los anchos de grieta, o bien juntas que predeterminen y controlen la ubicación de las grietas (Fig. 1-16). Los esfuerzos provocados por las fluctuaciones de temperatura pueden causar agrietamientos, especialmente a edades tempranas.

Las grietas por contracción del concreto ocurren debido a restricciones. Si no existe una causa que impida el movimiento del concreto y ocurren contracciones, el concreto no se

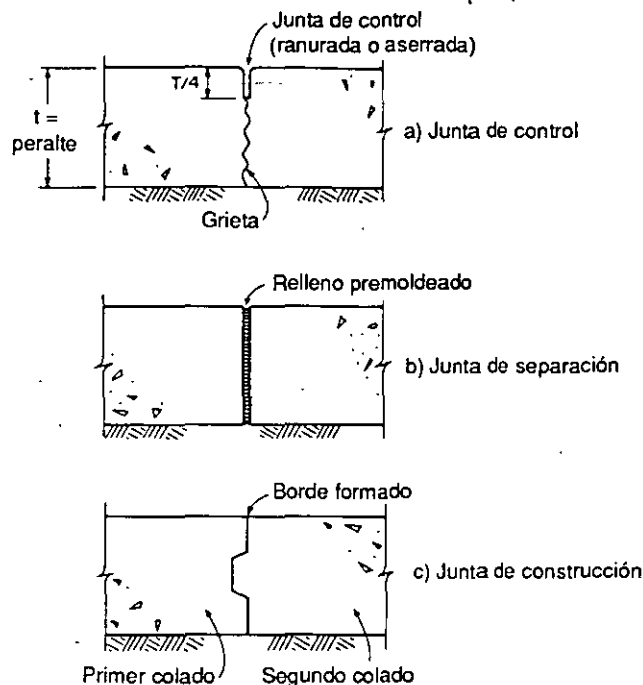


Figura 1-16. Los tres tipos básicos de juntas empleadas en la construcción de losas de concreto para pavimentos.

agrieta. Las restricciones pueden ser provocadas por causas diversas. La contracción por secado siempre es mayor cerca de la superficie del concreto; las porciones húmedas interiores restringen al concreto en las cercanías de la superficie, con lo que se pueden producir agrietamientos. Otras causas de restricción son el acero de refuerzo embebido en el concreto, las partes de una estructura interconectadas entre sí, y la fricción de la subrasante sobre la cual va colocado el concreto.

Las juntas son el método más efectivo para controlar agrietamientos. Si una extensión considerable de concreto (una pared, losa o pavimento) no contiene juntas convenientemente espaciadas que alivien la contracción por secado y por temperatura, el concreto se agrietará de manera aleatoria.\*

Las juntas de control se ranuran, se forman o se aserran en banquetas, calzadas, pavimentos, pisos y muros de modo que las grietas ocurran en esas juntas y no aleatoriamente. Las juntas de control permiten movimientos en el plano de una losa o de un muro. Se desarrollan aproximadamente a un cuarto del espesor del concreto.

\* Para mayor información refiérase al capítulo 9.

Las juntas de separación aíslan a una losa de otros elementos de una estructura y le permiten tanto movimientos horizontales como verticales. Se colocan en las uniones de pisos con muros, columnas, bases y otros puntos donde pudieran ocurrir restricciones. Se desarrollan en todo el espesor de la losa e incluyen un relleno premoldeado para la junta.

Las juntas de construcción se colocan en los lugares donde ha concluido la jornada de trabajo; separan áreas de concreto

colocado en distintos momentos. En las losas para pavimentos, las juntas de construcción comúnmente se alinean con las juntas de control o de separación, y funcionan también como éstas últimas.

## REFERENCIAS

- 1.1. McMillan, F.R., and Lyse, Inge. "Some Permeability Studies of Concrete," *Journal of the American Concrete Institute, Proceedings*, vol. 26. December 1929, pages 101-142.
- 1.2. Powers, T.C., *The Bleeding of Portland Cement Paste, Mortar, and Concrete Treated As a Special Case of Sedimentation*, Research Department Bulletin RX002, Portland Cement Association, 1939.
- 1.3. Powers, T.C., and Brownyard, T.L., *Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste*, Research Department Bulletin RX022, Portland Cement Association, 1947.
- 1.4. Powers, T.C.; Copeland, L.E.; Hayes, J.C.; and Mann, H. M., *Permeability of Portland Cement Pastes*, Research Department Bulletin RX053, Portland Cement Association, 1954.
- 1.5. Backstrom, J.E.; Burrow, R.W.; and Witte, L.P., *Investigation into the Effect of Water-Cement Ratio on the Freezing-Thawing Resistance of Non-Air- and Air-Entrained Concrete*. Concrete Laboratory Report No. C-810, Engineering Laboratories Division, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, November 1955.
- 1.6. Woods, Hubert, *Observations on the Resistance of Concrete to Freezing and Thawing*, Research Department Bulletin RX067, Portland Cement Association, 1956.
- 1.7. Brunauer, Stephen, and Copeland, L.E., "The Chemistry of Concrete," *Scientific American*, New York, April 1964.
- 1.8. Powers, T.C., *Topics in Concrete Technology* Research Department Bulletin RX174, Portland Cement Association, 1964.
- 1.9. Abrams, M.S., and Orals, D.L., *Concrete Drying Methods and Their Effect on Fire Resistance*, Research Department Bulletin RX181, Portland Cement Association, 1965.
- 1.10. Powers, T.C., *The Nature of Concrete*, Research Department Bulletin RX196, Portland Cement Association, 1966.
- 1.11. Hsu, Thomas T.C., *Torsion of Structural Concrete—Plain Concrete Rectangular Section*, Development Department Bulletin DX134, Portland Cement Association, 1968.
- 1.12. Brinkerhoff, C.H., "Report to ASTM C-9 Subcommittee III-M (Testing Concrete for Abrasion) Cooperative Abrasion Test Program," University of California and Portland Cement Association, 1970.
- 1.13. McMillan, F.R., and Tuthill, Lewis H., *Concrete Primer*, SP-1, 3rd ed., American Concrete Institute, 1973.

- 1-14. Kirk, Raymond E., and Othmer, Donald F., eds., "Cement," *Encyclopedia of Chemical Technology*, 3rd ed., vol. 5 John Wiley and Sons, Inc., New York, 1979, pages 163-193.
- 1-15. *Concrete Manual*, 8th ed., U.S. Bureau of Reclamation, Denver, revised 1981.
- 1-16. Liu, Tony C., "Abrasion Resistance of Concrete," *Journal of the American Concrete Institute*, September-October 1981, pages 341-350.
- 1-17. *ACI Manual of Concrete Practice*, American Concrete Institute, 1987.

## CAPITULO 2

# Cementos portland

Los cementos portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente de silicatos de calcio hidráulicos. Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua. Durante esta reacción, llamada hidratación, el cemento se combina con agua para formar una pasta de aspecto similar a una roca. Cuando la pasta (cemento y agua) se agrega a los agregados (arena y grava, piedra triturada u otro material granular) actúa como adhesivo y une a todas las partículas de agregado para formar así al concreto, el material de construcción más versátil y de mayor uso en el mundo.

La hidratación comienza tan pronto como el cemento entra en contacto con el agua. Cada partícula de cemento forma un aumento sobre su superficie mismo que gradualmente se extiende hasta enlazarse con el aumento de otras partículas de cemento o hasta que se adhiere a las sustancias adyacentes. Esta reconstitución tiene como resultado la progresiva rigidización, endurecimiento y desarrollo de resistencia. La rigidización del concreto se puede reconocer por una pérdida de trabajabilidad que normalmente ocurre dentro de las tres primeras horas luego del mezclado, pero depende de la composición y finura del cemento, de las proporciones de la mezcla y de las condiciones de temperatura. Posteriormente el concreto fragua y comienza a endurecer.

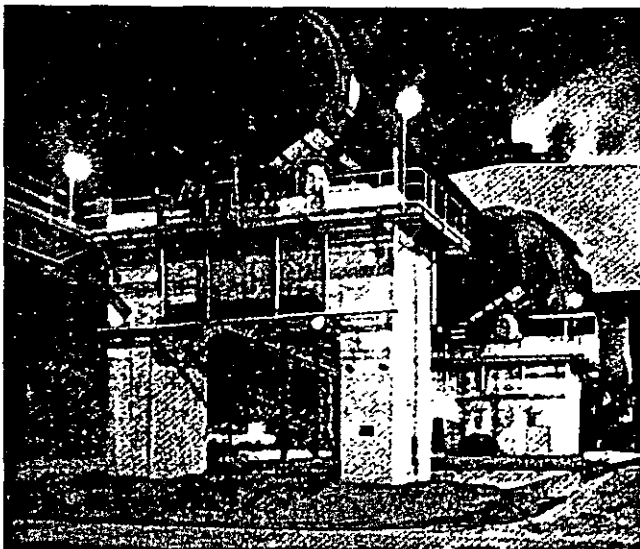


Figura 2-1. Horno rotatorio de una fábrica moderna para la manufactura del cemento portland.

La hidratación prosigue mientras se disponga de espacio para los productos de la hidratación y se tengan condiciones favorables de humedad y temperatura (curado). A medida que la hidratación continúa, el concreto se vuelve más duro y más resistente. La mayor parte de la hidratación y del desarrollo de la resistencia tiene lugar durante el primer mes del ciclo de vida del concreto, pero continúa, aunque más lentamente, durante un largo período; se ha registrado en investigaciones de laboratorio incrementos de resistencia durante un período de 50 años.

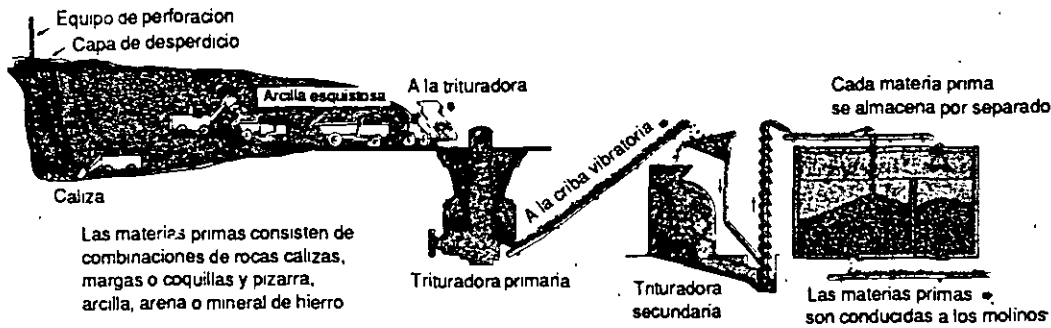
La invención del cemento portland se atribuye generalmente a Joseph Aspdin, un albañil inglés. En 1824 obtuvo una patente por su producto, al cual denominó cemento portland debido a que producía un concreto que en color semejaba a una caliza natural que se explotaba en el islote de Portland, península en el Canal de la Mancha. El nombre ha permanecido y se emplea en todo el mundo, con muchos fabricantes que le agregan su propio nombre de marca. A pesar que Aspdin fue el primero en prescribir una fórmula para cemento portland y el primero en patentar su producto, los cementos calcáreos ya habían sido empleados desde hace muchos siglos. A mediados del siglo pasado se manufacturaban cementos naturales en Rosendale, Nueva York. El primer embarque de cemento portland a los Estados Unidos del que se tenga registro fue hecho en 1868 y el primer cemento portland fabricado en los Estados Unidos se produjo en una planta en Copley, Pensilvania, en 1871.

## FABRICACION DEL CEMENTO PORTLAND

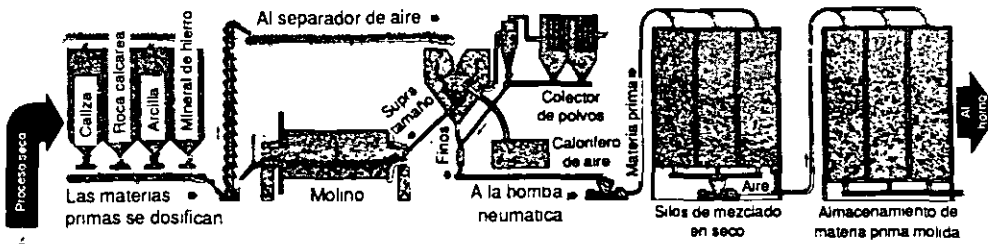
El cemento portland se produce al pulverizar el clínker, que consiste principalmente en silicatos hidráulicos de calcio junto con algunos aluminatos de calcio y aluminoferritos de calcio y normalmente contiene una o más formas de sulfato de calcio (yeso), como adición en la molienda.

Los materiales usados para fabricar cemento portland deben contener proporciones adecuadas de óxido de calcio, sílice, alúmina y componentes de óxido de hierro. Durante su manufactura, se analizan frecuentemente todos los materiales para asegurar un cemento de alta calidad uniforme.

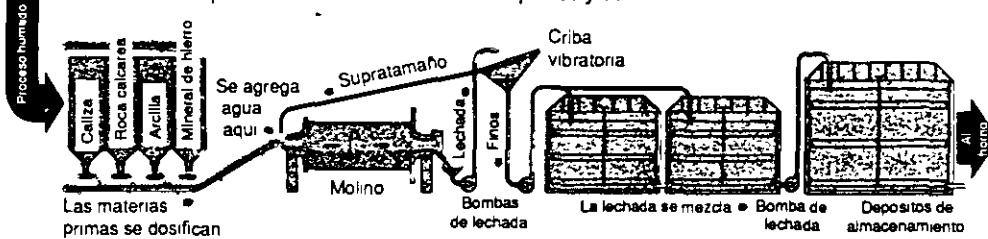
Los pasos a seguir en la manufactura del cemento se ilustran en los diagramas de las figuras 2-2 y 2-3. Mientras que el funcionamiento de todas las plantas de cemento es



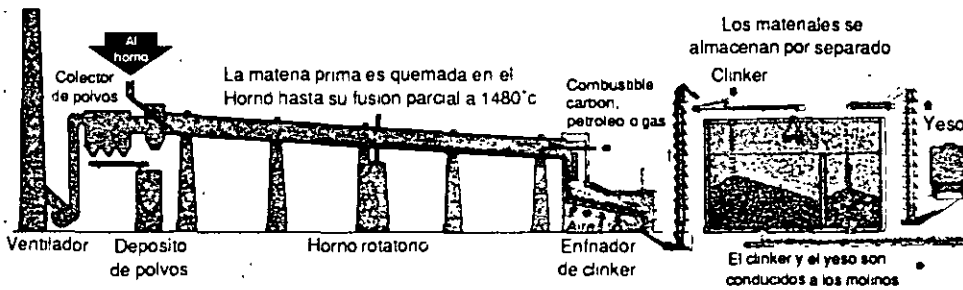
1 La roca se tritura primero hasta obtener un tamaño de 127 mm, luego hasta 19 mm y se almacena.



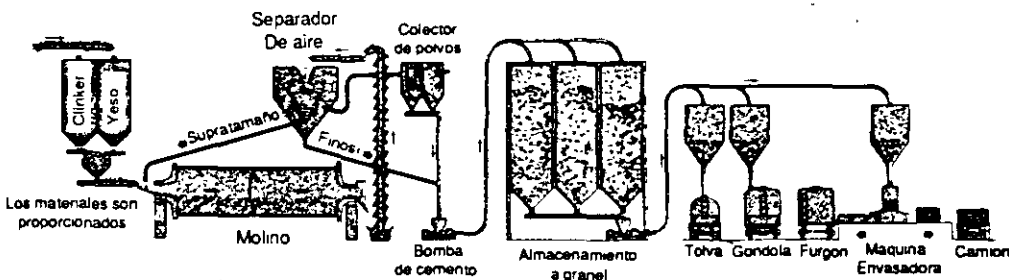
2 Las materias primas se muelen hasta obtener polvos y se mezclan.



2. Las materias primas se muelen, se mezclan con agua para formar una lechada y se combinan.

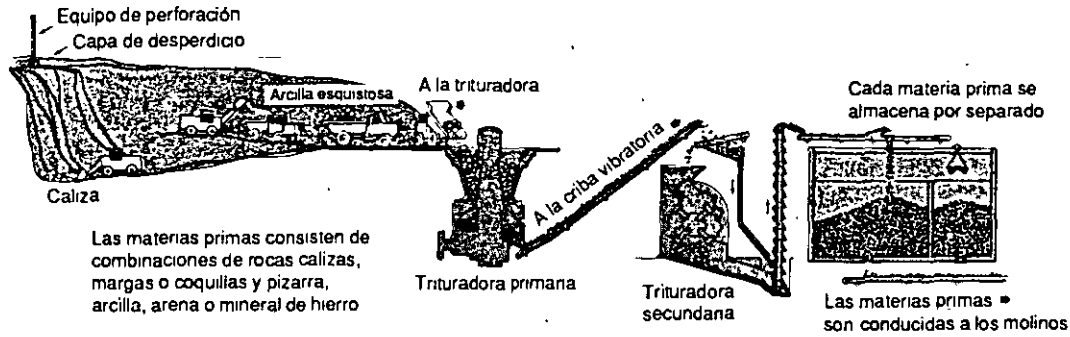


3. La calcinación transforma químicamente a la materia prima en clinker de cemento.

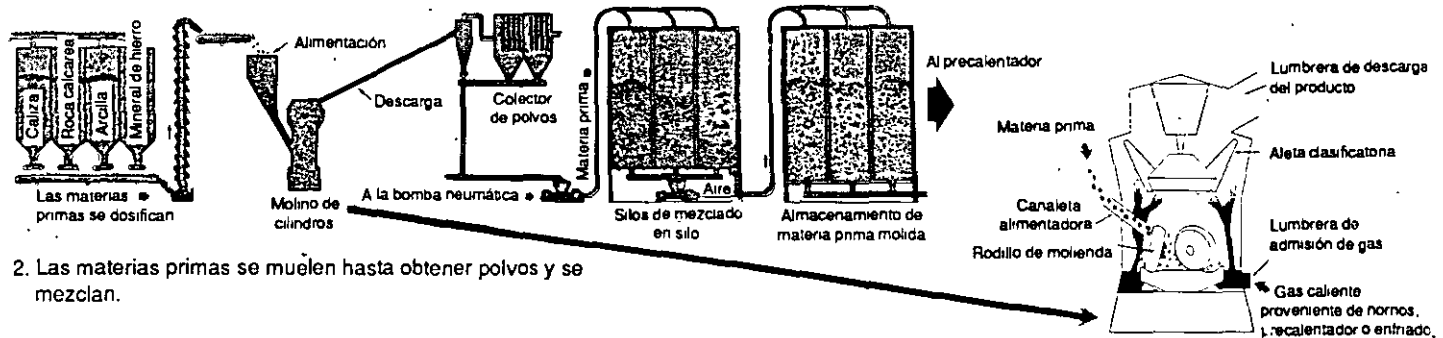


4. El clinker se muele junto con el yeso para convertirlo en cemento portland y se embarca.

Figura 2-2. Etapas en la fabricación del cemento portland.

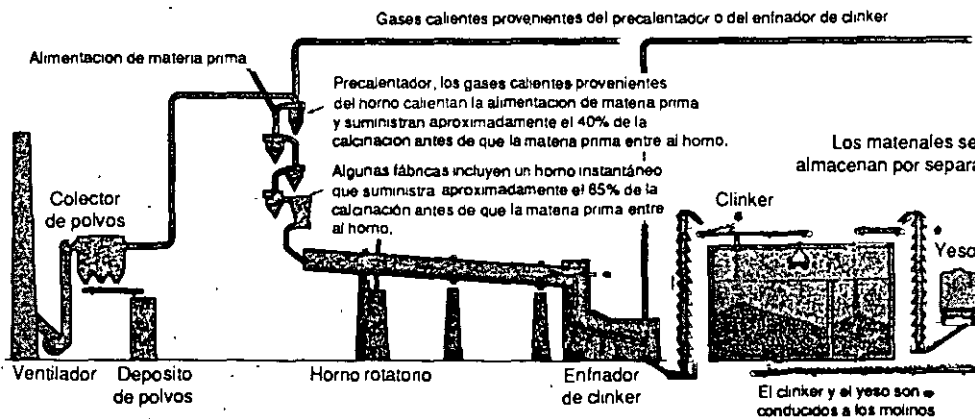


1. La roca se tritura primero hasta obtener un tamaño de 127 mm, luego hasta 19 mm y se almacena.

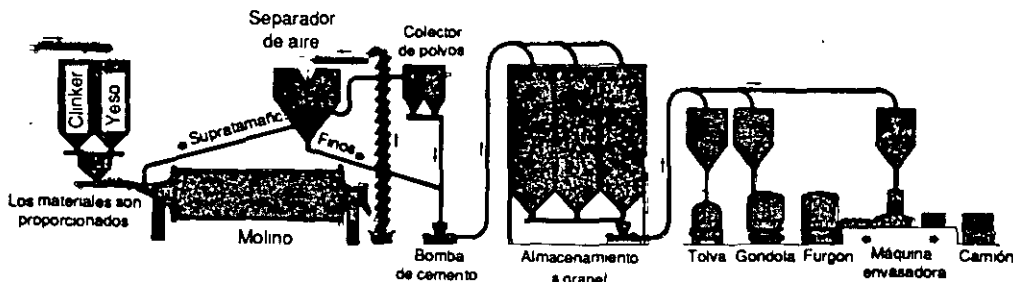


2. Las materias primas se muelen hasta obtener polvos y se mezclan.

Detalle del molino de cilindros, que combina el triturado, la molienda y la clasificación en una unidad vertical



3. La calcinación transforma químicamente a la materia prima en clinker de cemento. Note el precalentador de cuatro etapas, los hornos instantáneos y la menor longitud del horno principal.



4. El clinker se muele junto con el yeso para convertirlo en cemento portland y se embarca.

Figura 2-3. Nueva tecnología en la manufactura del cemento por proceso seco.

**Tabla 2-1. Fuentes de materias primas empleadas para la fabricación del cemento portland.**

Cal, CaO	Hierro Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sílice SiO <sub>2</sub>	Alúmina Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Yeso, CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	Magnesia, MgO
Desechos industriales Aragonita* Calcita* Polvo del horno de cemento Roca calcárea Creta Arcilla Greda Caliza* Mármol Marga* Coquilla Esquisto Escoria	Polvo del conducto de humo de horno de fundición Arcilla* Mineral de hierro* Costras de laminado* Lavaduras de mineral Cenizas de piritita Esquisto	Silicato de calcio Roca calcárea Arcilla* Ceniza volante Greda Caliza Loes Marga* Lavaduras de mineral Cuarcita Ceniza de cáscara de arroz Arena* Arenisca Esquisto* Escoria Basalto	Desperdicios de mineral de aluminio* Bauxita Roca calcárea Arcilla* Escoria de cobre Ceniza volante* Greda Granodiorita Caliza Loes Lavaduras de mineral Esquisto* Escoria Estaurolita	Anhidrita Sulfato de calcio Yeso	Roca calcárea Caliza Escoria

Nota: Probablemente el 50% de todos los productos industriales secundarios tienen potencial como materia prima para la fabricación del cemento portland.

\* Fuentes más comunes.

básicamente el mismo, ningún diagrama de flujo puede ilustrar adecuadamente a todas ellas. No existe ninguna planta típica de producción de cemento portland; cada planta tiene diferencias en cuanto a su disposición, equipo, o apariencia general.\*

Las materias primas seleccionadas (Tabla 2-1) se trituran, muelen y dosifican de tal manera que la mezcla resultante tenga la composición química deseada. Las materias primas son generalmente una mezcla de material calcáreo (óxido de calcio), como la caliza, marga, creta o coquilla, y un material arcilloso (sílice y alúmina) como la pizarra, esquisto o escoria de alto horno. Se utiliza un proceso seco o húmedo. En el proceso seco, la molienda y el mezclado se realizan con materiales secos. En el proceso húmedo, las operaciones de molienda y de mezclado se efectúan con los materiales en forma de lechada. En otros aspectos, los procesos seco y húmedo son muy similares. La figura 2-3 ilustra desarrollos tecnológicos importantes que pueden mejorar significativamente la productividad y la eficiencia energética de plantas con proceso seco.

Luego del mezclado, la materia prima molida se alimenta por el extremo superior de un horno. La materia prima pasa a una velocidad que se controla por medio de la pendiente y velocidad rotacional del horno. En el extremo inferior del horno el combustible para calcinar (carbón pulverizado, combustóleo o gas), es inyectado; donde las temperaturas de 1420°C a 1650°C transforman químicamente a la materia prima en clínker de cemento, que tiene la forma de pelotillas negro-grisáceas de 12 mm de diámetro.

El clínker se pone a enfriar y posteriormente se pulveriza. En el transcurso de esta última operación se agrega una pequeña cantidad de yeso que sirve para regular el tiempo de fraguado del cemento. El clínker se muele tan finamente que casi en su totalidad logra pasar a través de la malla No.200

(75 micras), misma que tiene 6,200 aberturas por centímetro cuadrado. Este polvo gris extremadamente fino es el cemento portland.

## TIPOS DE CEMENTO PORTLAND

Se fabrican diversos tipos de cemento portland para satisfacer diferentes necesidades químicas y físicas para propósito específicos. La norma C150 "Especificación estándar para cemento portland" de la American Society for Testing and Materials (ASTM), estipula ocho tipos de cemento portland:

Tipo I	Normal
Tipo IA	Normal, inclusor de aire
Tipo II	De resistencia moderada a los sulfatos
Tipo IIA	De resistencia moderada a los sulfatos, inclusor de aire
Tipo III	De alta resistencia a edad temprana
Tipo IIIA	De alta resistencia a edad temprana, inclusor de aire
Tipo IV	De bajo calor de hidratación
Tipo V	De resistencia elevada a los sulfatos

### Tipo I

El cemento portland de tipo I es un cemento de uso general, adecuado para ser empleado cuando las propiedades especiales de los demás tipos de cemento no sean necesarias. Se utiliza en concretos que no estén sujetos al ataque de factores agresivos tales como el ataque de sulfatos existentes en el suelo o en el agua o en concretos que tengan un aumento cuestionable de temperatura debido al calor generado durante la hidratación. Entre sus usos se incluyen pavimentos, pisos, edificios de concreto reforzado, puentes, estructuras para vías férreas, tanques y depósitos, tuberías, mamposterías, y otros productos de concreto prefabricado.

\* El equipo mecánico se describe en la Referencia 2-16.



## Tipo II

El cemento portland tipo II se emplea donde sea necesario tomar precauciones contra el ataque moderado de sulfatos, como ocurre en las estructuras de drenaje, donde las concentraciones de sulfatos existentes en las aguas freáticas son mayores de lo normal, pero sin llegar a ser demasiado severas (Ver tabla 2-2). El cemento tipo II generará normalmente menos calor a menor velocidad que el cemento tipo I. El requisito del calor moderado de hidratación se puede especificar a opción del comprador. Si se especifican límites máximos para el calor de hidratación, este cemento puede ser empleado en estructuras de volumen considerable, como en pilas de gran masa, estribos gruesos y muros de contención. Su uso reducirá el aumento de temperatura, hecho especialmente importante al realizar colados de concreto en climas cálidos.

**Tabla 2-2. Tipos de cemento necesario para concreto expuesto al ataque de sulfatos**

Exposición a los sulfatos	Sulfatos (SO <sub>4</sub> ) en el suelo solubles al agua, porcentaje por peso	Sulfatos (SO <sub>4</sub> ) en el agua, ppm	Tipo de cemento
Despreciable	0.00-0.10	0-150	—
Moderada*	0.10-0.20	150-1500	II, IP(MS), IS(MS)
Severa	0.20-2.00	1500-10,000	V
Muy severa	Arriba de 2.00	Arriba de 10,000	V más puzolana**

\* Agua de mar

\*\* Puzolana que haya demostrado por pruebas o por registros de empleo mejoras en la resistencia a los sulfatos cuando se utilice en un concreto que contenga cemento Tipo V.

Fuente: Referencia 2-20 y ACI 318, Tabla 4.5.3.

## Tipo III

El cemento portland tipo III proporciona resistencias elevadas a edades tempranas, normalmente a una semana o menos. Química y físicamente es similar al cemento tipo I, excepto que sus partículas han sido molidas más finamente. Se emplea cuando las cimbras deben ser retiradas lo más pronto posible o cuando se tenga que poner rápidamente en servicio la estructura. En climas fríos su uso permite reducir el curado controlado. A pesar que se pueden usar mezclas más ricas de cemento tipo I para lograr incrementos de resistencia a edades tempranas, el cemento tipo III puede lograr esto mismo satisfactoriamente y con mayor economía.

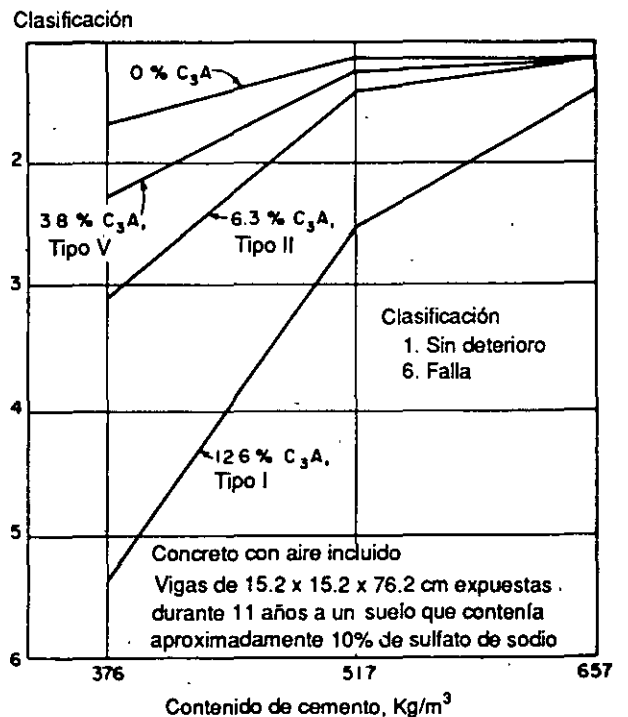
## Tipo IV

El cemento portland tipo IV se emplea cuando se tenga que mantener en un valor mínimo la cantidad y velocidad de generación de calor provocada por la hidratación. Desarrolla resistencia a una velocidad muy inferior a la de otros tipos de cemento. El cemento tipo IV se destina para estructuras de concreto masivo, como presas de gravedad grandes, donde el

aumento de temperatura resultante del calor generado en el transcurso del endurecimiento se tenga que conservar en el valor mínimo posible.

## Tipo V

El cemento portland tipo V se emplea exclusivamente en concretos expuestos a acciones severas de sulfatos - especialmente donde los suelos o las aguas freáticas contengan fuertes contenidos de sulfatos. Su resistencia es adquirida más lentamente que en el cemento tipo I. La tabla 2-2 describe las concentraciones de sulfatos en que es necesario usar cemento tipo V. La elevada resistencia a los sulfatos del cemento tipo V se atribuye al bajo contenido de aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A), tal como se ilustra en la figura 2-4. La resistencia a los sulfatos se incrementa si se incluye aire o se aumentan los contenidos de cemento (relaciones agua-cemento bajas). El cemento tipo V, al igual que los demás cementos portland, no es resistente al ataque de ácidos ni de otras sustancias fuertemente corrosivas.



**Figura 2-4. Comportamiento de concretos hechos usando cementos con distintos contenidos de C<sub>3</sub>A en un suelo con sulfatos. Se describe la clasificación en la Fig. 2-5. Referencia 2-24.**

## Cementos portland inclusores de aire

En la norma ASTM C 150 aparecen las especificaciones para los tres tipos de cemento inclusor de aire (Tipos IA, IIA, y IIIA). Corresponden en su composición a los tipos ASTM I, II y III respectivamente, con la salvedad que pequeñas cantidades de material inclusor de aire han sido mezcladas junto con el clínker durante su fabricación. Estos cementos producen concretos con resistencias mejoradas contra la acción de la congelación-deshielo y contra la descamación

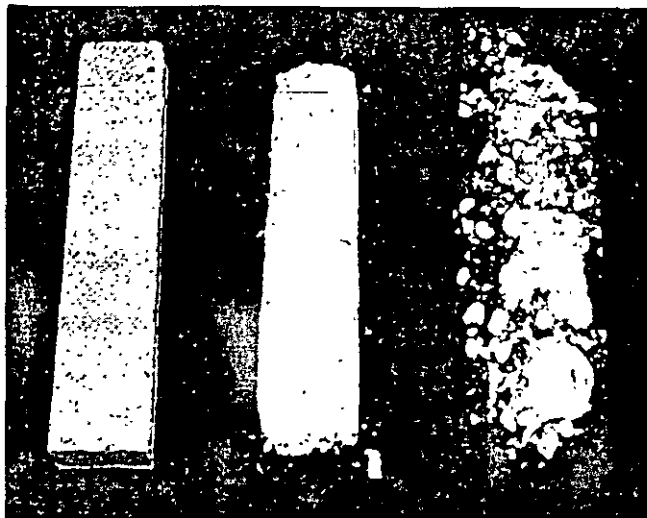


Figura 2-5. Rangos de durabilidad representados - de izquierda a derecha - por clasificaciones visuales de aproximadamente 1, 4 y 6 para las pruebas de resistencia a los sulfatos de la Figura 2-4. Referencia 2-24.

provocada por la aplicación de productos químicos para remover hielo o nieve. Semejantes concretos contienen diminutas burbujas de aire uniformemente distribuidas, y totalmente separadas entre sí.\*

## Cemento portland blanco

El cemento blanco es un verdadero cemento portland que difiere del cemento gris exclusivamente en cuanto a su color. Se fabrica conforme a las especificaciones de la norma ASTM C 150, normalmente con respecto al tipo I o al tipo III; sin embargo, el proceso de manufactura es controlado de manera tal que el producto terminado sea blanco. El cemento portland blanco es fabricado con materias primas que contienen cantidades insignificantes de óxidos de hierro y de manganeso - que son las sustancias que dan el color gris al cemento. El cemento blanco se utiliza principalmente para fines arquitectónicos, como muros precolados, paneles para fachadas, recubrimientos de terrazo, aplanados, pintura de cemento, pegamento para azulejos, y como concreto decorativo. Se recomienda el uso de este cemento siempre que se desee un concreto o un mortero blanco o coloreado.

## CEMENTOS HIDRAULICOS MEZCLADOS

El reciente interés en la conservación de energía ha impulsado el uso de materiales secundarios en el concreto de cemento portland. Los cementos hidráulicos mezclados se producen al mezclar de manera íntima y uniforme dos tipos de materiales finos. Los principales materiales de mezclado son el cemento portland, escorias de alto horno molidas, cenizas volantes y otras puzolanas, cal hidratada, y combinaciones previamente mezcladas de cemento con estos materiales. El polvo de horno de cemento, al igual que el humo de sílice y otros materiales se encuentran actualmente sujetos a investigación para poder ser

utilizados en los cementos mezclados. Los cementos hidráulicos mezclados deben concordar con los requisitos de la norma ASTM C595, que reconoce la existencia de cinco clases de cementos mezclados:

- Cemento portland de escoria de alto horno - Tipo IS
- Cemento portland-puzolana - Tipo IP y Tipo P
- Cemento de escoria - Tipo S
- Cemento portland modificado con puzolana - Tipo I(PM)
- Cemento portland modificado con escoria - Tipo I(SM)

## Tipo IS

El cemento portland de escoria de alto horno, tipo IS, se puede emplear en las construcciones de concreto en general. Al producir este tipo de cemento, la escoria de alto horno granulada de calidad seleccionada se muele junto con el clinker de cemento portland, o se muele separadamente y luego se mezcla con el cemento portland, o se produce por medio de una combinación de molienda y mezclado. El contenido de escoria de alto horno de este cemento varía entre el 25% y el 70% en peso. Se pueden especificar inclusión de aire, resistencia moderada a los sulfatos o moderado calor de hidratación agregando los sufijos A, MS o MH. Por ejemplo, un cemento portland inclusor de aire de escoria de alto horno que tenga una resistencia moderada a los sulfatos quedaría designado como Tipo IS-A(MS).\*\*

## Tipo IP y tipo P

Los tipos IP Y P sirven para designar los cementos portland puzolana. El tipo IP puede ser empleado en construcciones en general y el tipo P se utiliza en construcciones donde no sean necesarias resistencias altas a edades tempranas. El tipo P se utiliza normalmente en estructuras masivas, como estribos, presas y pilas de cimentación. Estos cementos se fabrican moliendo clinker de cemento portland con una puzolana apropiada; mezclando cemento portland o cemento portland de escoria de alto horno junto con una puzolana; o por una combinación de los dos procesos. El contenido de puzolana de los dos cementos se encuentra entre 15% y 40% en peso. Los ensayos de laboratorio indican que el comportamiento de un concreto hecho con cemento tipo IP, como grupo, es similar al de un concreto de cemento tipo I, aunque durante los 28 días son ligeramente inferiores para el cemento tipo IP que para el cemento tipo I. Los cementos tipo IP y P se pueden denominar como inclusores de aire, resistencia moderada a los sulfatos o de moderado calor de hidratación si se les añaden los sufijos A, MS, o MH. Una muestra de cemento tipo IP inclusor de aire con resistencia moderada a los sulfatos se denominaría Tipo IP-A(MS). El cemento tipo P también puede ser designado como de bajo calor de hidratación (LH).

\* Vea el Capítulo 5, "Concreto con aire incluido".

\*\* Vea las Referencias 2-11 y 2-27.

## Tipo I(PM)

El cemento portland tipo I(PM), modificado con puzolana, se emplea en todo tipo de construcciones de concreto. El cemento se fabrica combinando cemento portland o cemento portland de escoria de alto horno con una puzolana fina. Esto se puede lograr (1) mezclando el cemento portland con la puzolana, (2) mezclando el cemento portland de escoria de alto horno con la puzolana, (3) moliendo conjuntamente el clínker del cemento portland con la puzolana, o (4) por medio de una combinación de molienda conjunta y de mezclado. El contenido de la puzolana es menor que el 15%, en peso, del cemento terminado. La inclusión de aire, la resistencia moderada a los sulfatos, o el moderado calor de hidratación se puede designar en cualquier combinación agregando los sufijos A, MS, o MH. Un ejemplo de cemento tipo I(PM) inductor de aire y de moderado calor de hidratación sería cemento tipo I(PM)-A(MH):

## Tipo S

El cemento tipo S, de escoria, se usa comúnmente en donde se requieran resistencias inferiores. Este cemento se fabrica por medio de alguno de los siguientes procesos: (1) mezclando escoria molida de alto horno y cemento portland, (2) mezclando escoria molida de alto horno y cal hidratada, o (3) la combinación de mezclar escoria molida de alto horno, cemento portland y cal hidratada. El contenido mínimo de escoria es del 70% del peso del cemento de escoria. Se puede designar la inclusión de aire en un cemento de escoria agregando el sufijo A, por ejemplo, cemento tipo S-A.

## Tipo I(SM)

El cemento portland modificado con escoria, tipo I(SM) se puede emplear en todo tipo de construcciones de concreto. Se fabrica por alguno de los siguientes procesos: (1) combinando durante la molienda el clínker de cemento portland y alguna escoria granular de alto horno, (2) mezclando cemento portland con alguna escoria granular de alto horno finamente molida, o (3) por la combinación de molienda y mezclado. El contenido de escoria es inferior al 25% del peso del cemento terminado. El cemento tipo I(SM) también se puede designar con inclusión de aire, resistencia moderada a los sulfatos, o moderado calor de hidratación agregándole los sufijos A, MS, o MH. Un ejemplo sería el tipo I(SM)-A(MH), para un cemento portland modificado con escoria inductor de aire de moderado calor de hidratación.

Los cementos mezclados se pueden usar en las construcciones de concreto cuando no sean necesarias las propiedades específicas de otros tipos de cemento. Varios de los cementos mezclados tienen una menor adquisición de resistencia a edad temprana si se les compara contra el cemento tipo I. En consecuencia, si se diluye un cemento mezclado agregándole todavía más puzolanas o escorias, el concreto que se produzca se deberá probar muy cuidadosamente en cuanto a cambios de resistencia, durabilidad, contracción, permeabilidad y otras propiedades. Las temperaturas bajas en el colado y curado pueden disminuir considerablemente el incremento de resistencia y aumentar el tiempo de fraguado en concreto de cementos mezclados con fuertes contenidos de escoria o puzolana.

## CEMENTOS DE ALBAÑILERIA

Los cementos de albañilería son cementos hidráulicos diseñados para emplearse en morteros para construcciones de mampostería. Se componen de alguno o varios de los siguientes compuestos: cemento portland, cemento portland-puzolana, cemento portland de escoria de alto horno, cemento de escoria, cal hidráulica, y cemento natural; además contienen normalmente materiales como cal hidratada, caliza, creta, conchas calcáreas, talco, escoria o arcilla. Los materiales se seleccionan de acuerdo a su capacidad para impartir trabajabilidad, plasticidad y retención de agua a los morteros. Los cementos de albañilería deben cubrir los requisitos de la norma ASTM C 91, que los clasifica como Tipo N, Tipo S y Tipo M. A continuación se describe brevemente cada tipo:

El cemento de albañilería Tipo N se utiliza para morteros Tipo N y Tipo O - según la norma ASTM C 270. También se puede usar junto con cementos portland o mezclados para producir morteros Tipo S y Tipo M.

El cemento de albañilería Tipo S se utiliza para el mortero Tipo S - según la norma ASTM C 270. También se puede usar junto con cementos portland o mezclados para producir mortero Tipo M.

El cemento de albañilería Tipo M se utiliza sin la adición de otros cementos ni de cal hidratada para el mortero Tipo M - según la norma ASTM C 270.

La trabajabilidad, resistencia y color de los cementos de albañilería se mantienen a niveles uniformes gracias a los controles durante su manufactura. Aparte de ser empleados en morteros para trabajos de mampostería, los cementos de albañilería se pueden usar para argamasas y aplanados; nunca se deben emplear para elaborar concreto.

## CEMENTOS EXPANSIVOS

El cemento expansivo es un cemento hidráulico que se expande ligeramente durante el periodo de endurecimiento a edad temprana después del fraguado. Debe satisfacer los requisitos de la especificación ASTM C 845 en la cual se le designa como cemento Tipo E-1. Comúnmente se reconocen tres variedades de cemento expansivo, mismas que se designan como K, M y S, las cuales se agregan como sufijos al tipo. El cemento tipo E-1(K) contiene cemento portland, tri-aluminosulfato tetraclórico anhídrido, sulfato de calcio, y óxido de calcio sin combinar (cal). El tipo E-1(M) contiene cemento portland, cemento de aluminato de calcio y sulfato de calcio. El cemento tipo E-1(S) contiene cemento portland con un contenido elevado de aluminato tricálcico y sulfato de calcio.

El cemento expansivo también se puede fabricar siguiendo formulaciones distintas a las ya mencionadas. Las propiedades expansivas de cada tipo se pueden variar dentro de un rango considerable. El cemento tipo I se puede transformar en cemento expansivo adicionándole un aditivo expansor en la planta premezcladora.

Cuando la expansión se restringe, por ejemplo debido al refuerzo, el concreto de cemento expansivo (concreto compensador de contracciones) puede ser usado para: (1) compensar la disminución de volumen ocasionada por la contracción por secado, (2) inducir esfuerzos de tensión en el

refuerzo (postensado), y (3) estabilizar a largo plazo las dimensiones de las estructuras de concreto postensado respecto al diseño original. Una de las principales ventajas de utilizar cemento expansivo en el concreto consiste en controlar y reducir las grietas de contracción por secado. La figura 2-6 ilustra la historia del cambio longitudinal (expansión temprana y contracción por secado) de un concreto que compensa la contracción junto con aquella de concreto convencional de cemento portland.\*

## CEMENTOS ESPECIALES

Existen tipos especiales de cemento que no están necesariamente incluidos en las especificaciones ASTM; algunos de ellos contienen cemento portland. A continuación se comentan unos cuantos.

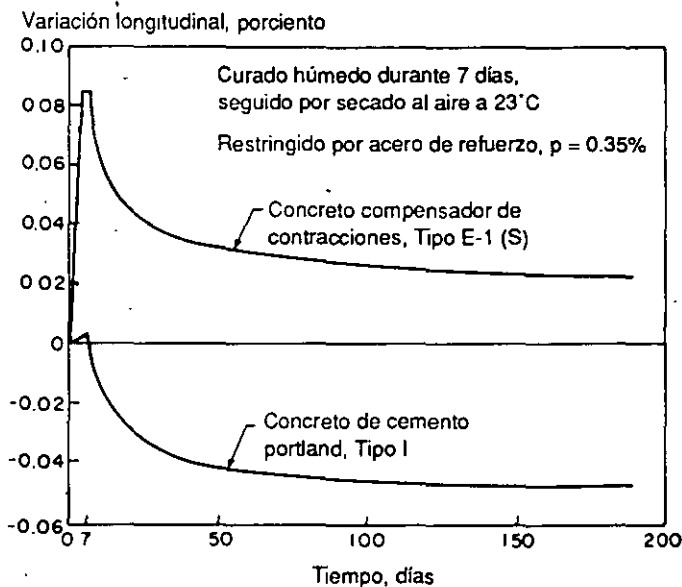


Figura 2-6. Historia de las variaciones longitudinales de un concreto compensador de contracciones que contiene cemento Tipo E-1 ( S ) y un concreto de cemento portland Tipo I. Referencia 2-14.

## Cementos para pozo petrolero

Los cementos para pozo petrolero, empleados para sellar pozos de petróleo, normalmente están hechos de clínker de cemento portland o de cementos hidráulicos mezclados. Generalmente deben tener un fraguado lento y deben ser resistentes a temperaturas y presiones elevadas. Las especificaciones para ensayos y materiales para cementos destinados a pozos del American Petroleum Institute (Especificación API 10), incluyen los requisitos para nueve clases de cemento para pozo (Clases A hasta H y J). Cada clase resulta aplicable para usarse en un cierto rango de profundidades de pozo, temperaturas, presiones, y ambientes sulfatados. La industria petrolera también emplea tipos convencionales de cemento portland con los aditivos adecuados

\* Referencias 2-19 y 2-21.

para modificar al cemento. Los cementos expansivos también se han comportado satisfactoriamente como cementos para pozos.

## Cementos portland impermeabilizados

El cemento portland impermeabilizado usualmente se hace añadiendo una pequeña cantidad de aditivo repelente al agua como el estearato (de sodio, de aluminio, u otros) al clínker de cemento portland durante la molienda final. Fabricado en color blanco o gris, reduce la transmisión capilar de agua a presiones bajas o nulas, sin embargo no detiene la transmisión de vapor de agua.\*

## Cementos plásticos

Los cementos plásticos se hacen añadiendo agentes plastificantes, en una cantidad no mayor del 12% del volumen total, al cemento portland de tipo I ó II durante la operación de molienda. Estos cementos comúnmente son empleados para hacer morteros y aplanados.

## Cementos de fraguado regulado

El cemento de fraguado regulado\*\* es un cemento hidráulico que se puede formular y controlar para producir concreto con tiempos de fraguado que varíen desde unos cuantos minutos hasta una hora y con un desarrollo de resistencia a edad temprana correspondiente a  $70 \text{ kg/cm}^2$  ó mas luego de una hora después de haber fraguado. Se trata de un cemento portland modificado que se puede fabricar en el mismo hornuso para fabricar cemento portland convencional. El cemento de fraguado regulado incorpora componentes para el control del fraguado (sulfato de calcio) junto con componentes para el desarrollo de resistencia a edad temprana. Las propiedades físicas finales del concreto resultante son en muchos aspectos comparables a las de concretos similares fabricados con cemento portland.

## Cementos con adiciones funcionales

Las adiciones funcionales que se pueden mezclar con el clínker de cemento durante la molienda, son una combinación de adiciones de reductores de agua, retardantes y acelerantes. El cemento resultante de estas adiciones, incluyendo el control de fraguado, debe cubrir los requisitos de la especificación ASTM C 688.

## DISPONIBILIDAD DE LOS CEMENTOS

Probablemente algunos de los cementos anteriormente mencionados, no se encuentren disponibles en todas las regiones de los Estados Unidos. Se debe determinar la disponibilidad de cualquier tipo de cemento portland antes de especificarlo.

\* Una exposición más completa aparece en la Referencia 2-13.

\*\* Patente estadounidense 3,628,973.

Generalmente el cemento tipo I siempre se encuentra disponible y se surte cuando no se ha especificado el tipo de cemento. El cemento tipo II normalmente se encuentra disponible, especialmente en regiones de los Estados Unidos donde sea necesario contar con resistencias moderadas contra sulfatos. Los cementos tipo I y II representan aproximadamente el 90 % del cemento que se embarca desde las plantas de los Estados Unidos. Algunos cementos se designan simultáneamente como tipo I y II, esto significa que cubren los requisitos de las especificaciones para ambos tipos. El cemento tipo III al igual que el cemento blanco se encuentran disponibles en ciudades mayores y representan cerca del 4 % del cemento producido. El cemento tipo IV sólo se fabrica cuando ha sido especificado en proyectos particulares (estructuras masivas) y por lo tanto normalmente no se encuentra disponible. El cemento tipo V solo se encuentra en regiones particulares de los Estados Unidos donde es necesario resistir ambientes cargados de sulfatos. En ocasiones los cementos inclusores de aire son difíciles de obtener. Su uso se ha visto disminuído con el aumento de popularidad de los aditivos inclusores de aire. Se puede obtener cemento de albañilería en casi cualquier lugar.†

Si no es posible disponer de un cierto tipo de cemento, con frecuencia se pueden lograr resultados comparables con alguno de los tipos con que se cuenta. Por ejemplo, el concreto de alta resistencia a edad temprana se puede hacer por medio de mezclas más ricas (de mayor contenido de cemento). También se pueden minimizar los efectos del calor de hidratación, empleando mezclas pobres, menores volúmenes de colado, usando un enfriado artificial, o añadiendo una puzolana al concreto. El cemento portland tipo V puede ser también difícil de conseguir, pero debido a la amplia gama de compuestos permitidos en las especificaciones, un cemento tipo II podría cumplir con los requisitos para el cemento tipo V.

Los cementos mezclados representan aproximadamente el 1 % del cemento embarcado en los Estados Unidos y tal vez no se encuentre en muchas regiones. Cuando se necesitan cementos mezclados y no se pueden conseguir, se pueden obtener similares propiedades por la adición de puzolanas o escorias de alto horno finamente molidas al concreto en alguna planta premezcladora que emplee cemento portland normal. Estas mezclas deberán ser probadas concienzudamente en lo que se refiere a tiempo de fraguado, aumento de resistencia, durabilidad, y otras propiedades antes de ser empleado en la construcción.

## COMPUESTOS QUIMICOS EN EL CEMENTO PORTLAND

Durante la calcinación en la fabricación del clinker de cemento portland, el óxido de calcio se combina con los componentes ácidos de la materia prima para formar cuatro compuestos fundamentales que constituyen el 90 % del peso del cemento. También se encuentran presentes yeso y otros materiales. A continuación se presentan los compuestos fundamentales, sus fórmulas químicas, y sus abreviaturas:

Silicato tricálcico	$3\text{CaO SiO}_2$	= $\text{C}_3\text{S}$
Silicato dicálcico	$2\text{CaO SiO}_2$	= $\text{C}_2\text{S}$
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$	= $\text{C}_3\text{A}$
Aluminoferrito tetracálcico	$4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3$	= $\text{C}_4\text{AF}$

En presencia del agua, los cuatro compuestos se hidratan para formar nuevos compuestos que constituyen la infraestructura de la pasta de cemento endurecido en el concreto. Los silicatos de calcio,  $\text{C}_3\text{S}$  y  $\text{C}_2\text{S}$ , que constituyen cerca del 75 % del peso del cemento, se hidratan para formar los compuestos de hidróxido de calcio e hidrato de silicato de calcio (gel de tobermorita). El cemento hidratado contiene aproximadamente un 25 % de hidróxido de calcio y un 50 % de gel de tobermorita en peso. La resistencia y otras propiedades del cemento hidratado se deben principalmente al gel de tobermorita. El  $\text{C}_3\text{A}$  reacciona con el agua y con el hidróxido de calcio para formar el hidrato de aluminato tetracálcico. El  $\text{C}_4\text{AF}$  reacciona con el agua para formar hidrato de aluminoferrito de calcio. El  $\text{C}_3\text{A}$ , el yeso y el agua se pueden combinar para formar el hidrato sulfoaluminato de calcio. Estas transformaciones básicas de compuestos se muestran en la tabla 2-3.\*

En el clinker y en el cemento, el  $\text{C}_3\text{S}$  y el  $\text{C}_2\text{S}$  son también conocidos como alita y belita, respectivamente. A estos y a otros compuestos se les puede observar y analizar por medio del empleo de técnicas de microscopía (Ver figuras 2-7 y 2-8).

A partir del análisis químico del cemento es posible calcular el porcentaje aproximado de cada compuesto. Para determinar con mayor precisión los porcentajes de los compuestos se pueden utilizar técnicas de difracción de rayos X. La tabla 2-4 muestra la composición típica así como la finura de cada uno de los principales tipos de cemento portland. El conocimiento actual de la química del cemento nos indica que estos compuestos tienen las siguientes propiedades:

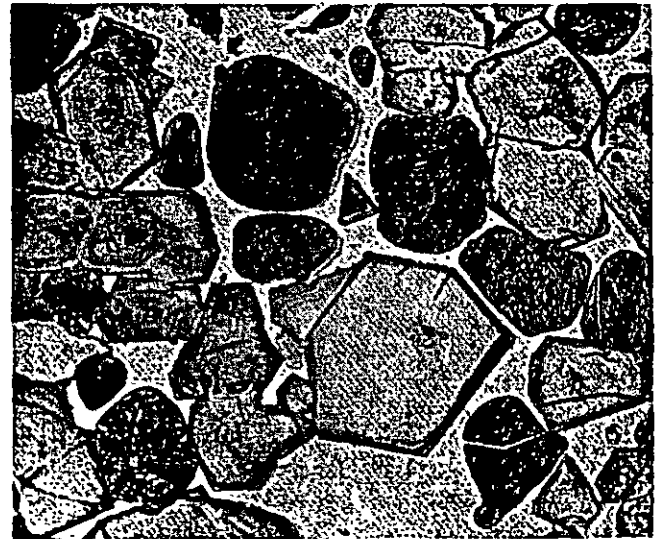


Figura 2-7. El examen de una lámina pulida muestra la alita ( $\text{C}_3\text{S}$ ) como cristales grises claros y angulares. Los cristales más oscuros y redondeados son belita ( $\text{C}_2\text{S}$ ). Aumento 400X.

† Referencia 2-25.

\* Referencia 2-10. (Vea también "Hidratación, tiempo de fraguado, endurecimiento" en el Capítulo 1.)

**Tabla 2-3. Transformaciones de los compuestos del cemento portland.**

2(3CaO·SiO <sub>2</sub> ) (Silicato tricálcico)	+ 6H <sub>2</sub> O (Agua)	= 3CaO·2SiO <sub>2</sub> ·3H <sub>2</sub> O (Gel de tabermorita)	+ 3Ca(OH) <sub>2</sub> (Hidróxido de calcio)
2(2CaO·SiO <sub>2</sub> ) (Silicato dicálcico)	+ 4H <sub>2</sub> O (Agua)	= 3CaO·2SiO <sub>2</sub> ·3H <sub>2</sub> O (Gel de tabermorita)	+ Ca(OH) <sub>2</sub> (Hidróxido de calcio)
3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Aluminato tricálcico)	+ 12H <sub>2</sub> O (Agua)	+ Ca(OH) <sub>2</sub> (Hidróxido de calcio)	= 3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·Ca(OH) <sub>2</sub> ·12H <sub>2</sub> O (Hidrato de aluminato tetracálcico)
4CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Aluminoferrito tetracálcico)	+ 10H <sub>2</sub> O (Agua)	+ 2Ca(OH) <sub>2</sub> (Hidróxido de calcio)	= 6CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·12H <sub>2</sub> O (Hidrato de aluminoferrito de calcio)
3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Aluminato tricálcico)	+ 10H <sub>2</sub> O (Agua)	+ CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O (Yeso)	= 3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·CaSO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O (Hidrato monosulfo aluminato de calcio)*

\* Se puede desarrollar también etringita.

Nota. La Tabla 2-3 ilustra únicamente las principales transformaciones y no las diversas transformaciones secundarias.

**Tabla 2-4. Composición química, compuestos y finura de algunos cementos típicos.**

Tipo de cemento portland	Composición química, %						Pérdida por ignición, %	Residuo insoluble, %	Composición potencial de los compuestos, %*				Finura Blaine m <sup>2</sup> /kg
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>			C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	
Tipo I	20.9	5.2	2.3	64.4	2.8	2.9	1.0	0.2	55	19	10	7	370
Tipo II	21.7	4.7	3.6	63.6	2.9	2.4	0.8	0.4	51	24	6	11	370
Tipo III	21.3	5.1	2.3	64.9	3.0	3.1	0.8	0.2	56	19	10	7	540
Tipo IV	24.3	4.3	4.1	62.3	1.8	1.9	0.9	0.2	28	49	4	12	380
Tipo V	25.0	3.4	2.8	64.4	1.9	1.6	0.9	0.2	38	43	4	9	380
Bianco	24.5	5.9	0.6	65.0	1.1	1.8	0.9	0.2	33	46	14	2	490

\* La "Composición potencial de compuestos" se refiere a la composición de compuestos máxima permisible por los cálculos de la norma ASTM C 150 utilizando la composición química del cemento. La composición real de compuestos puede ser menor debido a reacciones químicas incompletas o alteradas.

Referencia 2-18.



Figura 2-8. Registro fotográfico con microscopio electrónico de cristales de alita (C<sub>3</sub>S). Aumento 3000X.

El silicato tricálcico, C<sub>3</sub>S, se hidrata y endurece rápidamente y es responsable en gran medida del fraguado inicial y de la resistencia temprana. En general la resistencia temprana del concreto de cemento portland es mayor con porcentajes superiores de C<sub>3</sub>S.

El silicato dicálcico, C<sub>2</sub>S, se hidrata y endurece lentamente y contribuye en gran parte al incremento de resistencia a edades mayores de una semana.

El aluminato tricálcico, C<sub>3</sub>A, libera una gran cantidad de calor durante los primeros días de hidratación y endurecimiento. También contribuye levemente al desarrollo de la resistencia temprana. El yeso, que se agrega al cemento durante la molienda final, retrasa la velocidad de hidratación del C<sub>3</sub>A. Sin el yeso, un cemento que contuviera C<sub>3</sub>A fraguaría rápidamente. Los cementos con bajos porcentajes de C<sub>3</sub>A son particularmente resistentes a los suelos y aguas que contienen sulfatos.

El aluminoferrito tetracálcico, C<sub>4</sub>AF, reduce la temperatura de formación del clínker, ayudando por tanto a la manufactura del cemento. Se hidrata con cierta rapidez pero contribuye mínimamente a la resistencia. La mayoría de efectos de color se debe al C<sub>4</sub>AF y a sus hidratos.

## PROPIEDADES DEL CEMENTO PORTLAND

La mayor parte de especificaciones para el cemento portland limitan su composición química y sus propiedades físicas. La comprensión del significado de algunas de estas propiedades físicas es útil para interpretar los resultados de las pruebas que se efectúan al cemento. En general, las pruebas de propiedades físicas del cemento deben ser utilizadas en

clusivamente para evaluar las propiedades del cemento más que para el concreto. Las normas ASTM C 150 y C 595 limitan las propiedades de acuerdo al tipo de cemento. El cemento debe ser muestreado de conformidad con la norma ASTM C 183.

## Finura

La finura del cemento influye en el calor liberado y en la velocidad de hidratación. A mayor finura del cemento, mayor rapidez de hidratación del cemento y por lo tanto mayor desarrollo de resistencia. Los efectos que una mayor finura provoca sobre la resistencia se manifiestan principalmente durante los primeros siete días. La finura se mide por medio del ensaye del turbidímetro de Wagner (ASTM C 115), el ensaye Blaine de permeabilidad al aire (ASTM C 204), o con la malla No. 325 (45 micras) (ASTM C 430). Aproximadamente del 85% al 95% de las partículas de cemento son menores de 45 micras. En la tabla 2-4 se presentan datos respecto a la finura Blaine. Para mayor información diríjase a los comentarios que tratan sobre hidratación en el capítulo 1.

## Sanidad

La sanidad se refiere a la capacidad de una pasta endurecida para conservar su volumen después del fraguado. La expansión destructiva retardada o falta de sanidad es provocada por un exceso en las cantidades de cal libre o de magnesia. Casi todas las especificaciones para el cemento portland limitan los contenidos de magnesia (periclasa), así como la expansión registrada en la prueba de autoclave. Desde que en 1943 se adoptó la prueba de expansión en autoclave (ASTM C 151), prácticamente no han ocurrido casos de expansión anormal que puedan atribuirse a falta de sanidad.

## Consistencia

La consistencia se refiere a la movilidad relativa de una pasta de cemento o mortero recién mezclado o bien a su capacidad de fluir. Durante el ensaye de cemento, se mezclan pastas de consistencia normal, misma que se define por una penetración de  $10 \pm 1$  mm de la aguja de Vicat, mientras se mezclan morteros para obtener ya sea una relación agua-cemento fija o para producir una cierta fluidez dentro de un rango dado. La fluidez se determina en una mesa de fluidez tal como se describe en la norma ASTM C 230. Ambos métodos, el de consistencia normal y el de la prueba de fluidez sirven para regular los contenidos de agua de las pastas y morteros respectivamente, que serán empleados en pruebas subsecuentes. Ambos permiten comparar distintos ingredientes con la misma penetración o fluidez.

## Tiempo de fraguado

Para determinar si un cemento fragua de acuerdo con los tiempos especificados en la norma ASTM C 150, se efectúan pruebas usando el aparato de Vicat (ASTM C 191) o la aguja de Gillmore. El fraguado inicial de la pasta de cemento no

debe ocurrir demasiado pronto; el fraguado final tampoco debe ocurrir demasiado tarde. Los tiempos de fraguado indican si la pasta esta desarrollando sus reacciones de hidratación de manera normal. El yeso regula el tiempo de fraguado en el cemento. También influyen sobre el tiempo de fraguado la finura del cemento, la relación agua-cemento, y los aditivos usados. Los tiempos de fraguado de los concretos no están relacionados directamente con los tiempos de fraguado de las pastas debido a la pérdida de agua en el aire (evaporación) o en los lechos y debido a las diferencias de temperatura en la obra en contraste con la temperatura controlada que existe en el laboratorio.

## Fraguado Falso

El fraguado falso (Norma ASTM C 451 para el método de la pasta y norma ASTM C 359 para el método del mortero), se comprueba por una considerable pérdida de plasticidad sin que se desarrolle calor en gran abundancia poco tiempo después del mezclado. Desde el punto de vista de la colocación y del manejo, las tendencias del cemento portland a provocar fraguado falso no causarán dificultades si el concreto se mezcla un mayor tiempo de lo normal o si es remezclado sin agregarle agua antes de ser transportado y colado.

## Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión, tal como lo especifica la norma ASTM C 150, es la obtenida a partir de pruebas en cubos de mortero estándar de 5 cm, ensayados de acuerdo a la norma ASTM C 109 (figura 2-9). Estos cubos se hacen y se curan de manera prescrita y utilizando una arena estándar.

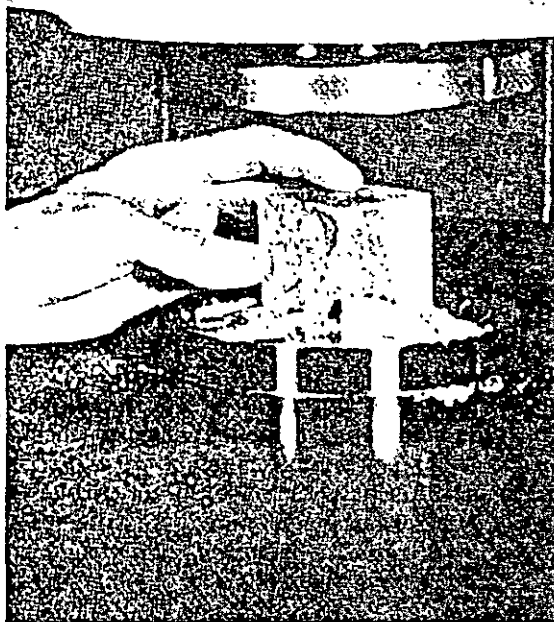


Figura 2-9. Ensaye a compresión de mortero de cemento empleando un espécimen cúbico de 5 cm de arista.

**Tabla 2-5. Requisitos de resistencia a compresión para morteros elaborados con diferentes tipos de cemento.**

Tipo de cemento	Resistencia a compresión mínima, kg/cm <sup>2</sup>				Denominación ASTM
	1 día	3 días	7 días	28 días	
<b>Cementos portland</b>					C 150-85
I	—	127	197	281*	
IA	—	102	158	225*	
II	—	105	176	281*	
	—	70†	120†	225*†	
IIA	—	84	141	225*	
	—	56†	95†	180*†	
III	127	246	—	—	
IIIA	102	197	—	—	
IV	—	—	70	176	
V	—	94	155	211	
<b>Cementos mezclados</b>					C 595-85
I(SM), IS, I(PM), IP	—	127	197	246	
I(SM)-A, IS-A	—	—	—	—	
I(PM)-A, IP-A	—	102	158	197	
IS(MS), IP(MS)	—	105	176	246	
IS-A(MS), IP-A(MS)	—	84	141	197	
S	—	—	42	105	
SA	—	—	35	88	
P	—	—	105	211	
PA	—	—	88	176	
<b>Cemento expansivo</b>					C 845-80
E-1	—	—	148	246	
<b>Cementos de albañilería</b>					C 91-83a
N	—	—	35	63	
S	—	—	91	148	
M	—	—	127	204	

\* Requisito opcional.

† Aplicable cuando se especifica el calor opcional de hidratación o el límite químico del total de C<sub>3</sub>S y C<sub>3</sub>A.

Nota: Cuando se especifica un calor de hidratación bajo o moderado en cementos mezclados (ASTM C 595), el requisito de resistencia es de 80% del valor mostrado.

Como se indica en la tabla 2-5, la resistencia a la compresión está influenciada por el tipo de cemento, para precisar, por la composición química y la finura del cemento. La norma ASTM C 150 sólo fija un requisito mínimo de resistencia que es cómodamente rebasado por la mayoría de los fabricantes. Por lo anterior, no se debe pensar que dos tipos de cemento portland que cubran los mismos requisitos mínimos produzcan la misma resistencia en el mortero o en el concreto cuando no se hayan modificado las proporciones de las mezclas.

En general, las resistencias de los cementos (teniendo como base las pruebas de cubos de mortero) no se pueden usar para predecir las resistencias de los concretos con exactitud debido a la gran cantidad de variables en las características de los agregados, mezclas de concreto y procedimientos constructivos. La figura 2-10 ilustra el desarrollo de resistencia para un concreto hecho con diversos tipos de cemento. La uniformidad en la resistencia de un cemento que provenga de una misma fuente se puede determinar siguiendo los procedimientos marcados en la norma ASTM C 917.

### Calor de hidratación

El calor de hidratación, es el calor que se genera cuando reaccionan el agua y el cemento. La cantidad de calor generado depende principalmente de la composición química del cemento, siendo el C<sub>3</sub>A y el C<sub>3</sub>S los compuestos particularmente responsables del elevado desarrollo de calor.

Otros factores que también influyen son la relación agua-cemento, la finura del cemento, y la temperatura de curado. Incrementos en la relación agua-cemento, en la finura y en la temperatura de curado aumentan el calor de hidratación.\*

En ciertas estructuras, como ocurre con aquellas de masa considerable, la velocidad así como la cantidad de calor generado son de gran importancia. Si este calor no se disipa rápidamente, puede ocurrir un aumento considerable en la temperatura del concreto. Esto puede ser indeseable puesto que, después del endurecimiento a una elevada temperatura, el enfriado no uniforme en el concreto hasta alcanzar la temperatura ambiente, puede crear esfuerzos indeseables debidos a contracción térmica y a condiciones de restricción. Por otra parte, el aumento en la temperatura del concreto provocado por el calor de hidratación es a menudo benéfico en climas fríos puesto que ayuda a mantener temperaturas de curado favorables. El calor de hidratación se prueba de acuerdo con la norma ASTM C 186.

Las cantidades aproximadas de calor generado durante los primeros siete días, tomando como 100 % al del cemento portland normal Tipo I, son las siguientes:

Tipo II	moderado	80% a 85%
Tipo III	alta resistencia a edad temprana	hasta 150%
Tipo IV	bajo calor de hidratación	40% a 60%
Tipo V	resistente a los sulfatos	60% a 75%

\* Referencia 2-7.



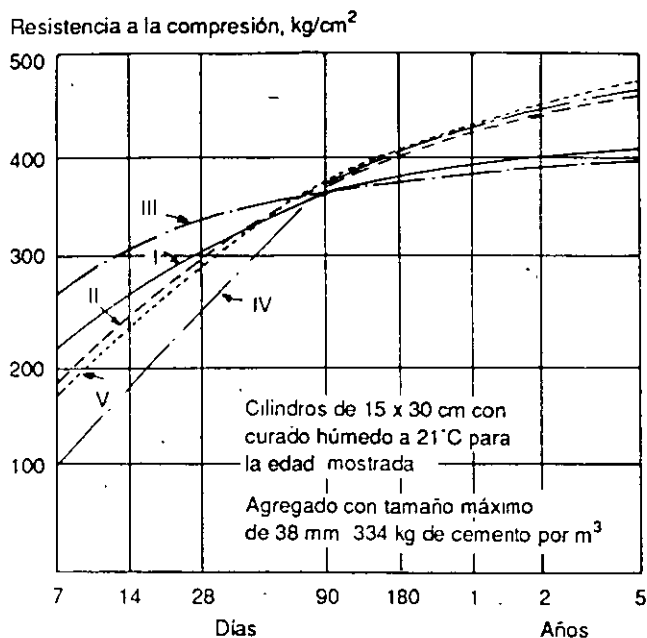


Figura 2-10. Variaciones en el desarrollo de la resistencia a compresión para concretos hechos con varios tipos de cemento. Referencia 2-20.

### Pérdida por ignición

La pérdida por ignición del cemento portland se determina calentando una muestra de cemento de peso conocido a 900°C ó 1000°C, hasta que se obtenga un peso constante. Se determina entonces la pérdida en peso de la muestra. Normalmente una pérdida por ignición elevada indica prehidratación y carbonatación, que pueden ser causadas por un almacenamiento prolongado e inadecuado o por adulteraciones durante el transporte y la descarga. El ensaye para la pérdida por ignición se lleva a cabo de acuerdo con la norma ASTM C 114.

### Peso específico

Generalmente el peso específico del cemento portland es de aproximadamente 3.15. El cemento portland de escoria de alto horno y los cementos portland-puzolana pueden tener valores de pesos específicos de aproximadamente 2.90. El peso específico de un cemento, determinado con la norma ASTM C 188 no es indicador de la calidad del cemento; su uso principal se tiene en los cálculos de proporcionamiento de mezclas.

### Embarque del cemento

La mayor parte de los cementos portland se embarcan a granel en ferrocarril, camión o barcos de transporte. La carga y descarga neumática del equipo de transporte es la manera más común para manejar el cemento a granel.

El cemento a granel se mide en los Estados Unidos por tonelada de 2,000 libras (907.185 kg) - menores cantidades se empaquetan en sacos. En los Estados Unidos un saco de

cemento portland pesa 94 libras (42.638 kg) y tiene un volumen de aproximadamente 1 pie cúbico (28.32 lt) cuando acaba de ser empacado.\*\*\*\*\* El peso del cemento de albañilería va impreso en el saco.

La densidad real del cemento portland a granel puede variar considerablemente dependiendo de su manejo y almacenamiento. Un cemento portland demasiado suelto puede pesar únicamente 833 kg/m<sup>3</sup>, mientras que si se compacta por vibración, el mismo cemento puede llegar a pesar 1,650 kg/m<sup>3</sup>.\* Por este motivo, la práctica correcta consiste en pesar el cemento a granel para cada mezcla de concreto que se vaya a producir.

## ALMACENAMIENTO DEL CEMENTO

El cemento portland es un material sensible a la humedad; si se mantiene seco, mantendrá indefinidamente su calidad. Un cemento portland que durante su almacenamiento haya estado en contacto con aire húmedo o con humedad, fraguará más lentamente y tendrá menor resistencia que un cemento que se hubiera mantenido seco. La humedad relativa dentro del almacén o cobertizo empleado para almacenar los sacos de cemento debe ser la menor posible. Se deben cerrar todas las grietas y aberturas en techos y paredes. Los sacos de cemento no se deben almacenar sobre pisos húmedos, sino que deben descansar sobre tarimas. Los sacos se deben apilar juntos para reducir la circulación del aire, pero nunca se deben apilar contra las paredes que den hacia el exterior. Los sacos que se almacenen durante períodos prolongados se deberán cubrir con mantas o con alguna otra cubierta impermeable. Los sacos se deben apilar de manera tal que los primeros en entrar sean los primeros en salir.

En obras pequeñas, donde no se dispone de cobertizos, los sacos se deben colocar sobre plataformas de madera elevadas sobre el suelo a una altura mínima de entre 10 y 15 cm. Se deben colocar sobre las pilas cubiertas impermeables, extendiéndolas para proteger también los costados de la plataforma y así evitar que el agua de lluvia llegue al cemento o a la plataforma. Las plataformas que se llegan a mojar pueden dañar los sacos inferiores.

El cemento que ha sido almacenado durante períodos prolongados puede sufrir lo que se ha denominado "compactación de bodega". Normalmente esto se corrige rodando los sacos en el suelo. Cuando se use el cemento, deberá fluir libremente y estar exento de terrones. Si los terrones no se desmoronan fácilmente, el cemento deberá probarse antes de ser utilizado en trabajos importantes. Siempre que se tengan dudas en cuanto a la calidad de algún cemento, deberá practicarse pruebas de resistencia o de pérdida por ignición.

Comúnmente el cemento no permanece almacenado mucho tiempo, pero puede almacenarse durante períodos prolongados sin sufrir deterioros. El cemento a granel se debe almacenar en silos o depósitos de acero o concreto impermeables. En los depósitos o silos se debe usar ventilación seca a baja presión o vibración para que fluya mejor el cemento y

\*\*\*\*\* En México el cemento a granel se mide en toneladas métricas y los sacos de cemento tienen un peso de 50 kg.

\* Referencia 2-9.

para evitar que se rebase la capacidad del mismo. Debido al abudamiento del cemento, los silos pueden sólo retener aproximadamente un 80% de la capacidad considerada.

## CEMENTO CALIENTE

Cuando el clinker del cemento se pulveriza en el molino, la fricción genera calor. En consecuencia el cemento recién molido está todavía caliente cuando se coloca en los silos de almacenamiento en la planta de cemento y este calor se disipa lentamente. Por lo tanto, durante los meses de verano en que es alta la demanda\*, el cemento puede aún estar caliente cuando se entrega en una planta de concreto premezclado o en el sitio de trabajo. Las pruebas\* han mostrado que el efecto del cemento caliente sobre la trabajabilidad y el desarrollo de la resistencia del concreto no son de consideración. Las temperaturas del agua de mezclado y de los agregados desempeñan un papel mucho más importante al determinar la temperatura del concreto.

\* Referencia 2-4.

## REFERENCIAS

- 2-1. McMillan, F. R.; Tyler, I. L.; Hansen, W. C.; Lerch, W.; Ford, C. L.; and Brown, L. S., *Long-Time Study of Cement Performance in Concrete*, Research Department Bulletin RX026, Portland Cement Association, 1948.
- 2-2. Gonnerman, H. F., and Lerch, William, *Changes in Characteristics of Portland Cement Exhibited by Laboratory Tests Over the Period 1904 to 1950*, Research Department Bulletin RX039, Portland Cement Association, 1952.
- 2-3. Bogue, R. H., *The Chemistry of Portland Cement*, Reinhold Publishing Corporation, New York, 1955.
- 2-4. Lerch, William, *Hot Cement and Hot Weather Concrete Tests*, TA015T, Portland Cement Association, 1955.
- 2-5. Brunauer, S., *Some Aspects of the Physics and Chemistry of Cement*, Research Department Bulletin RX080, Portland Cement Association, 1957.
- 2-6. Gonnerman, H. F., *Development of Cement Performance Tests and Requirements*, Research Department Bulletin RX093, Portland Cement Association, 1958.
- 2-7. Copeland, L. E.; Kantro, D. L.; and Verbeck, George, *Chemistry of Hydration of Portland Cement*, Research Department Bulletin RX153, Portland Cement Association, 1960.
- 2-8. Clausen, C. F., *Cement Materials*, Research Department Report MP-95, Portland Cement Association, 1960.
- 2-9. Toler, H. R., *Flowability of Cement*, Research Department Report MP-106, Portland Cement Association, October, 1963.
- 2-10. Bunauer, Stephen, and Copeland, L. E., "The Chemistry of Concrete," *Scientific American*, Scientific American, Inc., New York, April 1964.
- 2-11. Klieger, Paul, and Isberner, Albert W., *Laboratory Studies of Blended Cements—Portland Blast-Furnace Slag Cements*, Research Department Bulletin RX218, Portland Cement Association, 1967.
- 2-12. Verbeck, G. J., *Field and Laboratory Studies of the Sulphate Resistance of Concrete*, Research Department Bulletin RX227, Portland Cement Association, 1967.
- 2-13. Lea, F. M., *The Chemistry of Cement and Concrete*, 3rd ed., Chemical Publishing Co., Inc., New York, 1971.
- 2-14. Pfeifer, Donald W., and Perenchio, W. F., *Reinforced Concrete Pipe Made with Expansive Cements*, Research and Development Bulletin RD015W, Portland Cement Association, 1973.
- 2-15. Perenchio, William F., and Klieger, Paul, *Further Laboratory Studies of Portland-Pozzolan Cements*, Research and Development Bulletin RD041T, Portland Cement Association, 1976.
- 2-16. Duda, Walter H., *Cement Data Book, International Process Engineering in the Cement Industry*, 2nd ed., Macdonald & Evans, London, 1977.
- 2-17. Russell, H. G., *Performance of Shrinkage-Compensating Concretes in Slabs*, Research and Development Bulletin RD057D, Portland Cement Association, 1978.
- 2-18. Kirk, Raymond E., and Othmer, Donald F., eds., "Cement," *Encyclopedia of Chemical Technology*, 3rd ed., vol. 5, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1979, pages 163-193.
- 2-19. *Cedric Willson Symposium on Expansive Cements*, SP-64, American Concrete Institute, Detroit, 1980.
- 2-20. *Concrete Manual*, 8th ed., U.S. Bureau of Reclamation, Denver, revised 1981.
- 2-21. *Standard Practice for the Use of Shrinkage-Compensating Concrete*, ACI 223-83, ACI Committee 223 Report, American Concrete Institute, Detroit, 1983.
- 2-22. Young, J. Francis, *Hydraulic Cements for Concrete*, E3-83, American Concrete Institute, 1983.
- 2-23. Bhatti, M. S. Y., "Use of Cement-Kiln-Dust in Blended Cements," *World Cement*, vol. 15, no. 4, Palladian Publications Ltd., London, 1984.
- 2-24. Stark, David, *Longtime Study of Concrete Durability in Sulfate Soils*, Research and Development Bulletin RD086T, Portland Cement Association, 1984.
- 2-25. *The U.S. Cement Industry, an Economic Report*, SP015G, Portland Cement Association, 1984.
- 2-26. *Guide to the Selection and Use of Hydraulic Cements*, ACI 225R-85, ACI Committee 225 Report, American Concrete Institute, 1985.
- 2-27. Frohnsdorff, Geoffrey, ed., *Blended Cement*, STP 897, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1986.
- 2-28. Campbell, Donald H., *Microscopical Examination and Interpretation of Portland Cement and Clinker*, SP030T, Portland Cement Association, 1986.

## CAPITULO 3

# Agua de mezclado para el concreto

Casi cualquier agua natural que sea potable y que no tenga un sabor u olor pronunciado, se puede utilizar para producir concreto. Sin embargo, algunas aguas no potables pueden ser adecuadas para el concreto.

En la Tabla 3-1 se presentan seis análisis típicos, de suministros de agua a algunas ciudades y de agua de mar. Estas aguas semejan en su composición las de los suministros de agua doméstica para la mayor parte de ciudades con más de 20,000 habitantes en los Estados Unidos y en Canadá. El agua proveniente de cualquiera de estas fuentes es adecuada para producir concreto. Una fuente de abastecimiento cuyo análisis sea parecido a alguno de las aguas que aparecen en la tabla será probablemente satisfactoria para ser utilizada en el concreto.

Del agua que se tengan dudas, se puede utilizar para fabricar concreto si los cubos de mortero (Norma ASTM C 109), producidos con ella alcanzan resistencias a los siete días iguales a al menos el 90% de especímenes testigo fabricados con agua potable o destilada. Además se deberán realizar los ensayos ASTM C 191 para asegurar que las impurezas en el agua no afecten el tiempo de fraguado del cemento acortándolo o prolongándolo. En la norma ASTM C 94 y en la norma American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) T 26\* se proponen criterios de aceptación para el agua que será empleada en el concreto (ver Tablas 3-2 y 3-3).

Las impurezas excesivas en el agua no sólo pueden afectar el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto, sino también pueden ser causa de eflorescencia, manchado,

corrosión del refuerzo, inestabilidad volumétrica y una menor durabilidad. Por consiguiente se pueden fijar ciertos límites opcionales en el contenido de cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos en el agua o se pueden desarrollar ensayos adecuados para determinar el efecto que la impureza provoque sobre ciertas propiedades. Algunas impurezas pueden tener un efecto mínimo sobre la resistencia y el tiempo de fraguado, pero pueden afectar de manera adversa a la durabilidad y a algunas otras propiedades.

El agua que contiene menos de 2,000 partes por millón (ppm) de sólidos disueltos totales generalmente puede ser utilizada de manera satisfactoria para elaborar concreto. El agua que contenga más de 2,000 ppm de sólidos disueltos deberá ser ensayada para investigar su efecto sobre la resistencia y el tiempo de fraguado.

A continuación se presenta un resumen de los efectos que ciertas impurezas en el agua tienen sobre la calidad de un concreto normal.\*\*

## Carbonatos y bicarbonatos alcalinos

Los carbonatos y bicarbonatos de sodio y potasio tienen diferentes efectos en los tiempos de fraguado de cementos

\* Referencia 3-3.

\*\* En la Referencia 3-1 se encuentra información adicional sobre los efectos que distintas impurezas en el agua provocan en el concreto. Se examinan más de 100 compuestos y iones diferentes.

**Tabla 3-1. Análisis típicos de suministros de agua a ciudades y de agua de mar, partes por millón.**

Productos químicos	Análisis No						Agua de mar*
	1	2	3	4	5	6	
Sílice (SiO <sub>2</sub> )	2.4	0.0	6.5	9.4	22.0	3.0	—
Hierro (Fe)	0.1	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	—
Calcio (Ca)	5.8	15.3	29.5	96.0	3.0	1.3	50-480
Magnesio (Mg)	1.4	5.5	7.6	27.0	2.4	0.3	260-1410
Sodio (Na)	1.7	16.1	2.3	183.0	215.0	1.4	2190-12,200
Potasio (K)	0.7	0.0	1.6	18.0	9.8	0.2	70-550
Bicarbonato (HCO <sub>3</sub> )	14.0	35.8	122.0	334.0	549.0	4.1	—
Sulfato (SO <sub>4</sub> )	9.7	59.9	5.3	121.0	11.0	2.6	580-2810
Cloruro (Cl)	2.0	3.0	1.4	280.0	22.0	1.0	3960-20,000
Nitrato (NO <sub>3</sub> )	0.5	0.0	1.6	0.2	0.5	0.0	—
Sólidos disueltos totales	31.0	250.0	125.0	983.0	564.0	19.0	35,000

\* Los diferentes mares contienen distintas cantidades de sales disueltas.

**Tabla 3-2. Criterios de aceptación para suministros de aguas dudosas (ASTM C 94).**

	Límites	Método de ensaye
Resistencia a la compresión a 7 días, porcentaje mínimo respecto al testigo	90	C 109*
Tiempo de fraguado, desviación con respecto al testigo, hr:min.	De 1:00 antes a 1:30 después	C 191*

\* Las comparaciones deberán basarse en proporcionamientos fijos, así como en igual volumen de agua de prueba comparado con el del agua potable o agua destilada de la mezcla de control.

**Tabla 3-3. Límites químicos para aguas de enjuague empleadas como aguas de mezclado (ASTM C 94).**

Producto químico	Concentración máxima,* ppm	Método de ensaye**
Cloruro, como Cl Concreto presforzado o concreto para cubiertas de puentes	500†	ASTM D 512
Otros concretos reforzados en ambientes húmedos o que contengan insertos de aluminio o metales diferentes, o cimbras permanentes de metal galvanizado	1,000†	
Sulfato, como SO <sub>4</sub>	3,000	ASTM D 516
Alcalis, como (Na <sub>2</sub> O + 0.658 K <sub>2</sub> O)	600	
Sólidos totales	50,000	AASHTO T 26

\* El agua de enjuague que se vuelve a emplear como agua de mezclado para concreto puede sobrepasar las concentraciones anotadas de cloruro y de sulfato si se demuestra que la concentración total calculada en el agua de mezclado, incluyendo el agua de mezclado de los agregados y de otras fuentes, no excede los límites señalados.

\*\* Se pueden emplear otros métodos de ensaye que hayan demostrado producir resultados comparables.

† En condiciones que permitan usar acelerante CaCl<sub>2</sub> como aditivo, se puede ignorar la restricción sobre cloruro.

corrosión del acero de refuerzo, o de los torones del presfuerzo. Los iones cloruro atacan la capa de óxido protectora formada en el acero por el medio químico altamente alcalino (pH 12.5) presente en el concreto. El nivel de iones cloruro solubles en el agua en el cual la corrosión del acero de refuerzo comienza en el concreto es de aproximadamente 0.15 % del peso del cemento.\* Del contenido total de ión cloruro en el concreto, sólo es soluble en el agua aproximadamente del 50 % al 85 %: el resto se combina químicamente en reacciones del cemento.\*\*

Los cloruros se pueden introducir en el concreto, ya sea con los ingredientes separados - aditivos, agregados, cemento y agua - o a través de la exposición a las sales anticongelantes, al agua de mar, o al aire cargado de sales cerca de las costas. El colocar un límite aceptable del contenido de cloruro para cualquier ingrediente, como el agua de mezclado, es una tarea difícil debido a las diversas fuentes posibles de iones cloruro en el concreto. Un límite aceptable en el concreto dependerá principalmente del tipo de estructura y del medio al cual esté expuesta durante su vida de servicio.

Habitualmente un elevado contenido de sólidos disueltos en agua natural, se debe a un fuerte contenido de cloruro de sodio o de sulfato de sodio. Ambos se pueden tolerar en grandes cantidades. En un concreto que vaya a estar seco y que tenga un bajo potencial de reacciones corrosivas, se pueden tolerar normalmente concentraciones de 20,000 ppm de cloruro de sodio. El agua que se utilice en concreto presforzado o en un concreto que vaya a tener embebido aluminio no deberá contener cantidades nocivas de ión cloruro. Las aportaciones de cloruros de los ingredientes distintos al agua también se deberán tomar en consideración. Los aditivos de cloruro de calcio se deberán emplear con mucha precaución.

El Reglamento de Construcción del American Concrete Institute, ACI 318, limita el contenido de ión cloruro soluble al agua en el concreto, a los siguientes porcentajes en peso del cemento:†

Concreto presforzado	0.06%
Concreto reforzado expuesto a cloruros durante su servicio	0.15%
Concreto reforzado que vaya a estar seco o protegido contra la humedad durante su servicio	1.00%
Otras construcciones de concreto reforzado	0.30%

## Sulfatos

El interés respecto a un elevado contenido de sulfatos en el agua, se debe a las posibles reacciones expansivas y al deterioro por ataque de sulfatos, especialmente en aquellos lugares donde el concreto vaya a quedar expuesto a suelos o

\* Referencia 3-5.

\*\* Referencia 3-4.

† El Comité ACI 222R aconseja que el máximo contenido de cloruro soluble en ácido, según la norma ASTM C 114, sea de 0.08% y de 0.20% para concreto presforzado y concreto reforzado, respectivamente. Los Comités ACI 318 y 222R no consignan límites para la cantidad de cloruro en concreto sin refuerzo. Refiérase al Capítulo 14 sobre pruebas, para determinar contenido de cloruro. También consulte la Referencia 3-6 y el Capítulo "Inhibidores de la corrosión".

distintos. El carbonato de sodio puede causar fraguados muy rápidos, en tanto que los bicarbonatos pueden acelerar o retardar el fraguado. En concentraciones fuertes estas sales pueden reducir de manera significativa la resistencia del concreto. Cuando la suma de sales disueltas exceda 1,000 ppm, se deberán realizar pruebas para analizar su efecto sobre el tiempo de fraguado y sobre la resistencia a los 28 días. También se deberá considerar la posibilidad que se presenten reacciones álcali-agregado graves.

## Cloruros

La inquietud respecto a un elevado contenido de cloruros en el agua de mezclado, se debe principalmente al posible efecto adverso que los iones de cloruro pudieran tener en la

agua con contenidos elevados de sulfatos. Aunque se han empleado satisfactoriamente aguas que contengan 10,000 ppm de sulfato de sodio, el límite de la Tabla 3-3 se deberá respetar a menos que se tomen precauciones especiales.

## Otras sales comunes

Los carbonatos de calcio y de magnesio no son muy solubles en el agua y rara vez se les encuentra en concentraciones suficientes para afectar la resistencia del concreto. En algunas aguas municipales se pueden encontrar bicarbonatos de calcio y de magnesio. No se consideran dañinas las concentraciones inferiores o iguales a 400 ppm de bicarbonato en estas formas.

El sulfato de magnesio y el cloruro de magnesio pueden estar presentes en concentraciones elevadas sin que tengan efectos nocivos sobre la resistencia. Se han obtenido buenas resistencias con concentraciones hasta de 40,000 ppm de cloruro de magnesio. Las concentraciones de sulfato de magnesio deberán ser inferiores a 25,000 ppm.

## Sales de hierro

Las aguas freáticas naturales rara vez contienen más de 20 a 30 ppm de hierro; sin embargo, las aguas de mina ácidas pueden contener cantidades muy grandes. Las sales de hierro en concentraciones hasta de 40,000 ppm normalmente no afectan de manera adversa al desarrollo de la resistencia.

## Diversas sales inorgánicas

Las sales de manganeso, estaño, zinc, cobre y plomo presentes en el agua pueden provocar una reducción considerable en la resistencia y también grandes variaciones en el tiempo de fraguado. De éstas, las más activas son las sales de zinc, de cobre y de plomo. Las sales que son especialmente activas como retardantes, incluyen al yodato de sodio, fosfato de sodio, arsenato de sodio y borato de sodio. Todas ellas pueden retardar fuertemente el desarrollo del fraguado y de la resistencia cuando se les encuentra en concentraciones de unas cuantas décimas porcentuales del contenido en peso del cemento. Generalmente se pueden tolerar en el agua de mezclado concentraciones de estas sales hasta de 500 ppm.

Otra sal que puede ser dañina al concreto es el sulfuro de sodio; aún la presencia de 100 ppm requiere de ensayos.

## Agua de mar

El agua de mar que contenga hasta 35,000 ppm de sales disueltas, generalmente es adecuada como agua para fabricar concreto simple. Aproximadamente el 78 % de la sal es cloruro de sodio y el 15 % es cloruro y sulfato de magnesio. Aún cuando un concreto hecho con agua de mar puede tener una resistencia temprana mayor que un concreto normal, sus resistencias a edades mayores (después de 28 días) pueden ser inferiores. Esta reducción de resistencia puede ser compensada reduciendo la relación agua-cemento.

El agua de mar no es adecuada para producir concreto reforzado con acero y no deberá usarse en concretos presfor-

zados debido al riesgo de corrosión del refuerzo, particularmente en ambientes cálidos y húmedos.

El sodio y el potasio de las sales presentes en el agua de mar que se utilice para fabricar concreto, se puede combinar con agregados reactivos a los álcalis de la misma manera que los álcalis en el cemento. En consecuencia, el agua de mar no se deberá usar para producir concretos que tengan agregados potencialmente reactivos con los álcalis, aún cuando el contenido de álcalis en el cemento sea bajo. El agua de mar que se utiliza para producir concreto, también tiende a causar eflorescencia y humedad en superficies de concreto expuestas al aire y al agua.\* Los agregados provenientes del dragado marino se tratan en el Capítulo 4.

## Aguas ácidas

La aceptación de agua ácida como agua de mezclado se deberá basar en la concentración (en partes por millón) de ácidos en el agua. Ocasionalmente la aceptación se basa en el pH, que es una medida de la concentración del ión hidrógeno.\*\* El valor pH es un índice de intensidad y no es la mejor medida de una reacción potencial ácida o base.

En general, el agua de mezclado que contiene ácidos clorhídrico, sulfúrico y otros ácidos inorgánicos comunes en concentraciones inferiores a 10,000 ppm no tiene un efecto adverso en la resistencia. Las aguas ácidas con valores pH menores que 3.0 pueden ocasionar problemas de manejo y se deben evitar en la medida de lo posible.

## Aguas alcalinas

Las aguas con concentraciones de hidróxido de sodio de 0.5% el peso del cemento, no afectan en gran medida a la resistencia del concreto toda vez que no ocasionen un fraguado rápido. Sin embargo, mayores concentraciones pueden reducir la resistencia del concreto.

El hidróxido de potasio en concentraciones menores a 1.2% por peso de cemento tiene poco efecto en la resistencia del concreto desarrollada por ciertos cementos, pero la misma concentración al ser usada con otros cementos puede reducir sustancialmente la resistencia a los 28 días.

La posibilidad de una mayor reactividad álcali-agregado se deberá tomar en cuenta.

## Aguas de enjuague

La Agencia de Protección Ambiental y las agencias estatales de los EEUU prohíben descargar en las vías fluviales, aguas de enjuague no tratadas que han sido utilizadas para aprovechar la arena y la grava de concretos regresados o para lavar las mezcladoras. Sin embargo es permisible reusar el agua de enjuague como agua en el concreto si satisface los límites de las Tablas 3-2 y 3-3.

\* Referencia 3-1.

\*\* El PH del agua neutra es de 7.0; los valores inferiores a 7.0 indican acidez y los valores superiores a 7.0 indican alcalinidad.

## Aguas de desperdicios industriales

La mayor parte de las aguas que llevan desperdicios industriales tienen menos de 4,000 ppm de sólidos totales. Cuando se hace uso de estas aguas como agua de mezclado para el concreto, la reducción en la resistencia a la compresión generalmente no es mayor que del 10% al 15%. Las aguas de desperdicios industriales como las de curtidurías, fábricas de pinturas, plantas de coque, y plantas químicas y galvanizadoras pueden contener impurezas nocivas. Lo mejor es ensayar cualquier agua de desperdicio que contenga aún unos cuantos cientos de partes por millón de sólidos poco comunes.

## Aguas negras

Las aguas negras típicas pueden contener aproximadamente 400 ppm de materia orgánica. Luego que estas aguas se han diluido en un buen sistema de tratamiento, la concentración se ve reducida a aproximadamente 20 ppm o menos. Esta cantidad es demasiado pequeña para tener cualquier efecto de importancia en la resistencia.

## Impurezas orgánicas

El efecto que las sustancias orgánicas presentes en las aguas naturales puedan tener en el tiempo de fraguado del cemento portland o en la resistencia última del concreto, es un problema que presenta una complejidad considerable. Las aguas que estén muy coloreadas, las aguas con un olor notable o aquellas aguas en que sean visibles algas verdes o cafés deberán ser vistas con desconfianza y en consecuencia ensayadas.

## Azúcar

Una pequeña cantidad de sacarosa, de 0.03 % a 0.15 % del peso del cemento, normalmente retarda el fraguado del cemento. El límite superior de este rango varía respecto de los distintos cementos. La resistencia a 7 días puede verse reducida, en tanto que la resistencia a los 28 días podría aumentar. El azúcar en cantidades de 0.25 % ó más del peso del cemento puede provocar un fraguado rápido y una reducción sustancial de la resistencia a los 28 días. Cada tipo de azúcar afecta al tiempo de fraguado y a la resistencia de manera distinta.

Menos de 500 ppm de azúcar en el agua de mezclado, generalmente no producen un efecto adverso en el desarrollo de la resistencia, pero si la concentración sobrepasa esta cantidad, se deberán realizar ensayos para analizar el tiempo de fraguado y el desarrollo de la resistencia.

## Sedimentos o partículas en suspensión

Se puede tolerar en el agua aproximadamente 2,000 ppm de arcilla en suspensión o de partículas finas de roca. Cantidades mayores podrían no afectar la resistencia, pero bien podrían

influir sobre otras propiedades de algunas mezclas de concreto. Antes de ser empleada, cualquier agua lodosa deberá pasar a través de estanques de sedimentación o deberá ser clarificada por cualquier otro medio para reducir la cantidad de sedimentos y de arcilla agregada a la mezcla. Cuando se regresan finos de cemento al concreto en aguas de enjuague recicladas, se pueden tolerar 50,000 ppm.

## Aceites

Ocasionalmente se encuentran presentes varios tipos de aceite en el agua. El aceite mineral (petróleo) no mezclado con aceites animales o vegetales tiene probablemente un menor efecto en el desarrollo de la resistencia que otros aceites. Sin embargo, concentraciones de aceite mineral mayores que 2.5 % del peso del cemento pueden reducir la resistencia en más del 20 %.

## Algas

El agua que contiene algas no es adecuada para producir concreto porque las algas pueden causar una reducción excesiva en la resistencia ya sea influyendo en la hidratación del cemento o bien provocando que se incluya una gran cantidad de agua en el concreto. Las algas también pueden estar presentes en la superficie de los agregados, en cuyo caso la adherencia entre el agregado y la pasta de cemento se ve reducida.

## REFERENCIAS

- 3-1. Steinorur, H. H., *Concrete Mix Water—How Impure Can It Be?*, Research Department Bulletin RX119, Portland Cement Association, 1960.
- 3-2. McCoy, W. J., "Mixing and Curing Water for Concrete," *Significance of Test and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, STP 169-A, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1966, pages 515-521.
- 3-3. *Method of Test for Quality of Water to Be Used in Concrete*, T26-79, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1979.
- 3-4. *Guide to Durable Concrete*, ACI 201.2R-77, Reaffirmed 1982, ACI Committee 201 Report, American Concrete Institute, Detroit.
- 3-5. *Corrosion of Metals in Concrete*, ACI 222R-85, ACI Committee 222 Report, American Concrete Institute, 1985.
- 3-6. Gaynor, Richard D., *Understanding Chloride Percentages*, NRMCA Publication Number 173, National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, 1985.

## CAPITULO 4

# Agregados para el concreto

La importancia de utilizar el tipo y la calidad adecuados de agregados, no debe ser subestimada pues los agregados finos y gruesos ocupan comúnmente de 60% a 75% del volumen del concreto (70% a 85% en peso), e influyen notablemente en las propiedades del concreto recién mezclado y endurecido, en las proporciones de la mezcla, y en la economía. Los agregados finos comúnmente consisten en arena natural o piedra triturada siendo la mayoría de sus partículas menores que 5 mm. Los agregados gruesos consisten en una grava o una combinación de gravas o agregado triturado cuyas partículas sean predominantemente mayores que 5 mm y generalmente entre 9.5 mm y 38 mm.\* Algunos depósitos naturales de agregado, a veces llamados gravas de mina, consisten en grava y arena que pueden ser utilizadas en el concreto luego de un tratamiento mínimo. La grava y la arena naturales, usualmente se excavan o se dragan de alguna mina, río, lago o lecho marino. El agregado triturado se produce triturando roca de cantera, piedra bola, guijarros, o grava de gran tamaño. La escoria de alto horno enfriada al aire y triturada también se utiliza como agregado grueso o fino. Normalmente los agregados se lavan y se gradúan en la mina o planta. Se puede esperar cierta variación en el tipo, calidad, limpieza, granulometría, contenido de humedad así como en otras propiedades. Cerca de la mitad de los agregados gruesos empleados en el concreto de cemento portland en los Estados Unidos de Norteamérica son gravas; la mayor parte del resto son piedras trituradas.

Los agregados para concreto que se encuentran en estado natural, son una mezcla de rocas y minerales (vea la Tabla 4-1). Un mineral es una sustancia sólida natural que tiene una estructura interna ordenada y una composición química que varía dentro de límites muy estrechos. Las rocas (que dependiendo de su origen se pueden clasificar como ígneas, sedimentarias o metamórficas), se componen generalmente de varios minerales. Por ejemplo, el granito contiene cuarzo, feldespato, mica y otros cuantos minerales; la mayor parte de las calizas consisten en calcita, dolomita y pequeñas cantidades de cuarzo, feldespato y arcilla. El intemperismo y la erosión de las rocas producen partículas de piedra, grava, arena, limo, y arcilla.

\* La norma ASTM C 125 describe más ampliamente al agregado fino y grueso.

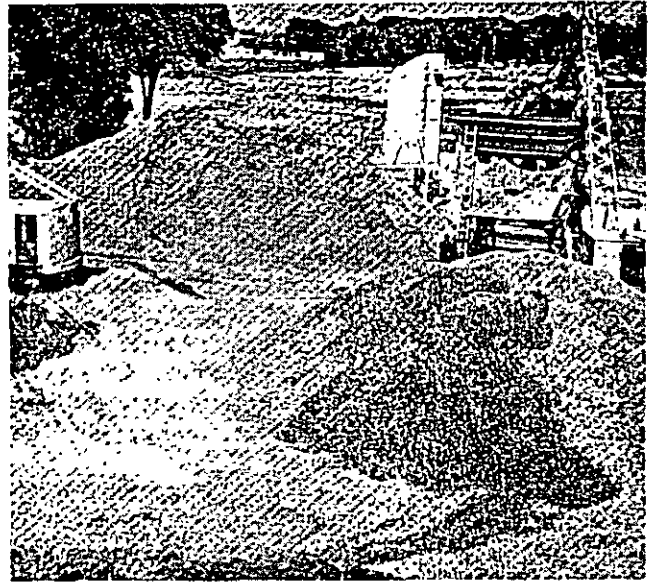


Figura 4-1. Montones de agregado fino y grueso en una planta de concreto premezclado, formados con cucharón de quijadas empleando el método de tirado y tendido.

El concreto reciclado, o concreto de desperdicio triturado, es una fuente factible de agregados y una realidad económica donde escaseen agregados de calidad. Se puede emplear equipo convencional de trituración, y actualmente se están desarrollando nuevos equipos para reducir el ruido y el polvo.

Los agregados deben cumplir ciertas reglas para darles un uso ingenieril óptimo: deben consistir en partículas durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, recubrimientos de arcilla y de otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento. Las partículas de agregado que sean desmenuzables o susceptibles de resquebrajarse son indeseables. Los agregados que contengan cantidades apreciables de esquisto o de otras rocas esquistosas, de materiales suaves y porosos, y ciertos tipos de horsteno deberán evitarse en especial, puesto que tienen baja resistencia al intemperismo y pueden ser causa de defectos en la superficie tales como erupciones.

La identificación de los constituyentes de un agregado, no puede proporcionar por sí sola fundamentos para predecir el comportamiento de los agregados durante su servicio. A menudo la inspección visual revelará debilidades en los agregados gruesos. Los registros de servicio son de gran utilidad para evaluar a los agregados. A falta de un registro de comportamiento, se deberán ensayar los agregados antes de ser utilizados en el concreto. Los agregados más comúnmente empleados, como arena, grava, piedra triturada y escoria de alto horno enfriada al aire, producen concreto fresco o recién mezclado de peso normal, pesando aproximadamente 2160 a 2560 kg/m<sup>3</sup>. Los agregados de esquisto, pizarra, arcilla, y escoria esponjados se utilizan para producir un concreto ligero estructural con un peso volumétrico fresco que varía aproximadamente de 1440 a 1920 kg/m<sup>3</sup>. Otros materiales ligeros, como: piedra pómez, escoria, perlita, vermiculita, y diatomita se usan para producir concretos ligeros aislantes que pesan de 240 a 1440 kg/m<sup>3</sup>. Para producir concreto muy denso y concreto de blindaje contra la radiación, se usan materiales pesados, como: la barita, limonita, magnetita, ilmenita, hematita, hierro y partículas de acero (Normas ASTM C 637 y C 638). En este capítulo solamente se tratan agregados de peso normal. Consulte el Capítulo 15 para tipos especiales de agregados y concretos.

Los agregados de peso normal deben cubrir los requisitos de la norma ASTM C 33. Esta especificación limita las cantidades permisibles de sustancias deletéreas e informa de los requisitos para las características de los agregados. No obstante, el hecho que los agregados satisfagan los requisitos de la norma ASTM C 33 no garantiza necesariamente un concreto libre de defectos. Tal cumplimiento se lleva a cabo por medio de alguna o varias de las diversas pruebas estandarizadas ASTM que se citan en las secciones y tablas subsecuentes.

Para alcanzar una consolidación adecuada del concreto, la cantidad deseable de aire, agua, cemento, y agregado fino (es decir, la fracción de mortero), es de aproximadamente 50 % a 65 % del volumen absoluto (45 % a 60 % en peso). El agregado redondeado, tal como la grava, demanda valores ligeramente inferiores, en tanto que los agregados triturados demandan valores ligeramente superiores. El contenido de agregado fino, varía normalmente de 35% a 45% en peso o en volumen sobre el contenido total de agregados.

## CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS

Las características de importancia en los agregados para concreto, se enlistan en la Tabla 4-2 y casi todas se tratan en esta sección.

### Granulometría

La granulometría es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado tal como se determina por análisis de tamices (norma ASTM C 136). El tamaño de partícula del agregado se determina por medio de tamices de malla de alambre con aberturas cuadradas. Los siete tamices estándar ASTM C 33 para agregado fino tienen aberturas que varían

Tabla 4-1. Componentes minerales y rocosos de los agregados.

Minerales	Rocas ígneas	Rocas metamórficas
Silice	Granito	Mármol
Cuarzo	Sienita	Metacuarcita
Opalo	Diorita	Pizarra
Calcedonia	Gabro	Filita
Tridimita	Peridotita	Esquisto
Cristobalita	Pegmatita	Anfibolita
Silicatos	Vidrio volcánico	Homfelsa
Feldespatos	Obsidiana	Gneis
Ferromagnesianos	Piedra pómez	Serpentinita
Homblenda	Tufa	
Piroxena	Cagafierro	
Arcilla	Perlita	
ilitas	Vidrio volcánico	
Caolines	Petrosílex	
Cloritas	Basalto	
Montmorillonitas		
Mica	<b>Rocas sedimentarias</b>	
Ceolita		
Carbonato		
Calca	Conglomerado	
Dolomita	Arenisca	
Sulfato	Cuarcita	
Yeso	Grauvaca	
Anhidrita	Subgrauvaca	
Sulfuro de hierro	Arcosa	
Pirita	Piedra arcillosa, piedra de aluvión, argilita, y arcilla esquistosa	
Marcasita	Carbonatos	
Pirrotita	Caliza	
Oxido de hierro	Dolomita	
Magnetita	Marga	
Hematita	Greda	
Goetita	Horsteno	
Ilmenita		
Limonita		

Para una breve descripción, consulte "Standard Descriptive Nomenclature of Constituents of Natural Mineral Aggregates" (ASTM C 294).

desde la malla No. 100 (150 micras) hasta 9.52 mm. Los trece tamices estándar para agregado grueso enlistados en la Tabla 4-3 tienen aberturas que varían desde 1.18 mm hasta 102 mm. En la norma ASTM E 11 se enlistan las tolerancias para los tamaños de las aberturas en las mallas.

Los números de tamaño (tamaños de granulometría), para el agregado grueso se aplican a las cantidades de agregado (en peso), en porcentajes que pasan a través de un arreglo de mallas (Figura 4-2). Para la construcción de vías terrestres, la norma ASTM D 448 enlista los trece números de tamaño de la ASTM C 33 (Tabla 4-3), más otros seis números de tamaño para agregado grueso. La arena o agregado fino solamente tiene un rango de tamaños de partícula.

La granulometría y los límites de granulometría, se expresan usualmente como el porcentaje de material que pasa cada malla. La Figura 4-3 muestra estos límites para agregados finos y para un tamaño de agregado grueso.

Existen varias razones por las que se especifican los límites de la granulometría y el tamaño máximo de agregado. La granulometría y el tamaño máximo de agregado afectan las proporciones relativas de los agregados así como los requisitos de agua y cemento, la trabajabilidad, capacidad de bombeo, economía, porosidad, contracción y durabilidad del concreto. Las variaciones en la granulometría pueden afectar seriamente a la uniformidad del concreto de una revoltura.



**Tabla 4-2. Propiedades y pruebas de agregados.**

Propiedad	Importancia	Designación de la prueba*	Requisito o características reportadas
Resistencia al desgaste y a la degradación	Índice de calidad del agregado; resistencia al desgaste de pisos y pavimentos	ASTM C 131 ASTM C 535 ASTM C 779	Porcentaje máximo de pérdida de peso. Profundidad de desgaste y tiempo
Resistencia a la congelación y deshielo	Descascaramiento de la superficie, aspereza, pérdida de sección, y deformación	ASTM C 666 ASTM C 682	Número máximo de ciclos o periodo de inmunidad a la congelación; factor de durabilidad
Resistencia a la desintegración por sulfatos	Sanidad contra la acción del intemperismo	ASTM C 88	Pérdida de peso, partículas exhibiendo fallas
Forma de la partícula y textura superficial	Trabajabilidad del concreto en estado fresco	ASTM C 295 ASTM C 3398	Porcentaje máximo de partículas planas y elongadas
Granulometría	Trabajabilidad del concreto en estado fresco, economía	ASTM C 117 ASTM C 136	Porcentaje máximo y mínimo que pasa las mallas especificadas
Peso volumétrico o densidad en masa	Cálculos para el diseño de mezclas; clasificación	ASTM C 29	Peso compacto y peso suelto
Peso específico	Cálculos para el diseño de mezclas	ASTM C 127 para agregado fino ASTM C 128 para agregado grueso	—
Absorción y humedad superficial	Control de la calidad del concreto	ASTM C 70 ASTM C 127 ASTM C 128 ASTM C 566	—
Resistencia a la compresión y a la flexión	Aceptación del agregado fino cuando otras pruebas fallan	ASTM C 39 ASTM C 78	Que la resistencia exceda el 95% de la resistencia lograda con arena purificada
Definiciones de los componentes	Aclarar el entendimiento y la comunicación	ASTM C 125 ASTM C 294	—
Componentes de los agregados	Determinar la cantidad de materiales orgánicos y deletéreos	ASTM C 40 ASTM C 87 ASTM C 117 ASTM C 123 ASTM C 142 ASTM C 295	Porcentaje máximo de los componentes individuales
Resistencia a la reactividad con los álcalis y al cambio volumétrico	Sanidad contra el cambio de volumen	ASTM C 227 ASTM C 289 ASTM C 295 ASTM C 342 ASTM C 586	Cambio longitudinal máximo, cantidad y componentes de sílice y alcalinidad

\* La mayoría de las pruebas y características enlistadas se mencionan en la norma ASTM C 33. La Referencia 4-22 presenta métodos de prueba adicionales así como las propiedades del concreto que se ven afectadas por las propiedades de los agregados.

**Tabla 4-3. Requisitos de granulometría para los agregados gruesos (ASTM C 33).**

Número de Tamaño	Tamaño nominal (mallas con aberturas cuadradas)	Cantidades menores que pasan cada malla de laboratorio (aberturas cuadradas), por ciento en peso												
		(100 mm) 4 pulg	(90 mm) 3.5 pulg	(75 mm) 3 pulg	(63 mm) 2.5 pulg	(50 mm) 2 pulg	(37.5 mm) 1.5 pulg	(25.0 mm) 1 pulg	(19.0 mm) 3/4 pulg	(12.5 mm) 1/2 pulg	(9.5 mm) 3/8 pulg	(4.75 mm) No. 4	(2.36 mm) No. 8	(1.18 mm) No. 16
1	90 a 37.5 mm	100	90 a 100	—	25 a 60	—	0 a 15	—	0 a 5	—	—	—	—	—
2	63 a 37.5 mm	—	—	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	—	0 a 5	—	—	—	—	—
3	50 a 25.0 mm	—	—	—	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	—	0 a 5	—	—	—	—
357	50 a 4.75 mm	—	—	—	100	95 a 100	—	35 a 70	—	10 a 30	—	0 a 5	—	—
4	37.5 a 19.0 mm	—	—	—	—	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	—	0 a 5	—	—	—
467	37.5 a 4.75 mm	—	—	—	—	100	95 a 100	—	35 a 70	—	10 a 30	0 a 5	—	—
5	25.0 a 12.5 mm	—	—	—	—	—	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	—	—	—
56	25.0 a 9.5 mm	—	—	—	—	—	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	—	—
57	25.0 a 4.75 mm	—	—	—	—	—	100	95 a 100	—	25 a 60	—	0 a 10	0 a 5	—
6	19.0 a 9.5 mm	—	—	—	—	—	—	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	—	—
67	19.0 a 4.75 mm	—	—	—	—	—	—	100	90 a 100	—	25 a 55	0 a 10	0 a 5	—
7	12.5 a 4.75 mm	—	—	—	—	—	—	—	100	90 a 100	—	40 a 70	0 a 15	0 a 5
8	9.5 a 2.36 mm	—	—	—	—	—	—	—	—	100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5



Figura 4-2. Elaboración de una granulometría de agregado grueso en el laboratorio.

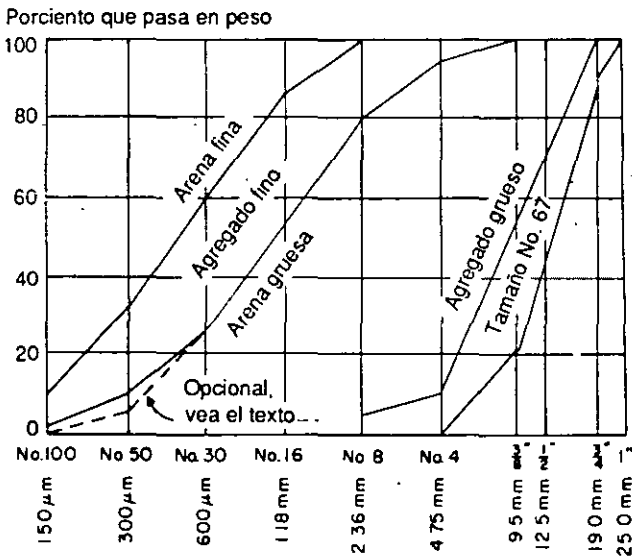


Figura 4-3. Las curvas indican los límites especificados en la norma ASTM C 33, para agregado fino y para un número de tamaño ( tamaño de granulometría ) de agregado grueso típico.

otra. Las arenas muy finas a menudo resultan antieconómicas; las arenas muy gruesas y el agregado grueso pueden producir mezclas rígidas, no trabajables. En general, aquellos agregados que no tienen una gran deficiencia o exceso de cualquier tamaño y tienen una curva granulométrica suave producirán los resultados más satisfactorios.

El efecto de un conjunto de tamaños para reducir el volumen total de vacíos entre agregados, se ilustra por el simple método mostrado en la Figura 4-4. El recipiente de la izquierda se llena con partículas grandes de agregado de tamaño y forma uniformes; el recipiente de enmedio se llena con igual volumen de partículas pequeñas de agregado de tamaño y forma uniformes. El recipiente de la derecha se llena con partículas de ambos tamaños. Bajo cada recipiente se encuentra una probeta graduada con la cantidad de agua requerida para llenar los vacíos en el recipiente. Note que cuando los recipientes han sido llenados con un tamaño de partícula de igual volumen, el contenido de vacíos es constante, sin importar el tamaño de la partícula. Cuando se combinan los dos tamaños de agregado, el contenido de vacíos disminuye. Si esta operación se repitiera con varios tamaños adicionales, ocurriría una reducción en los vacíos. La demanda de pasta de cemento en el concreto es propor-

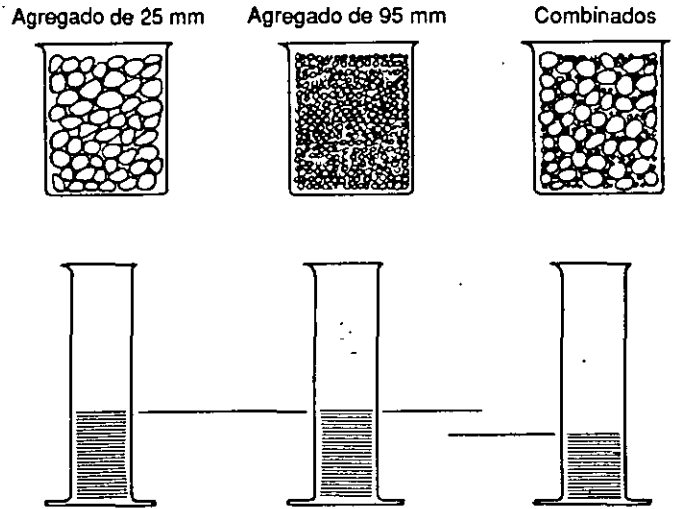


Figura 4-4. El nivel de líquido en las probetas, que representa a los vacíos, es constante para iguales volúmenes absolutos de agregados con tamaño uniforme aunque distinto. Cuando los distintos tamaños se combinan, la cantidad de vacíos disminuye. La ilustración no se presenta a escala.

cional al contenido de vacíos de los agregados combinados.

Durante los primeros años de tecnología del concreto, a veces se suponía que el porcentaje mínimo de vacíos (la máxima densidad de los agregados), era lo más adecuado para el concreto. Al mismo tiempo, se colocaban límites sobre la cantidad y el tamaño de las partículas más pequeñas. Actualmente se sabe que, aún siguiendo esta base, no se trata del mejor objetivo para el diseñador de mezclas. Sin embargo, la producción de un concreto satisfactorio y económico, requiere de agregados con un bajo contenido de vacíos, pero sin llegar al mínimo. Los vacíos en los agregados se pueden ensayar de acuerdo a la norma ASTM C 29.

En realidad, la cantidad necesaria de pasta de cemento es mayor que el volumen de vacíos que existe entre los agregados. Esto se ilustra en la Figura 4-5. El dibujo A representa solamente agregados grandes, con todas las partículas en contacto. El dibujo B representa la distribución de agregados en una matriz de pasta. La cantidad de pasta es necesariamente mayor que el contenido de vacíos de A para proporcionarle trabajabilidad al concreto, y la cantidad depende de la trabajabilidad y cohesividad de la pasta.

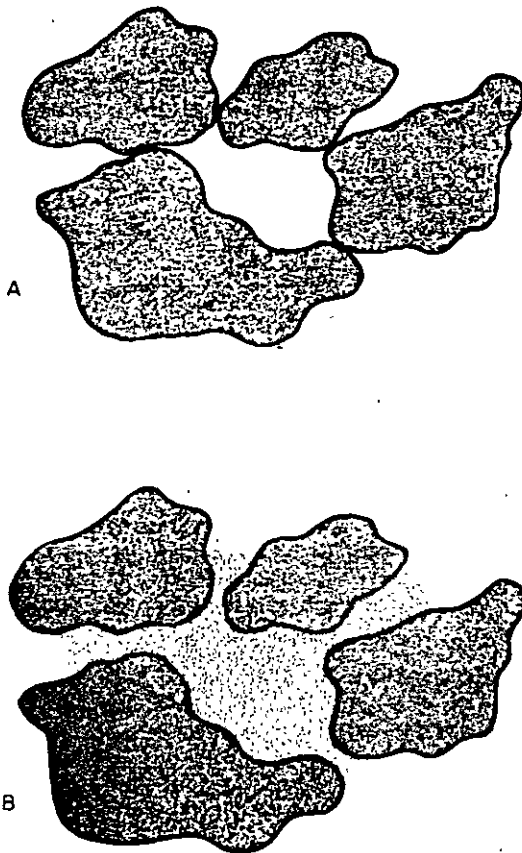


Figura 4-5. Ilustración de la dispersión de los agregados en mezclas cohesivas de concreto.

### Granulometría de los agregados finos

Los requisitos de la norma ASTM C 33, permiten un rango relativamente amplio en la granulometría del agregado fino, pero las especificaciones de otras organizaciones son a veces más limitantes. La granulometría más conveniente para el agregado fino, depende del tipo de trabajo, de la riqueza de la mezcla, y del tamaño máximo del agregado grueso. En mezclas más pobres, o cuando se emplean agregados gruesos de tamaño pequeño, la granulometría que más se aproxime al porcentaje máximo que pasa por cada criba resulta lo más conveniente para lograr una buena trabajabilidad. En general, si la relación agua-cemento se mantiene constante y la relación de agregado

fino a grueso se elige correctamente, se puede hacer uso de un amplio rango en la granulometría sin tener un efecto apreciable en la resistencia. En ocasiones se obtendrá una economía máxima, ajustando la mezcla del concreto para que encaje con la granulometría de los agregados locales. Entre más uniforme sea la granulometría, mayor será la economía.

La granulometría del agregado fino dentro de los límites de la norma ASTM C 33, generalmente es satisfactoria para la mayoría de los concretos. Los límites de la norma ASTM C 33 con respecto al tamaño de las cribas se indican a continuación:

Tamaño de la malla	Porcentaje que pasa en peso
9.52 mm (3/8")	100
4.75 mm (No. 4)	95 a 100
2.36 mm (No. 8)	80 a 100
1.18 mm (No. 16)	50 a 85
0.60 mm (No. 30)	25 a 60
0.30 mm (No. 50)	10 a 30
0.15 mm (No. 100)	2 a 10

Estas especificaciones permiten que los porcentajes mínimos (en peso) del material que pasa las mallas de 0.30 mm (No. 50) y de 0.15 mm (No. 100) sean reducidos a 5% y 0%, respectivamente, siempre y cuando:

1. El agregado se emplee en un concreto con aire incluido que contenga más de 237 kg de cemento por metro cúbico y tenga un contenido de aire superior al 3%.
2. El agregado se emplee en un concreto que contenga más de 296 kg de cemento por metro cúbico cuando el concreto no tenga inclusión de aire.
3. Se use un aditivo mineral aprobado para compensar la deficiencia del material que pase estas dos mallas.

Otros requisitos de la norma ASTM son:

1. Que el agregado fino no tenga más del 45 % retenido entre dos mallas consecutivas.
2. Que el módulo de finura no sea inferior a 2.3 ni superior a 3.1, ni que varíe en más de 0.2 del valor típico de la fuente de abastecimiento del agregado. En el caso que se sobrepase este valor, el agregado fino se deberá rechazar a menos que se hagan los ajustes adecuados en las proporciones del agregado fino y grueso.

Las cantidades de agregado fino que pasan las mallas de 0.30 mm (No. 50) y de 0.15 mm (No. 100), afectan la trabajabilidad, la textura superficial, y el sangrado del concreto. La mayoría de las especificaciones permiten que del 10% al 30% pase por la malla de 0.30 mm (No. 50). El límite inferior puede bastar en condiciones de colado fáciles o cuando el concreto tiene un acabado mecánico, como ocurre en el caso de los pavimentos. Sin embargo, en los pisos de concreto acabados a mano o donde se requiera una textura superficial tersa, se deberá usar un agregado fino que contenga al menos un 15% que pase la malla de 0.30 mm (No.50) y al menos un 3% que pase la malla de 0.15 mm (No. 100).

El módulo de finura (FM) del agregado grueso o del agregado fino se obtiene, conforme a la norma ASTM C 125,

sumando los porcentajes acumulados en peso de los agregados retenidos en una serie especificada de mallas y dividiendo la suma entre 100. Las mallas que se emplean para determinar el módulo de finura son la de 0.15 mm (No. 100), 0.30 mm (No. 50), 0.60 mm (No. 30), 1.18 mm (No. 16), 2.36 mm (No. 8), 4.75 mm (No. 4), 9.52 mm (3/8"), 19.05 mm (3/4"), 38.10 mm (1 1/2"), 76.20 mm (3"), y 152.40 mm (6"). El módulo de finura es un índice de la finura del agregado - entre mayor sea el módulo de finura, más grueso será el agregado. Diferentes granulometrías de agregados pueden tener igual módulo de finura. El módulo de finura del agregado fino es útil para estimar las proporciones de los agregados finos y gruesos en las mezclas de concreto. A continuación se presenta un ejemplo de la determinación del módulo de finura de un agregado fino con un análisis de mallas supuesto:

Tamaño de la malla	Porcentaje de la fracción individual retenida, en peso*	Porcentaje acumulado que pasa, en peso	Porcentaje acumulado retenido, en peso
9.52 mm (3/8")	0	100	0
4.75 mm (No. 4)	2	98	2
2.36 mm (No. 8)	13	85	15
1.18 mm (No. 16)	20	65	35
0.60 mm (No. 30)	20	45	55
0.30 mm (No. 50)	24	21	79
0.15 mm (No. 100)	18	3	97
Charola	3	0	—
Total	100		283
			Módulo de finura = $283 \div 100 = 2.83$

## Granulometría de los agregados gruesos

Los requisitos de la norma ASTM C 33 para granulometría de agregados gruesos (vea la Tabla 4-3) permiten un amplio rango de granulometrías y una diversidad de tamaños de granulometría. La granulometría para un agregado grueso con un tamaño máximo puede variar dentro de un rango moderado, sin que se produzca un efecto apreciable en la demanda de cemento y agua si la proporción de agregado fino a agregado total produce un concreto de buena trabajabilidad. Para producir un concreto trabajable se deberán cambiar las proporciones de la mezcla si ocurren fuertes variaciones en la granulometría del agregado grueso. Como estas variaciones son difíciles de anticipar, a menudo es más económico mantener uniformes el manejo y la manufactura del agregado grueso, de modo que se reduzcan las variaciones en la granulometría.

El tamaño máximo del agregado grueso que se utiliza en el concreto tiene su fundamento en la economía. Comúnmente se necesita más agua y cemento para agregados de tamaño pequeño que para tamaños mayores. En la Fig. 4-6 se muestra el agua y cemento necesarios, para un revenimien-

\* Porcentaje de material retenido entre mallas consecutivas. Por ejemplo, el 13 % de la muestra es retenido entre las mallas de 4.75 mm (No. 4) y de 2.36 mm (No. 8).

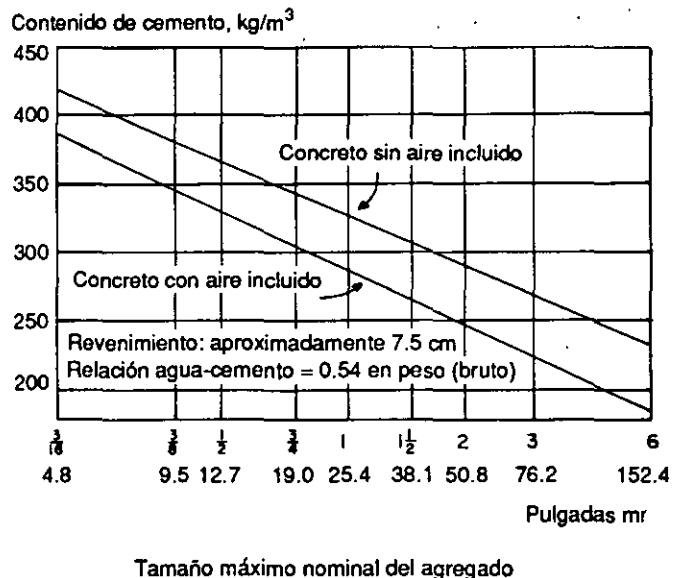
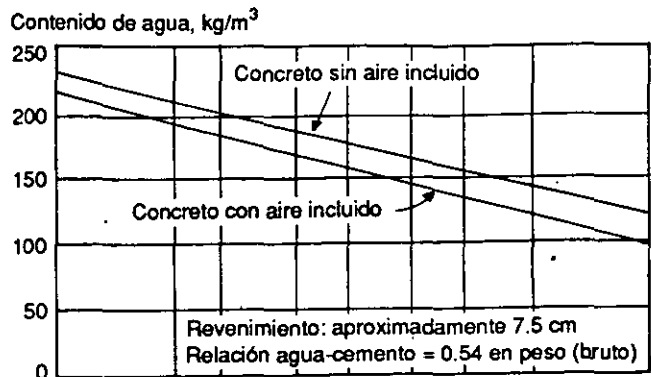


Figura 4-6. Contenidos de agua y de cemento en relación con el tamaño máximo de los agregados, para concreto con aire incluido y concreto sin aire incluido. En las mezclas que tienen agregado grueso grande se requiere de menos cemento y agua. Referencia 4-16.

to de aproximadamente 7.5 cm para un amplio rango de tamaños de agregado grueso. La figura muestra que, para una relación agua-cemento dada, la cantidad necesaria de cemento disminuye a medida que aumenta el tamaño máximo de agregado grueso. El costo superior para obtener o manejar agregados mayores que 50 mm, puede compensar el ahorro al utilizar menos cemento. Además de esto, los agregados de tamaños máximos distintos, pueden proporcionar resistencias de concreto ligeramente distintas para la misma relación agua-cemento. En ciertos casos, con la misma relación agua-cemento, el concreto con el menor tamaño máximo de agregado tiene una mayor resistencia a la compresión. Esto es especialmente cierto en el concreto de alta resistencia. El tamaño máximo óptimo de agregado grueso para rangos de altas resistencias depende de la resistencia relativa de la pasta de cemento, de la adherencia agregado-cemento, y de la resistencia de las partículas del agregado (vea "Concreto de Alta Resistencia" en el Capítulo 15).

La terminología empleada para especificar el tamaño de agregado grueso, se debe escoger adecuadamente. Tal como

se señaló, el tamaño de la partícula se determina por el tamaño de malla y se aplica al agregado que pasa esa malla y que no pasa la siguiente malla inferior. Cuando se habla de una clasificación de tamaños de partícula, se usa el *número de tamaño* de la granulometría (o tamaño de granulometría). El número de tamaño se aplica a la cantidad colectiva de agregado que pasa a través de un arreglo de mallas (Fig. 4-2). Como se muestra en la Fig. 4-3 y en la Tabla 4-3, la cantidad de agregado que pasa las mallas respectivas está en por ciento y también se denomina análisis de mallas.

Debido a la costumbre, a veces hay confusión sobre lo que se quiere decir con el tamaño máximo del agregado. La norma ASTM C 125 y el ACI 116 definen a este término y lo diferencian del tamaño máximo nominal del agregado. El tamaño máximo de un agregado, es el menor tamaño de malla por el cual *todo* el agregado debe pasar. El tamaño máximo nominal de un agregado, es el menor tamaño de malla por el cual debe pasar la mayor parte del agregado. La malla de tamaño máximo nominal, puede retener de 5% a 15% del agregado dependiendo del número de tamaño. Por ejemplo, el agregado de número de tamaño 67 tiene un tamaño máximo de 25 mm y un tamaño máximo nominal de 19 mm. De noventa a cien por ciento de este agregado debe pasar la malla de 19 mm y todas sus partículas deberán pasar la malla de 25 mm.

El tamaño máximo del agregado que puede ser empleado depende generalmente del tamaño y forma del elemento de concreto y de la cantidad y distribución del acero de refuerzo. Por lo común el tamaño máximo de las partículas de agregado no debe sobrepasar:

1. Un quinto de la dimensión más pequeña del miembro de concreto
2. Tres cuartos del espaciamiento libre entre barras de refuerzo
3. Un tercio del peralte de las losas

Estos requisitos se pueden rebasar si, en opinión del ingeniero, la mezcla tiene la trabajabilidad suficiente para colocar el concreto sin que se formen alveolados ni vacíos.

## Agregados con granulometría discontinua

En los agregados con granulometría discontinua se han omitido ciertos tamaños de partícula. Para concreto moldeado en el lugar, los agregados con granulometría discontinua típicos consisten en sólo un tamaño de agregado grueso siendo todas las partículas de agregado fino capaces de pasar a través de los vacíos en el agregado grueso compactado. Las mezclas con granulometría discontinua se utilizan para obtener texturas uniformes en concretos con agregados expuestos. También se emplean en concretos estructurales normales, debido a las posibles mejoras en densidad, permeabilidad, contracción, fluencia, resistencia, consolidación, y para permitir el uso de granulometrías de agregados locales.\*

Para un agregado de 19.0 mm de tamaño máximo, se pueden omitir las partículas de 4.75 mm a 9.52 mm sin hacer al concreto excesivamente áspero o propenso a segregarse. En el caso del agregado de 38.1 mm, normalmente se omiten los tamaños de 4.75 mm a 19.0 mm.

Se debe tener precaución, al elegir el porcentaje de agregado fino en una mezcla con granulometría discontinua. Una elección incorrecta, puede resultar en un concreto susceptible de producir segregación o alveolado debido a un exceso de agregado grueso o en un concreto con baja densidad y alta demanda de agua provocada por un exceso de agregado fino. Normalmente el agregado fino ocupa del 25% al 35% del volumen del agregado total. El porcentaje inferior se emplea con agregados redondeados y el superior con material triturado. Para un acabado terso al retirar la cimbra, se puede usar un porcentaje de agregado fino respecto del agregado total ligeramente mayor que para un acabado con agregado expuesto, pero ambos utilizan un menor contenido de agregado fino que las mezclas con granulometría continua. El contenido de agregado fino depende del contenido de cemento, del tipo de agregado, y de la trabajabilidad.

Para mantener la trabajabilidad normalmente se requiere de inclusión de aire puesto que las mezclas con granulometría discontinua de revenimiento bajo hacen uso de un bajo porcentaje de agregado fino y a falta de aire incluido producen mezclas ásperas.

Se debe evitar la segregación de las mezclas con granulometría discontinua, restringiendo el revenimiento al valor mínimo acorde a una buena consolidación. Este puede variar de cero a 7.5 cm dependiendo del espesor de la sección, de la cantidad de refuerzo, y de la altura de colado. También es necesario un estrecho control de la granulometría y del contenido de agua porque las variaciones pueden ser causa de segregación. Si se requiere una mezcla áspera, los agregados con granulometría discontinua podrían producir mayores resistencias que los agregados normales empleados con contenidos de cemento similares. Debido a sus bajos volúmenes de agregado fino y a sus bajas relaciones agua-cemento, las mezclas con granulometría discontinua, se pueden considerar como no trabajables para la construcción con elementos moldeados en el lugar. Sin embargo, cuando han sido proporcionados adecuadamente, estos concretos se consolidan fácilmente por vibración.

## Forma de partícula y textura superficial

La forma de partícula y la textura superficial de un agregado influyen más en las propiedades del concreto fresco, que en las propiedades del concreto endurecido. Para producir un concreto trabajable, las partículas elongadas, angulares, de textura rugosa necesitan más agua que los agregados compactos, redondeados y lisos. En consecuencia, las partículas de agregado que son angulares, necesitan un mayor contenido de cemento para mantener la misma relación agua-cemento. Sin embargo, con una granulometría satisfactoria, los agregados triturados y no triturados (de los mismos tipos de roca) generalmente dan la misma resistencia para el mismo factor de cemento.\*\* Los agregados pobremente graduados o angulares pueden ser también más difíciles de bombear.

La adherencia entre la pasta de cemento y un agregado generalmente aumenta a medida que las partículas cambian

\* Referencias 4-4 y 4-6.

\*\* Vea también "Concreto de alta resistencia", Capítulo 15.

de lisas y redondeadas a rugosas y angulares. Este incremento en adherencia se debe considerar al seleccionar agregados para concreto en que sea importante la resistencia a la flexión o donde sea necesaria una alta resistencia a la compresión.

Los contenidos de vacíos del agregado compactado fino o grueso, se pueden usar como un índice de las diferencias en la forma y textura de agregados con igual granulometría. La demanda de agua de mezclado y de mortero tiende a aumentar a medida que aumenta el contenido de vacíos del agregado. Los vacíos entre las partículas de agregado se incrementan con la angularidad del agregado. Consulte la sección "Peso unitario y vacíos" en este capítulo.

El agregado debe estar relativamente libre de partículas planas y elongadas. Las partículas planas y elongadas se deben evitar o al menos limitar a aproximadamente un 15 % del peso total del agregado. Este requisito es igualmente importante para agregado grueso y para agregado fino triturado, porque el agregado fino producido triturando piedra contiene a menudo partículas planas y elongadas. Tales partículas de agregado hacen necesario un incremento en el agua de mezclado, pudiendo afectar de esta forma la resistencia del concreto, particularmente a la flexión, si no se ha conservado la relación agua-cemento.

## Peso volumétrico y vacíos

El peso volumétrico (también llamado peso unitario o densidad en masa) de un agregado, es el peso del agregado que se requiere para llenar un recipiente con un volumen unitario especificado. El volumen al que se hace referencia, es ocupado por los agregados y los vacíos entre las partículas de agregado. El peso volumétrico aproximado de un agregado usado en un concreto de peso normal, varía desde aproximadamente  $1,200 \text{ kg/m}^3$  a  $1,760 \text{ kg/m}^3$ . El contenido de vacíos entre partículas afecta la demanda de mortero en el diseño de la mezcla (Vea la sección precedente, "Forma de partícula y textura superficial" y "Granulometría"). Los contenidos de vacíos varían desde aproximadamente 30% a 45% para los agregados gruesos hasta 40% a 50% para el agregado fino. La angularidad aumenta el contenido de vacíos; mayores tamaños de agregado bien graduado y una granulometría mejorada hacen disminuir el contenido de vacíos, (Figura 4-4). Los métodos para determinar el peso volumétrico de los agregados y el contenido de vacíos, se dan en la norma ASTM C 29. Se describen tres métodos para consolidar el agregado en el recipiente, dependiendo del tamaño máximo de agregado: varillado, sacudido y vaciado con pala.

## Peso específico

El peso específico (densidad relativa) de un agregado es la relación de su peso respecto al peso de un volumen absoluto igual de agua (agua desplazada por inmersión). Se usa en ciertos cálculos para proporcionamiento de mezclas y control, por ejemplo en la determinación del volumen absoluto ocupado por el agregado. Generalmente no se le emplea como índice de calidad del agregado, aunque ciertos agregados porosos que exhiben deterioro acelerado a la congelación-deshielo tengan pesos específicos bajos. La mayoría de los agregados naturales tienen densidades relativas entre 2.4 y 2.9.\*

Los métodos de prueba para determinar los pesos específicos para los agregados gruesos y finos se describen en las normas ASTM C 127 y C 128 respectivamente. El peso específico de un agregado se puede determinar considerando que ha sido secado al horno totalmente o que se encuentra saturado y superficialmente seco (SSS). Ambos pesos específicos se pueden utilizar en los cálculos para el proporcionamiento de mezclas de concreto. Los agregados secados en el horno, no contienen ninguna cantidad de agua libre o absorbida. Se les seca en un horno hasta obtener peso constante. Los agregados saturados y superficialmente secos son agregados en los cuales los poros en el interior de cada partícula de agregado han quedado llenos con agua y no contienen agua en exceso en la superficie de la partícula.

## Absorción y humedad superficial

La absorción y humedad superficial de los agregados se debe determinar de acuerdo con las normas ASTM C 70, C 127, C 128 y C 566 de manera que se pueda controlar el contenido neto de agua en el concreto y se puedan determinar los pesos correctos de cada mezcla. La estructura interna de una partícula de agregado, está constituida de materia sólida y de vacíos que pueden o no contener agua.

Las condiciones de humedad de los agregados se muestran en la Figura 4-7. Se designan como:

1. Secado al horno - completamente absorbentes
2. Secados al aire - secos en la superficie de la partícula pero conteniendo cierta humedad interior, siendo por lo tanto algo absorbentes
3. Saturados y superficialmente secos (SSS) - no absorben ni ceden agua a la mezcla de concreto
4. Húmedos - contienen un exceso de humedad en la superficie (agua libre)

La cantidad de agua utilizada en la mezcla de concreto, se debe ajustar a las condiciones de humedad de los agregados de manera que cubra los requerimientos de agua. Si el con-

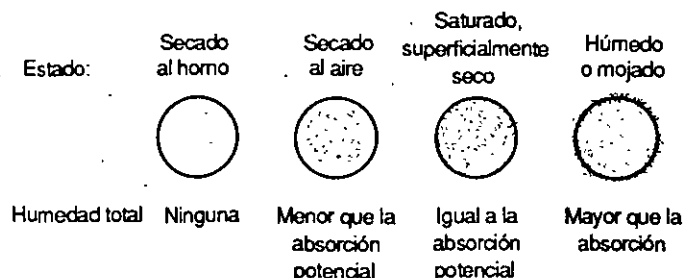


Figura 4-7. Condiciones de humedad de los agregados.

\* La densidad del agregado usada en los cálculos de proporcionamiento de mezclas (sin incluirlos vacíos entre las partículas) se determina multiplicando el peso específico por la densidad del agua. El valor de la densidad del agua normalmente empleado es de  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

tenido de agua de la mezcla de concreto no se mantiene constante, la resistencia a la compresión, la trabajabilidad y otras propiedades variarán de una revoltura a otra. El agregado grueso y fino generalmente tienen niveles de absorción ( contenidos de humedad en estado SSS ) dentro de los rangos de 0.2 % a 4 % y 0.2 % a 2 % respectivamente. Los contenidos de agua libre, normalmente varían desde 0.5 % hasta 2 % para el agregado grueso y desde 2 % hasta 6 % para el agregado fino. El contenido máximo de agua de un agregado grueso drenado, usualmente es menor que el de un agregado fino. La mayoría de los agregados finos pueden mantener un contenido de humedad drenado máximo, aproximadamente de 3 % a 8 %, mientras que los agregados gruesos solo pueden mantener aproximadamente de 1 % a 6 %.

El abudamiento, es el aumento del volumen total de agregado fino húmedo respecto al mismo peso seco. La tensión superficial en la humedad mantiene separadas las partículas, provocando un aumento de volumen. El abudamiento de los agregados finos, ocurre cuando se traspalean o se mueven de cualquier otra forma en condición húmeda, aunque antes hayan sido consolidados totalmente. La Figura 4-8 ilustra como varía la magnitud del abudamiento de los agregados finos según el contenido de humedad y la granulometría; las granulometrías finas abundan más que las granulometrías gruesas para una cantidad dada de humedad. La Figura 4-9 muestra información similar en términos del peso para un agregado fino en particular. Puesto que la mayoría de los agregados finos se entregan en condición húmeda, pueden ocurrir grandes variaciones en las cantidades

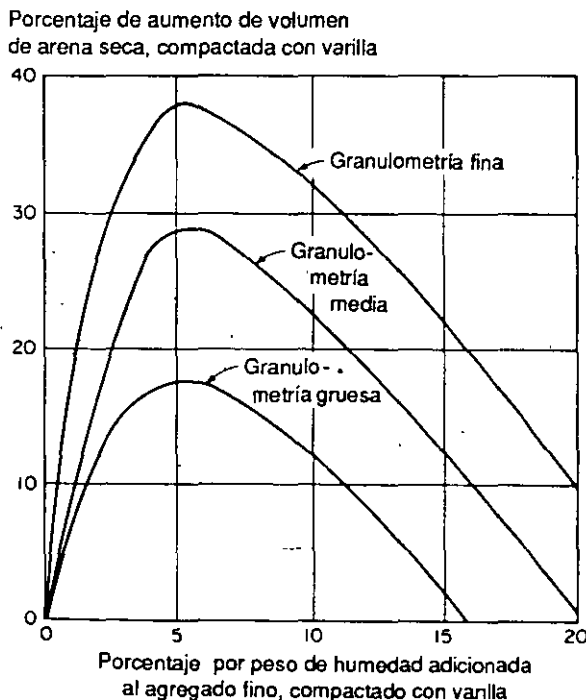


Figura 4-8. La humedad superficial en el agregado fino produce un abudamiento considerable, cuya magnitud varía con la magnitud de la humedad y con la granulometría del agregado. Referencia: PCA Major Series 172 y PCA ST20.

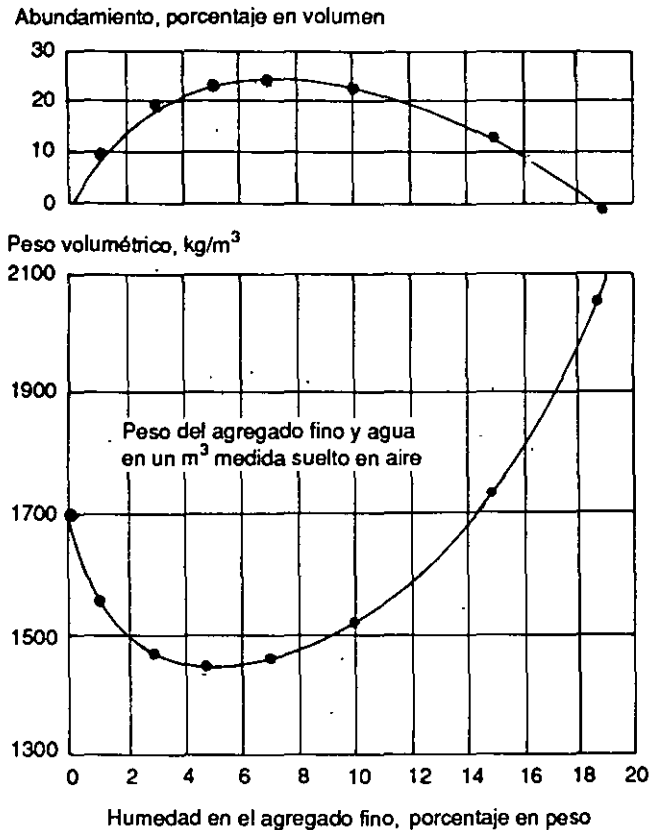


Figura 4-9. Comparación del peso volumétrico suelto y del aumento de volumen, contra el contenido de humedad para una arena en particular. Referencia: PCA Major Series 172.

para las mezclas si se hace la dosificación de acuerdo con el volumen. Por esta razón la buena práctica ha favorecido con mucho que el agregado sea pesado y se le ajuste por contenido de humedad cuando se dosifica un concreto.

### Resistencia a congelación y deshielo

La resistencia de un agregado a la congelación y deshielo, característica importante de un concreto para exteriores, está relacionada con su porosidad, absorción, permeabilidad, y estructura de poro. Una partícula de agregado puede absorber tanta agua (hasta su saturación crítica) que no pueda acomodar la expansión y la presión hidráulica que ocurre durante el congelamiento del agua. Como resultado se tiene la expansión misma del agregado y la posible desintegración del concreto, si han sido afectadas suficientes partículas. Si una partícula problema se encuentra cerca de la superficie del concreto puede causar una erupción. Por lo general, las erupciones aparecen como fragmentos cónicos que se desprenden de la superficie del concreto. La partícula de agregado afectada usualmente se encuentra en la parte inferior del hueco. Generalmente son las partículas de agregado grueso más que las del agregado fino, las que presentan mayores valores de porosidad y poros de tamaño medio ( de 0.1 a 5 micras ) y las que se saturan con mayor facilidad provocando deterioros en el concreto y erupciones. Normalmente los poros más grandes

no se saturan ni son causa de fallas en el concreto, y el agua en poros muy finos no se congela tan fácilmente.

A cualquier velocidad de congelación, puede existir un tamaño crítico de partícula arriba del cual la partícula fallará si se congela cuando se encuentre totalmente saturada. Este tamaño crítico depende de la velocidad de congelación y de la porosidad, permeabilidad, y resistencia a la tensión de la partícula. Para agregados de grano fino con baja permeabilidad (por ejemplo horsteno), el tamaño de partícula crítico puede encontrarse dentro del rango de tamaños de agregado normales. Es mayor en materiales de grano grueso o en aquellos con sistemas de capilaridad interrumpidos por un gran número de macroporos (vacíos demasiado grandes para conservar su humedad por acción capilar). Para estos agregados, el tamaño crítico de partícula puede ser suficientemente grande para no ser de consecuencias aunque la absorción sea alta. Si se utilizan agregados potencialmente vulnerables en un concreto que esté sujeto a secado periódico mientras se encuentra en servicio, tal vez nunca lleguen a estar lo suficientemente saturados como para provocar fallas.

El agrietamiento en D, es un deterioro por congelación-deshielo de los pavimentos de concreto que se ha observado en algunos pavimentos luego de tres o más años de servicio. Las grietas D son formaciones de grietas estrechamente espaciadas y paralelas a las juntas transversales y longitudinales, que se multiplican posteriormente hacia afuera desde las juntas hacia el centro del tablero de pavimento (Figura 4-10). El agrietamiento D es función de las propiedades de poro de ciertos tipos de partículas de agregados y del medio ambiente en el cual se ha colocado el pavimento. Debido a la acumulación natural de agua bajo los pavimentos en las estructuras de base y sub-base, el agregado llega eventualmente a quedar saturado. Luego con los ciclos de congelación y deshielo, el agrietamiento del concreto comienza en el agregado saturado (Figura 4-11) en la parte

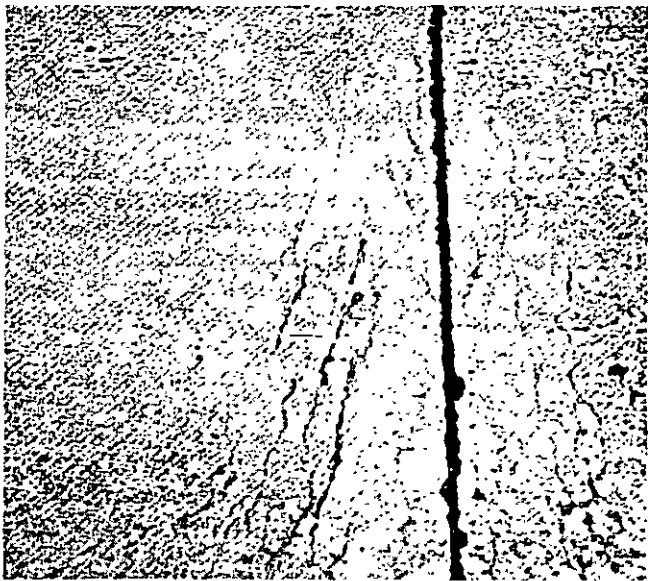


Figura 4-10. Agrietamiento severo en D a lo largo de una junta transversal, provocado por la falla del agregado grueso carbonatado. Referencia 4-11.

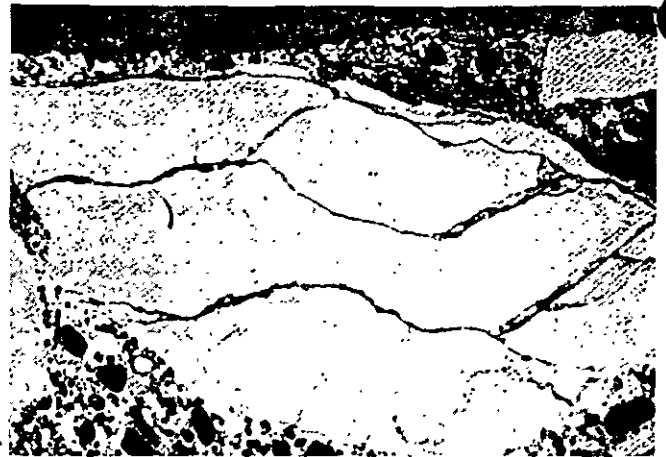


Figura 4-11. Partícula fracturada de agregado carbonatado como fuente de falla en el agrietamiento en D (aumento 2.5 X). Referencia 4-11.

inferior de la losa, continuando progresivamente hacia arriba hasta alcanzar la superficie de desgaste. Este problema se puede reducir ya sea eligiendo agregados que tengan mejor comportamiento en ciclos de congelación-deshielo o, en caso que se tengan que usar agregados marginales, reduciendo el tamaño máximo de partícula. La instalación de un drenaje efectivo para conducir el agua libre desde la sub-base del pavimento puede ser también de utilidad.

El comportamiento de los agregados expuestos a congelación y deshielo se puede evaluar de dos maneras: por su anterior comportamiento en el campo y por ensayos de congelación-deshielo de especímenes de concreto en el laboratorio. Si los agregados de la misma fuente han proporcionado previamente un servicio satisfactorio al ser usados en concretos, se deben considerar adecuados. Los agregados de los que no se cuente con un registro de servicio, se pueden considerar aceptables, si desarrollan un comportamiento satisfactorio en concretos con aire incluido sujetos a pruebas de congelación-deshielo. En las pruebas de congelación-deshielo de la norma ASTM C 666, los especímenes de concreto fabricados con el agregado en cuestión, se sujetan a ciclos alternos de congelación y deshielo en agua. El deterioro se mide por (1) la reducción en el módulo dinámico de elasticidad (2) la expansión lineal, y (3) la pérdida de peso de los especímenes. Algunos departamentos estatales de carreteras en los E.E.U.U., utilizan un criterio de falla por expansión de 0.035% en 350 ó menos ciclos de congelación-deshielo, para ayudar a indicar si un agregado es o no susceptible al agrietamiento-D. Los distintos tipos de agregado pueden cambiar los niveles de criterio y las correlaciones empíricas entre pruebas de congelación-deshielo. Se deberán llevar registros de servicio para contar con un criterio adecuado.

Las especificaciones pueden exigir que se demuestre la resistencia al intemperismo, por medio de una prueba de sulfato de sodio o de sulfato de magnesio (norma ASTM C 88). La prueba consiste en aplicar a una muestra de agregado un cierto número de ciclos de inmersión en una solución de



sulfato (para crear una presión a través del crecimiento de cristales de sal en los poros del agregado similar a la producida por el agua en congelación). Entonces la muestra se seca al horno y se calcula el porcentaje de la pérdida de peso. Desafortunadamente en ciertas ocasiones esta prueba es engañosa. Los agregados que tienen un comportamiento adecuado durante la prueba, podrían llegar a producir un concreto de baja resistencia a congelación-deshielo; contrariamente, los agregados que exhiban resultados pobres durante la prueba podrían producir un concreto de resistencia adecuada. Esto se atribuye, al menos en parte, al hecho de que los agregados no están confinados por la pasta de cemento durante la prueba (como ocurriría en el concreto) y a que los mecanismos de ataque no son los mismos que en la congelación y el deshielo. El ensaye es más confiable para rocas estratificadas con capas porosas o planos de estratificación débiles.

### Propiedades de humedecimiento y secado

El intemperismo originado por el humedecimiento y secado también puede afectar a la durabilidad de los agregados. Los coeficientes de expansión y de contracción de las rocas varían con la temperatura y el contenido de humedad. En algunos agregados se producen deformaciones severas si ocurren humedecimientos y secados alternos, y con ciertos tipos de roca esto puede provocar un incremento permanente en el volumen del concreto así como una eventual falla. Los terrones de arcilla y otras partículas desmenuzables se pueden desintegrar rápidamente si ocurren ciclos repetidos de humedecimiento y secado. También se pueden presentar erupciones debido a las características de hinchamiento con la humedad en ciertos agregados, especialmente en cantos arcillosos y arcillas esquistosas. Mientras no se disponga de pruebas específicas para determinar esta tendencia, a menudo un petrógrafo experimentado puede proporcionar gran ayuda para determinar este potencial a la falla.

### Resistencia al desgaste y al derrapamiento

La resistencia al desgaste de un agregado a menudo se emplea como un índice general de su calidad. La resistencia al desgaste es esencial cuando el agregado se emplea para producir concretos sujetos a abrasión, como ocurre en los pisos para servicio pesado o en los pavimentos. Una resistencia baja al desgaste en el agregado puede incrementar la cantidad de finos en el concreto durante el mezclado y consecuentemente elevar la demanda de agua.

La prueba más común para determinar la resistencia al desgaste, es la prueba de Los Angeles ( método del tambor giratorio ), desarrollada de acuerdo con la norma ASTM C 131 ó C 535. En esta prueba, se coloca una cantidad de agregado especificada dentro de un tambor de acero que contiene bolas de acero, se pone a rotar el tambor, y se mide el porcentaje de material desgastado. Las especificaciones fijan a menudo un límite superior para esta pérdida de peso. Sin embargo, la comparación de resultados de pruebas de desgaste de agregados con la resistencia al desgaste del concreto hecho con el mismo agregado generalmente no muestra una correlación clara. La pérdida de peso debida al

impacto a menudo es tanta como la debida al desgaste. La resistencia al desgaste de un concreto, se determina con mayor exactitud por medio de pruebas de abrasión en el mismo concreto (Ver Capítulo 1).

Para suministrar una buena resistencia al derrapamiento en los pavimentos, el contenido de partículas silíceas del agregado fino deberá ser de al menos el 25 %. Para propósitos de especificación, el contenido de partículas silíceas se considera igual al contenido de residuo insoluble después de un tratamiento en ácido clorhídrico bajo condiciones normalizadas ( norma ASTM D 3042 ). Algunas arenas manufacturadas producen superficies de pavimentos resbalosas y se deben investigar para aceptarlas antes de ser utilizadas.

### Resistencia y contracción

La resistencia de un agregado se prueba en raras ocasiones y generalmente no influye tanto en la resistencia de un concreto de resistencia normal como la resistencia de la pasta y la adherencia pasta-agregado. Sin embargo, la resistencia del agregado, adquiere gran importancia en los concretos de resistencias elevadas. Las resistencias a la tensión de los agregados varían desde 20 kg/cm<sup>2</sup> hasta 160 kg/cm<sup>2</sup> y las resistencias a compresión varían desde 700 kg/cm<sup>2</sup> hasta 2810 kg/cm<sup>2</sup>.\*

Los distintos tipos de agregado tienen diferentes compresibilidades, módulos de elasticidad, y características de contracción, relacionadas con la humedad que pueden influir como características del concreto. Los agregados con características de absorción elevada pueden tener características de contracción elevada al secarse. Los agregados de cuarzo y feldespato junto con las calizas, las dolomitas y los granitos se consideran agregados de contracción baja; los agregados como arenisca, esquisto, pizarra, hornblenda, y grauvaca se asocian a menudo con contracciones elevadas por secado en el concreto.\*

### Resistencia a los ácidos y a otras sustancias corrosivas

El concreto de cemento portland es durable en la mayoría de los ambientes naturales; sin embargo, durante su servicio, en ocasiones el concreto queda expuesto a sustancias que lo atacan.

La mayoría de soluciones acídicas, desintegran rápida o lentamente al concreto de cemento portland dependiendo del tipo y de la concentración del ácido. Algunos ácidos, tales como el ácido oxálico son inofensivos. Las soluciones débiles de algunos ácidos tienen efectos insignificantes. A pesar de que los ácidos generalmente atacan y lixivian a los compuestos de calcio de la pasta de cemento, no atacan fácilmente a ciertos agregados, tales como los agregados silíceos. Los agregados calcáreos a menudo reaccionan fácilmente con los ácidos. Sin embargo, comparándolo con los agregados silíceos, el efecto de sacrificio de los agregados calcáreos, resulta ser a menudo benéfico en exposiciones a ácidos suaves o en áreas donde no fluye agua. Con el agregado calcáreo el

\* Referencia 4-22.

ácido ataca uniformemente a toda la superficie expuesta de concreto, reduciendo la velocidad de ataque a la pasta y evitando la pérdida de partículas de agregado en la superficie. Los agregados calcáreos también tienden a neutralizar a los ácidos, especialmente en los sitios estancados. Los ácidos también pueden decolorar al concreto. Se debe evitar usar agregado silicoso cuando se encuentren presentes soluciones fuertes de hidróxido de sodio, pues atacan a este tipo de agregado.

La lluvia ácida (frecuentemente con un PH de 4 a 4.5), puede marcar levemente las superficies de concreto, normalmente, sin afectar el desempeño de las superficies expuestas de concreto. Condiciones extremas de lluvia ácida o de aguas con concentraciones fuertes de ácidos, pueden justificar precauciones o diseños de concretos especiales, principalmente en las áreas sumergidas. El aprovisionamiento continuo de ácidos con un PH menor que 4, se considera fuertemente agresivo al concreto enterrado, como por ejemplo las tuberías.\*\* El concreto expuesto de manera continua a los líquidos que tengan un PH inferior a 3, deberá protegerse de manera similar a la recomendada para los concretos expuestos a las soluciones diluidas de ácidos.† Las aguas naturales tienen regularmente un PH mayor que 7 y rara vez inferior que 6. Las aguas con un PH superior a 6.5 pueden ser agresivas si contienen bicarbonatos. Se considera que las soluciones de ácido carbónico con concentraciones entre 0.9 y 3 partes por millón, son destructivas para el concreto.‡

Las relaciones agua-cemento bajas, las permeabilidades bajas y los contenidos de cemento bajos a moderados pueden aumentar la resistencia a los ácidos o a la corrosión del concreto. Una permeabilidad baja que resulta de una relación agua-cemento baja ayuda a impedir que penetren agentes corrosivos en el concreto. Los contenidos de cemento bajos a moderados (de 280 kg/m<sup>3</sup> a 390 kg/m<sup>3</sup>) tienen como consecuencia un menor contenido de pasta susceptible de ser atacada. El uso de agregados calcáreos de sacrificio deberá ser considerado donde sea necesario.

Algunos ácidos, gases, sales y otras sustancias que no hemos mencionado pueden desintegrar también al concreto. Se debe evitar que los ácidos y otros productos químicos que atacan severamente al concreto de cemento portland entren en contacto con éste, utilizando recubrimientos protectores.††

## Resistencia al fuego y propiedades térmicas

La resistencia al fuego y las propiedades térmicas del concreto (conductividad, difusibilidad, y coeficiente de expansión térmica), dependen hasta cierto grado de los constituyentes minerales de los agregados usados. Los agregados ligeros manufacturados y algunos agregados ligeros naturales tienen una mayor resistencia al fuego que los agregados de peso normal debido a sus características aislantes y a su estabilidad a altas temperaturas. Al quedar expuesto al fuego, un concreto que contenga agregado grueso calcáreo tendrá un mejor desempeño que un concreto que contenga agregado de cuarzo o silíceo, como el granito o la cuarcita. A aproximadamente 570°C, el cuarzo se expande 0.85 % provocando una expansión destructiva‡ El coeficiente de expansión térmica de los agregados varía de  $0.56 \times 10^{-6}$  oC hasta  $5 \times 10^{-6}$  oC.

Para mayor información, refiérase al Capítulo 13 en lo concerniente a los cambios volumétricos provocados por temperatura y al Capítulo 15, en lo que se refiere a las consideraciones sobre concreto en masa y conductividad térmica.

## MATERIALES PERJUDICIALES Y REACTIVIDAD CON LOS ALCALIS

Dentro de las sustancias perjudiciales que pueden estar presentes en los agregados, se incluyen las impurezas orgánicas, limo, arcilla, esquistos, óxido de hierro, carbón mineral, lignito, y algunas partículas suaves y ligeras (Tabla 4-4). Además, ciertas rocas y minerales tales como algunos horstenos, el cuarzo deformado,‡‡ y ciertas calizas dolomíticas son reactivas con los álcalis (Vea la Tabla 4-5). El yeso y la anhidrita pueden provocar ataque de sulfatos. Algunos agregados, como ciertos esquistos, producirán erupciones al expandirse simplemente por haber absorbido agua o por el congelamiento del agua presente (Figura 4-12). La mayoría de las especificaciones limitan las cantidades permisibles de estas sustancias en los agregados. La historia del comportamiento de un agregado debe ser un factor determinante al fijar los límites de las sustancias nocivas. En la Tabla 4-4 se enlistan los métodos de prueba de la ASTM para

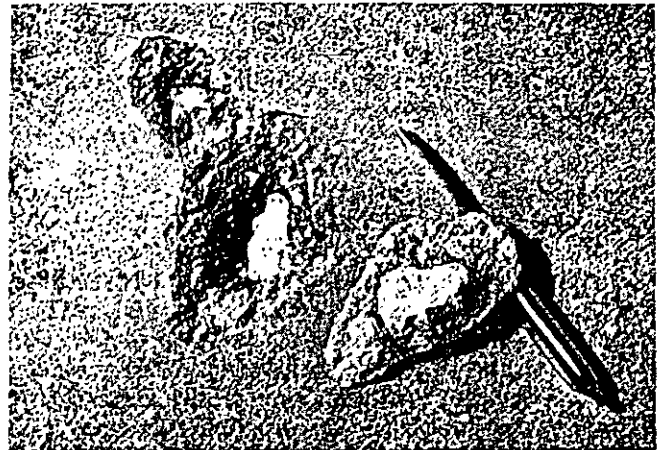


Figura 4-12. Una erupción es el desprendimiento de un pequeño fragmento de la superficie del concreto, provocado por la presión interna que deja una depresión superficial, típicamente cónica.

\*\* Referencia 4-32, páginas 496-497.

† Referencia 4-23.

†† En las Referencias 4-23 y 4-28 se exponen los efectos que tienen varias sustancias en el concreto así como las pautas a seguir para tratamientos protectores y recubrimientos. Las Referencias 4-19 y 4-22 también presentan información adicional sobre ataque químico.

‡ Referencias 4-18 y 4-22.

‡‡ Referencia 4-20.

**Tabla 4-4. Materiales nocivos en los agregados.**

Sustancias	Efecto en el concreto	Designación de la prueba
Impurezas orgánicas	Afectan el fraguado y el endurecimiento, pueden causar deterioros	ASTM C 40 ASTM C 87
Material más fino que la malla No. 200 (80 micras)	Afecta a la adherencia, aumenta la cantidad de agua requerida	ASTM C 117
Carbón, lignito u otros materiales de peso ligero	Afectan a la durabilidad, pueden ser causa de manchas y erupciones	ASTM C 123
Partículas suaves	Afectan a la durabilidad	
Terrones de arcilla y partículas deleznable	Afectan a la trabajabilidad y a la durabilidad, pueden provocar erupciones	ASTM C 142
Horsteno de densidad relativa inferior a 2.40	Afecta a la durabilidad, puede provocar erupciones	ASTM C 123 ASTM C 295
Agregados reactivos con los álcalis	Expansión anormal, agrietamientos en forma de mapa, erupciones	ASTM C 227 ASTM C 289 ASTM C 295 ASTM C 342 ASTM C 586

**Tabla 4-5. Algunos minerales, rocas y materiales sintéticos reactivos potencialmente dañinos.**

Sustancias reactivas álcalis-sílice*		Sustancias reactivas álcali-carbono**
Andesitas	Opalo	Dolomitas calcílicas
Argilitas	Pizarras opalinas	Calizas dolomíticas
Ciertas dolomitas y calizas silíceas	Filitas	Dolomitas de grano fino
Horstenos calcedónicos	Cuarcitas	
Calcedonia	Cuarzosas	
Cristobalita	Horstenos	
Dacitas	Riolitas	
Material volcánico vitrificado o microcristalino	Esquistos	
Gneis granítico	Pizarras silíceas	
Grauvacas	Cuarzo deformado y algunas otras formas de cuarzo	
Metagrauvacas	Vidrio silíceo natural y sintético	
	Tridimita	

\* Varias de las rocas enlistadas (por ejemplo el gneis granítico y algunas formaciones de cuarzo) reaccionan muy lentamente y bien pueden no mostrar evidencia de un grado nocivo de reactividad hasta que el concreto tiene más de 20 años de edad.

\*\* Sólo algunas fuentes de estos materiales han mostrado reactividad.

detectar cuantitativamente o cualitativamente tales sustancias.

Los agregados son potencialmente dañinos si contienen compuestos que reaccionen químicamente con el concreto de cemento portland y que produzcan (1) cambios significativos en el volumen de la pasta o del agregado o de ambos, (2) interferencia en la hidratación normal del cemento, y (3) otros productos secundarios dañinos.

Las impurezas orgánicas pueden retrasar el fraguado y el endurecimiento del concreto, pueden reducir el aumento de

resistencia, y en casos poco usuales pueden causar deterioros. Impurezas orgánicas tales como las turbas, los humus, y las margas orgánicas tal vez no sean tan nocivas, sin embargo es preferible evitarlas.

Los materiales más finos que la malla No. 200, en especial los limos y las arcillas, pueden estar presentes como polvo suelto y formar una capa alrededor de las partículas de agregado. Aún las capas delgadas de limo o arcilla en las partículas de grava pueden ser perjudiciales porque pueden debilitar la adherencia entre la pasta de cemento y el agregado. Si ciertos tipos de limo o arcilla están presentes en cantidades excesivas, la cantidad necesaria de agua se tiene que incrementar de manera importante.

El carbón mineral o el lignito, u otros materiales de densidad baja como la madera o los materiales fibrosos, afectarán la durabilidad del concreto si están presentes en cantidades excesivas. Si estas impurezas se encuentran en la superficie o cerca de ella, se podrían desintegrar, producir erupciones o causar manchas. Se puede identificar al horsteno, potencialmente nocivo, que exista en el agregado grueso por medio de la prueba ASTM C 123. No se admiten partículas blandas en el agregado grueso porque pueden afectar la durabilidad y la resistencia a la abrasión del concreto y producir erupciones. Si son desmenuzables, se podrían romper durante el mezclado y de ese modo aumentar la cantidad de agua requerida. Donde la resistencia a la abrasión es crítica, como en los pisos para trabajo pesado, las pruebas pueden indicar que sea necesaria una investigación más a fondo o que se justifique otra fuente de agregado.

Los terrones de arcilla presentes en el concreto pueden absorber una cierta cantidad de agua de mezclado, ser causa de erupciones en el concreto endurecido y afectar la durabilidad y la resistencia a la abrasión. También se pueden quebrar durante el mezclado y con eso aumentar la demanda de agua.

Los agregados pueden contener ocasionalmente partículas de óxido de hierro y sulfuro de hierro que produzcan manchas antiestéticas en las superficies de concreto expuesto. El agregado debe cubrir los requisitos de manchado de la norma ASTM C 330, cuando sea ensayado conforme a la norma ASTM C 641, y el frente de la cantera y los montones del material no deben mostrar manchas.

Como ayuda adicional para identificar partículas que llegaran a ocasionar manchas, se puede sumergir al agregado en una lechada de cal. Si estas partículas se encuentran presentes, se formará un precipitado gelatinoso verde-azul al cabo de 5 a 10 minutos; éste cambiará rápidamente a un color café al ser expuesto al aire y a la luz. La reacción quedará completa en unos 30 minutos. Si no se forma ningún precipitado gelatinoso color café cuando se coloca al agregado en cuestión en la lechada de cal, existen pocas probabilidades de que vaya a ocurrir cualquier reacción en el concreto. Estas pruebas serán necesarias cuando se intente emplear agregados de los que no se tenga registro de un uso anterior efectivo en concretos arquitectónicos.

### Reactividad álcali-agregado

Los agregados químicamente estables en el concreto, no reaccionan químicamente con el cemento de manera nociva. Sin embargo, los agregados con ciertos constituyentes

minerales (tales como algunas formas de sílice o carbonatos), reaccionan con los álcalis (óxido de sodio y óxido de potasio) en el cemento, en particular cuando el concreto está sujeto a un ambiente cálido y húmedo. Ciertos agregados también contienen álcalis potencial y nocivamente lixiviantes. En orden de ocurrencia y consecuencias se presenta la reactividad álcali- sílice, la reactividad álcali-carbonato y otras reacciones cemento-agregado. La reacción álcali-sílice, generalmente forma productos que pueden causar una expansión excesiva y agrietamientos o erupciones en el concreto (Figuras 4-13 y 4-14). Junto con la reactividad álcali-sílice, comúnmente se puede encontrar presente gel álcali-sílice en los vacíos y en las grietas, anillos de reacción de los agregados así como microfisuras. A pesar de que



Figura 4-13. Deterioro en el concreto causado por reactividad álcali-agregado.



Figura 4-14. Vista de una sección pulida de un agregado reactivo con los álcalis. Observe el cerco alrededor del agregado formado, por la reacción álcali-sílice así como la formación de grietas.

muchas rocas con carbonatos reaccionan con los productos resultantes de la hidratación del cemento, muy raramente producen reacciones expansivas. La reactividad expansiva álcali-carbonato solamente se sospecha cuando se emplean calizas dolomíticas de grano extremadamente fino que contengan grandes cantidades de calcita, arcilla, limo, o rombos dolomíticos que se encuentren dentro de una matriz de arcilla y calcita fina (vea la Tabla 4-5). La reactividad con los álcalis se ve afectada por la cantidad, el tipo y el tamaño de partícula del material reactivo, así como por el contenido de agua y de álcalis solubles en el concreto.

Cuando se emplean agregados reactivos, se puede minimizar parcialmente la reactividad álcali-sílice, limitando el contenido de álcalis en el cemento a 0.6% (expresado como equivalente de  $\text{Na}_2\text{O}$ ). Esta opción se enlista en las especificaciones para cemento portland ASTM C 150. La tendencia a reaccionar con los álcalis se puede reducir de manera significativa si se mantiene lo más seco posible al concreto; la reactividad se puede detener virtualmente si la humedad relativa interna del concreto se mantiene por debajo de aproximadamente el 80%. No obstante, en la mayoría de los casos, esta condición es difícil de lograr y de conservar. El agua de mar caliente, por la presencia de álcalis disueltos, puede agravar particularmente la reactividad con los álcalis.\*

Algunos cementos mezclados o aditivos puzolánicos son benéficos cuando se emplean en el concreto, que de otro modo se vería afectado por la nociva tendencia reactiva álcali-sílice. Las puzolanas producen hidratos de silicato de calcio adicionales que retienen algunos álcalis existentes en el concreto, reduciendo así la cantidad de álcalis existentes que pudieran reaccionar con agregados reactivos. Se debe evitar emplear puzolanas con contenidos elevados de álcalis solubles en el agua, porque pueden aumentar la reactividad. La cantidad y el tipo de aditivo puzolánico, para una mezcla de concreto en particular deberán ser determinados por medio de ensayos (ver norma ASTM C 441).\*\*

El ablandamiento con caliza (término popular para el reemplazo de aproximadamente el 30% de agregado de grava- arena reactivo por una caliza triturada), es efectivo para prevenir deterioros en algunos concretos con agregado de grava-arena. Menores cantidades de polvo de caliza también pueden proporcionar una protección adecuada. Se puede determinar la expansión potencial de estas combinaciones de cemento-agregado, midiendo el cambio de longitud de barras de mortero durante su almacenamiento bajo condiciones de humedad y temperatura prescritas de acuerdo con la norma ASTM C 342.

Los registros de servicio en campo generalmente dan la mejor información para la selección de los agregados. Si no se cuenta con información acerca de algún agregado y se sospecha que sea potencialmente reactivo, se deberán realizar pruebas de laboratorio. En los siguientes párrafos se discuten tres ensayos ASTM para identificar agregados reactivos con álcalis. Además, el examen petrográfico ASTM C 295 realizado por un petrógrafo calificado puede ser de utilidad para identificar a los agregados potencialmente reactivos.

El ensayo de barras de mortero ASTM C 227 se usa para determinar la potencial reactividad expansiva álcali-sílice de

\* Referencia 4-21.

\*\* Referencias 4-25, 4-29, 4-32, y 4-33.

combinaciones de cemento y agregados. En este ensaye, se mide la expansión desarrollada en barras pequeñas de mortero durante su almacenamiento bajo condiciones especificadas de temperatura y humedad. Los ensayos con barras de mortero se pueden usar ya sea para agregados finos o para agregados gruesos. Generalmente deben transcurrir de tres a seis meses antes de poder obtener resultados.

La prueba química rápida ASTM C 289, se emplea para identificar a los agregados silíceos potencialmente reactivos. Se puede completar al cabo de dos o tres días. Las conclusiones que se obtienen se basan en la magnitud de la reacción que ocurre entre una solución de hidróxido de sodio y un espécimen triturado del agregado en cuestión. Este ensaye no es del todo confiable.

Para la reactividad álcali-sílice, el ensaye de barras de mortero (ASTM C 227) parece dar la mejor correlación con el comportamiento del concreto en pavimentos y en estructuras. La prueba química y el examen petrográfico se pueden usar para determinar la presencia de componentes silíceos potencialmente reactivos. Debido a la influencia de ciertos minerales tales como las calizas sobre los resultados de las pruebas, la prueba química rápida (ASTM C 289) deberá ir acompañada de un análisis petrográfico del agregado. Si se llegara a detectar una cantidad moderada de material deletéreo, la estructura en que se haya usado podría o no presentar algún problema.

La prueba de cilindro de roca ASTM C 586, se usa para determinar agregados de rocas con carbonatos potencialmente expansivos (reactividad álcali-carbonato). Se miden los cambios de longitud en una muestra que ha estado sumergida en una solución de hidróxido de sodio. Las tendencias expansivas se pueden observar usualmente luego de 28 días de inmersión. Las restricciones en el contenido de álcalis del cemento, así como el uso de inhibidores puzolánicos no son tan efectivos como en la reacción álcali-sílice. Puede ser útil la reducción en el tamaño máximo de partícula.

Cabe señalar que en unos cuantos agregados comerciales aceptables, una porción del agregado tendrá minerales potencialmente reactivos. Un procedimiento ingenieril aceptado, consiste en usar registros de servicios anteriores junto con datos de ensayos de laboratorio y de exámenes petrográficos para decidir si, para las condiciones a que quedará expuesto el concreto, existe suficiente riesgo de expansión nociva como para justificar el cambio a otra fuente de agregado o para adoptar otras precauciones. De nuevo, los registros de servicio del comportamiento en el campo constituyen el criterio más importante. Un análisis petrográfico (ASTM C 856), en el concreto endurecido identificará la reactividad con los álcalis en un concreto que haya experimentado deterioros debido a estas reacciones.\*

## BENEFICIO DE AGREGADOS

El procesamiento del agregado consiste en (1) procesamiento básico, triturado, cribado y lavado, para obtener una granulometría y limpieza adecuadas, y (2) beneficio - el mejoramiento de la calidad por medio de otros métodos de

procesamiento tales como la separación en un medio pesado, el cribado en agua, la clasificación por corriente ascendente, y la trituración.

En la separación en un medio pesado, se hace pasar a los agregados a través de un medio pesado compuesto por minerales pesados finamente molidos más agua en proporciones de modo que tenga un peso específico menor que el de las partículas de los agregados pero mucho mayor que el de las partículas deletéreas. Las partículas de mayor peso se hunden y las partículas más ligeras flotan. Este proceso se puede usar cuando las partículas aceptables y las contaminantes tengan distintos pesos específicos.

En el cribado en agua se separan las partículas con pequeñas diferencias de peso específico pulsando una corriente de agua. Las pulsaciones de agua hacia arriba a través de una criba (una caja con el fondo perforado) mueven el material más ligero para formar una capa sobre el material de mayor peso. Posteriormente se retira la capa superior.

La clasificación por corriente ascendente separa a las partículas que tengan fuertes diferencias en sus pesos específicos. Los materiales ligeros, como la madera y el lignito, se van flotando en una rápida corriente ascendente de agua.

La trituración aparta a las partículas blandas y deleznable de los agregados gruesos. Este proceso es en ocasiones el único medio para que el material pueda ser usado. Desafortunadamente, en cualquier proceso siempre se pierde una parte del material sano y la remoción de las partículas deletéreas puede llegar a ser difícil o costosa.

## MANEJO Y ALMACENAMIENTO DE AGREGADOS

Los agregados deben ser manejados y almacenados de tal forma que la segregación y la degradación sean mínimas y que se evite la contaminación del agregado con sustancias deletéreas. Los montones de material deben quedar formados en capas delgadas de espesor uniforme para minimizar la segregación. El método más económico y aceptable para formar montones de material es el método de volteo con camión, en que se descargan las cargas de modo que se les mantiene juntas estrechamente. Después se recupera el agregado con un cargador frontal. El cargador o recuperador deberá remover porciones de los bordes de la pila desde la parte inferior hasta la parte superior para que todas las porciones contengan una parte de cada capa horizontal.

Cuando los agregados no se entregan en camiones, se obtienen resultados aceptables y de menores costos formando los montones en capas con un cucharón de quijadas (método de tirar y tender, Figura 4-1) o, en caso de agregados no sujetos a degradación, tendiendo los agregados con un tractor con neumáticos y recuperándolos con un cargador frontal. Al tender el material en capas delgadas la segregación se vuelve mínima. Ya sea que se manejen los agregados en camión, cargador de cangilones, cucharón de quijadas o transportador, los montones no se deberán formar en pilas altas en forma de cono porque esto produce segregación. No obstante, si las circunstancias demandan la construcción de una pila cónica o si algún montón se ha segregado, se pueden minimizar las variaciones en la granulometría al recuperar

\* Referencia 4-30.

la pila si se cargan los agregados en un movimiento continuo alrededor del perímetro de la pila para mezclar los tamaños en vez de comenzar en un lado y trabajar en línea recta a través de la pila.

Los agregados triturados se segregan menos que los agregados redondeados (grava natural) y los agregados de mayor tamaño, se segregan más que los de tamaños menores. Para evitar la segregación de los agregados gruesos, las diversas fracciones de tamaño se pueden amontonar y dosificar de manera separada. No obstante, si se siguen los procedimientos adecuados de amontonamiento de material se elimina la necesidad de este requisito. Las especificaciones permiten una variación en la cantidad de agregados en cualquier fracción de tamaño debido en parte a la segregación en las operaciones de amontonamiento y de dosificación.

Los agregados que han sido lavados se deben amontonar con suficiente anticipación para que drenen hasta conservar un contenido de humedad uniforme. El material fino presenta una menor tendencia a segregarse en estado saturado que en estado seco. Cuando se descarga material fino en estado seco de los contenedores o de los transportadores, el viento puede llevarse los finos. Esto se debe evitar en la medida de lo posible.

Para evitar la contaminación de los montones de agregado se deben usar mamparas o divisiones. Las paredes divisorias entre los compartimientos de los depósitos deben ser lo suficientemente altas para prevenir el entremezclado de los materiales. Los depósitos de almacenamiento de preferencia deberán ser circulares o casi cuadrados. La pendiente mínima de su fondo deberá ser de 50 grados con respecto a la horizontal en todas sus caras hasta un escurridero central. El material deberá caer verticalmente sobre el escurridero dentro del depósito. Si se tira el material dentro del depósito con un cierto ángulo y contra los lados del depósito, se provocará que se segregue. Las placas de desviación o los divisores ayudan a mantener mínima la segregación. Los depósitos deberán conservarse tan llenos como sea posible puesto que así se reduce el rompimiento de las partículas de agregado y la tendencia a segregarse.\*

## AGREGADO DE DRAGADO MARITIMO

El agregado de dragado marítimo de los esteros de las mareas y la arena y la grava de las playas, se pueden usar cuando no se dispone de otras fuentes de agregado en ciertas aplicaciones para concretos si se tiene precaución. Los agregados obtenidos de los lechos marinos, tienen dos problemas: (1) las conchas marinas y (2) la sal.

Las conchas marinas pueden estar presentes en la fuente de agregado. Estas conchas son material duro que puede producir concreto de buena calidad; sin embargo, puede ser necesario aumentar el contenido de cemento. Dada la angularidad de las conchas, para obtener la trabajabilidad deseada se necesita una cantidad adicional de pasta de cemento. Se debe evitar al agregado que contenga conchas completas (sin triturar), pues su

presencia producirá vacíos en el concreto y disminuirá la resistencia a la compresión.

Los agregados de dragado marítimo contienen frecuentemente sal proveniente del agua del mar. Las sales primarias son el cloruro de sodio y el sulfato de magnesio y a menudo la cantidad de sal en el agregado es menor de aproximadamente el 1 % del peso del agua de mezclado. El mayor contenido de sal se encuentra en las arenas que se encuentran justo encima del nivel de la marea alta. El uso de estos agregados junto con agua potable para mezclar, frecuentemente contribuye con menos sal a la mezcla que el uso de agua de mar con agregados libres de sal. Los agregados marinos pueden ser una fuente apreciable de cloruros. La presencia de éstos puede afectar al concreto y a sea (1) alterando el tiempo de fraguado, (2) aumentando la contracción por secado, (3) aumentando de manera importante el riesgo de corrosión del acero de refuerzo, y (4) causando eflorescencias. Por lo general, los agregados marinos que contienen grandes cantidades de cloruros no se deben usar para producir concreto reforzado.

Los agregados de dragado marítimo se pueden lavar con agua dulce para reducir su contenido de sales. No existe un límite máximo en cuanto al contenido de sales del agregado grueso o fino; sin embargo, se deben respetar los límites para cloruros que se presentan en el Capítulo 7.

## RECICLADO DE CONCRETO VIEJO

En años recientes, el concepto de emplear pavimentos, edificios y otras estructuras de concreto viejo como fuente de agregado ha quedado patente en diversos proyectos, resultando en ahorros de material y también de energía. El procedimiento implica (1) demoler y remover el concreto viejo, (2) triturar en quebradoras primarias y secundarias, (3) extraer el acero de refuerzo y los objetos embebidos, (4) graduar y lavar, y (5) amontonar finalmente el agregado fino y grueso resultantes. Se debe impedir que el producto final quede contaminado con polvo, yeso, madera y otros materiales extraños.

El concreto reciclado es simplemente concreto viejo que se ha triturado para producir agregados. El concreto reciclado principalmente se emplea en la reconstrucción de pavimentos. Ha sido usado satisfactoriamente como agregado en sub-bases granulares, sub-bases de concreto pobre, suelo-cemento, y en concreto nuevo como fuente única de agregado o como reemplazo parcial de agregado nuevo. El agregado de concreto reciclado generalmente tiene una mayor absorción y menor peso específico que el agregado convencional. Como se muestra en la Figura 4-15, la forma de la partícula es similar a la de las rocas trituradas.

Para evaluar la posibilidad de reacciones dañinas con los sulfatos, se debe determinar el contenido de sulfatos del concreto reciclado. También se debe determinar el contenido de cloruros solubles en agua donde éste sea pertinente.

El concreto nuevo hecho con agregado de concreto reciclado, generalmente tiene buena trabajabilidad, durabilidad, y resistencia a la acción saturada de congelación-deshielo. Su resistencia a la compresión variará con la resistencia a compresión, del concreto original y con la relación agua-cemento del concreto nuevo. La resistencia a

\* Los métodos recomendados para el manejo de los agregados se discuten extensamente en las Referencias 4-7, 4-9, y 4-16.





Figura 4-15. Agregado de concreto reciclado.

compresión, se puede elevar usando un mayor contenido de cemento y reemplazando algo del agregado de concreto reciclado con agregado convencional. El concreto nuevo también tendrá una menor densidad. Como se acostumbra con cualquier fuente nueva de agregados, el agregado de concreto reciclado deberá ser ensayado para investigar su durabilidad, granulometría y otras propiedades.

Para verificar la calidad del concreto nuevo, así como para determinar las proporciones correctas de la mezcla, se deberán elaborar mezclas de prueba con el concreto. Uno de los principales problemas al usar concreto reciclado es la variabilidad en las propiedades del concreto viejo, la que a su vez afectará las propiedades del concreto nuevo. Esto se puede evitar parcialmente revisando frecuentemente las propiedades del concreto viejo que se esté reciclando. Tal vez sea necesario realizar posteriormente ajustes en los proporcionamientos de las mezclas.

## REFERENCIAS

- 4-1. *Symposium on Mineral Aggregates*, ASTM STP83, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1948.
- 4-2. Brown, L. S., *Some Observations on the Mechanics of Alkali-Aggregate Reaction*, Research Department Bulletin RX054, Portland Cement Association, 1955.
- 4-3. Verbeck, George, and Landgren, Robert, *Influence of Physical Characteristics of Aggregates on Frost*

- Resistance of Concrete*, Research Department Bulletin RX126, Portland Cement Association, 1960.
- 4-4. Houston, B. J., *Investigation of Grap-Grading of Concrete Aggregates; Review of Available Information*, Technical Report No. 6-593, Report 1, Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi, February 1962.
- 4-5. Hadley, David W., *Alkali Reactivity of Dolomitic Carbonate Rocks*, Research Department Bulletin RX176, Portland Cement Association, 1964.
- 4-6. Litvin, Albert, and Pfeifer, Donald W., *Gap-Graded Mixes for Cast-in-Place Exposed Aggregate Concrete*, Development Department Bulletin DX090, Portland Cement Association, 1965.
- 4-7. Mathews, C. W., "Stockpiling of Materials," *Rock Products*, series of 21 articles, Maclean Hunter Publishing Company, Chicago, August 1965 through August 1967.
- 4-8. "Tests and Properties of Concrete Aggregates," Part III, *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, STP 169-A, American Society for Testing and Materials, 1966, pages 379-512.
- 4-9. *Effects of Different Methods of Stockpiling and Handling Aggregates*, NCHRP Report 46, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1967.
- 4-10. Stark, David, and Klieger, Paul, *Effect of Maximum Size of Coarse Aggregate on D-Cracking in Concrete Pavements*, Research and Development Bulletin RD023P, Portland Cement Association, 1974.
- 4-11. Stark, David, *Characteristics and utilization of Coarse Aggregates Associated with D-Cracking*, *Research and Development Bulletin RD047P*, Portland Cement Association, 1976.
- 4-12. Buck, Alan D., "Recycled Concrete as a Source of Aggregate," *ACI Journal*, American Concrete Institute, Detroit, May 1977, pages 212-219.
- 4-13. *Acid Rain, Research Summary*, EPA-600/8-79-028, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., October 1979.
- 4-14. Ray, Gordon K., "Quarrying Old Pavements to Build New Ones," *Concrete Construction*, Concrete Construction Publications, Inc., Addison, Illinois, October 1980, pages 725-729.
- 4-15. *Recycling D-Cracked Pavement in Minnesota*, PL146P, Portland Cement Association, 1980.
- 4-16. *Concrete Manual*, 8th ed., U.S. Bureau of Reclamation, Denver, revised 1981.
- 4-17. Stark, D. C., *Alkali-Silica Reactivity: Some Reconsiderations*, Research and Development Bulletin RD076T, Portland Cement Association, 1981.
- 4-18. *Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements*, ACI 216R-81, ACI Committee 216 Report, American Concrete Institute, 1981.
- 4-19. *Guide to Durable Concrete*, ACI 201.2R-77, reaffirmed 1982, ACI Committee 201 Report, American Concrete Institute.
- 4-20. Buck, Alan D., and Mather, Katherine, *Reactivity of Quartz at Normal Temperatures*, Technical Report SL-84-12 Structures Laboratory Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers, July 1984.

- 4-21. Buck, Alan D.; Mather, Katherine; and Mather, Bryant, *Cement Composition and Concrete Durability in Sea Water*, Technical Report SL-84-21, Structures laboratory, Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers, December 1984.
- 4-22. *Guide for Use of Normal Weight Aggregates in Concrete*, ACI 221R-84, ACI Committee 221 Report, American Concrete Institute, 1984.
- 4-23. *A Guide to the Use of Waterproofing, Dampproofing, Protective, and Decorative Barriers Systems for Concrete*, ACI 515.1R-79, revised 1985, ACI Committee 515, American Concrete Institute.
- 4-24. "Popouts: Causes, Prevention, Repair," *Concrete Technology Today*, PL852B, Portland Cement Association, June 1985.
- 4-25. Bhatti, Muhammad S. Y., "Mechanism of Pozzolanic Reactions and Control of Alkali-Aggregate Expansion" *Cement, Concrete, and Aggregates*, American Society for Testing and Materials, Winter 1985.
- 4-26. *Final Report, U.S. EPA Workshop on Acid Deposition Effects on Portland Cement Concrete and Related Materials*, Atmospheric Sciences Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina, February 1986.
- 4-27. *New Pavement from Old—Michigan Recycles Concrete*, PL215P, Portland Cement Association, 1986.
- 4-28. *Effects of Substances on Concrete and Guide to Protective Treatments*, IS001T, Portland Cement Association, 1986.
- 4-29. *Alkalies in Concrete*, STP 930, American Society for Testing and Materials, 1986.
- 4-30. Kosmatka, Steven H., "Petrographic Analysis of Concrete," *Concrete Technology Today*, PL862B, Portland Cement Association, July 1986.
- 4-31. Kong, Hendrik, and Orbison, James G., "Concrete Deterioration Due to Acid Precipitation," *ACI Materials Journal*, American Concrete Institute, March-April 1987.
- 4-32. *Concrete Durability, Katherine and Bryant Mather International Conference*, SP100, American Concrete Institute, 1987.
- 4-33. Buck, Alan D., and Mather, Katherine, *Methods for Controlling Effects of Alkali-Silica Reaction in Concrete*, Technical Report SL-87-6, Structures Laboratory, Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers, 1987.



## CAPITULO 5

# Concreto con aire incluido

Uno de los mayores avances en la tecnología del concreto fue el desarrollo del concreto con aire incluido, a mediados de la década de los años 30. Hoy día, la inclusión de aire se recomienda en casi todos los concretos, especialmente para mejorar su resistencia contra la congelación, cuando el concreto queda expuesto al agua y a los productos químicos descongelantes. Sin embargo, se obtienen otros importantes beneficios con la inclusión de aire en el concreto ya sea que se encuentre en estado fresco o endurecido.

El concreto con aire incluido se produce utilizando un cemento inclusor de aire o agregando un agente inclusor de aire que estabiliza las burbujas formadas durante el proceso de mezclado. El agente inclusor de aire mejora la incorporación de las burbujas de diversos tamaños disminuyendo la tensión superficial del agua de mezclado.

Los agentes inclusores de aire aniónicos\* son hidrófobos (repelen al agua) y están cargados eléctricamente. La carga eléctrica negativa es atraída hacia los granos de cemento cargados positivamente, lo que ayuda a estabilizar las burbujas. El agente inclusor de aire forma una fuerte película repelente al agua - similar a una película de jabón- con la resistencia y elasticidad suficiente para encerrar y estabilizar las burbujas de aire y evitar que se fusionen. La película hidrófoba también impide que el agua penetre en las burbujas. La acción revolvedora y amasadora del mezclado mecánico dispersa las burbujas de aire. Las partículas de agregado fino también actúan como una rejilla tridimensional para ayudar a mantener las burbujas en la mezcla.

A diferencia de los vacíos de aire atrapado, que ocurren en todos los concretos y que dependen en gran medida de las características del agregado, las burbujas de aire intencionalmente incluidas son extremadamente pequeñas y tienen un diámetro de entre 10 y 1,000 micras. Los vacíos de aire atrapado tienen diámetros de 1,000 micras (1 mm) ó más. En un concreto normal la mayor parte de los vacíos de aire son de entre 10 y 100 micras de diámetro. Como se muestra en la Fig. 5-1, las burbujas están bien distribuidas y no se encuentran interconectadas. El concreto sin inclusión de aire con un tamaño máximo de agregado de 25 mm tiene un contenido de aire de aproximadamente 1.5%. Esta misma mezcla con aire incluido para soportar una exposición severa al congelamiento requeriría un contenido de aire de aproximadamente 6%.



Figura 5-1. Sección pulida de un concreto con aire incluido vista a través del microscopio.

## PROPIEDADES DEL CONCRETO CON AIRE INCLUIDO

Las características de mayor importancia en el concreto donde influye la inclusión de aire, se presentan en las siguientes secciones. En la Tabla 5-1, se presenta un breve resumen de otras características que no han sido tratadas.

\* También existen aditivos no iónicos.

**Tabla 5-1. Consecuencias que provoca la inclusión de aire en las propiedades del concreto**

Propiedades	Consecuencia
Abrasión	Poco efecto; a mayor resistencia aumenta la resistencia a la abrasión
Absorción	Poco efecto
Reactividad álcali-silice	La expansión disminuye conforme aumenta el contenido de aire
Sangrado	Se reduce de manera importante
Adherencia al acero	Disminuye
Resistencia a la compresión	Se ve reducida aproximadamente de 2% a 6% por cada punto porcentual de aumento en el contenido de aire; las mezclas ásperas o pobres pueden aumentar su resistencia
Fluencia	Poco efecto
Descascaramiento por productos descongelantes	Reducido notablemente
Fatiga	Poco efecto
Resistencia a la flexión	Se reduce aproximadamente de 2% a 4% por cada punto porcentual de aumento en el contenido de aire
Resistencia a la congelación-deshielo	Aumenta significativamente contra el deterioro por congelación-deshielo en estado saturado
Calor de hidratación	Sin efecto considerable
Módulo de elasticidad (estático)	Disminuye con el aire incluido aproximadamente de 7 400 a 14 000 kg/cm <sup>2</sup> por punto porcentual de aire incluido
Permeabilidad	Poco efecto, la permeabilidad disminuye con relaciones agua-cemento bajas
Descascaramiento	Se reduce de manera importante
Contracción (secado)	Poco efecto
Revenimiento	Aumenta con la inclusión de aire aproximadamente 2.5 cm por cada medio a un punto porcentual de aire
Calor específico	Sin efecto
Resistencia a los sulfatos	Mejora apreciablemente
Temperatura del concreto fresco	Sin efecto
Conductividad térmica	Disminuye de 1% a 3% por cada punto porcentual de aumento de aire.
Difusividad térmica	Disminuye aproximadamente 1.6% por cada punto porcentual de aumento de aire
Peso volumétrico	Disminuye con el aire incluido
Demanda de agua del concreto fresco para obtener un mismo revenimiento	Disminuye con el aire incluido; aproximadamente de 3 a 6 kg por metro cúbico por punto porcentual de aire
Hermeticidad	Aumenta ligeramente; la menor relación agua-cemento eleva la hermeticidad
Trabajabilidad	Aumenta con la inclusión de aire

Nota: La información en la tabla podría no ser aplicable en todas las situaciones

## Resistencia a la congelación-deshielo

La resistencia a la congelación y deshielo del concreto endurecido en condiciones de humedad se ve mejorada significativamente con el empleo de aire incluido intencionalmente aún cuando se encuentren involucrados varios agentes descongelantes. En las Figs. 5-2 y 5-3, se presenta una prueba convincente del mejoramiento logrado en la durabilidad con la inclusión de aire.

Ciclos de congelación y deshielo para tener una reducción del 50% en el módulo dinámico de elasticidad

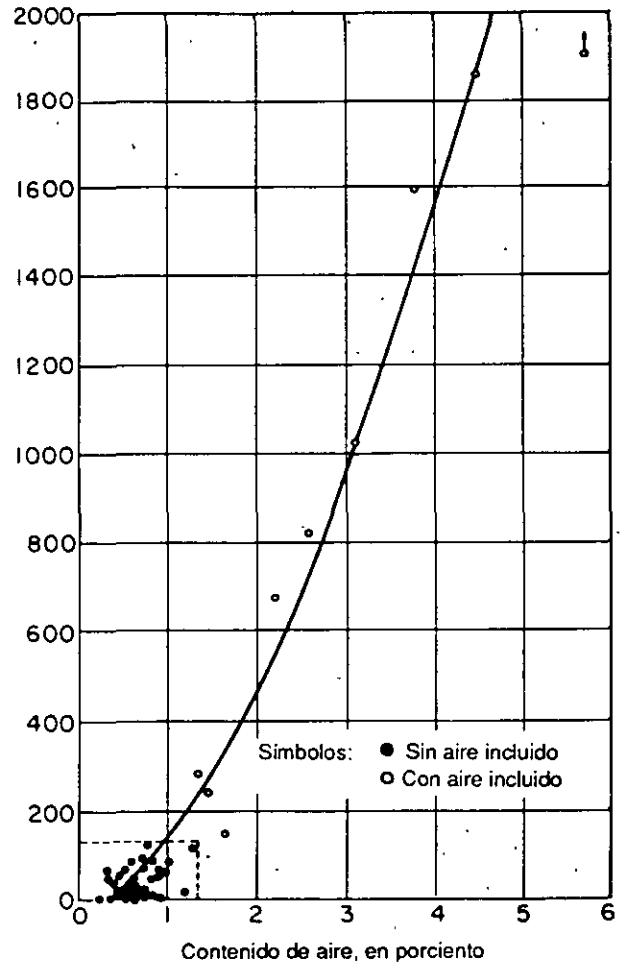


Figura 5-2. Efecto que el aire incluido tiene en la resistencia a la congelación-deshielo del concreto en pruebas de laboratorio. Los concretos se elaboraron con cementos de diferente finura y composición química y con varios contenidos de cemento y distintas relaciones agua-cemento. Referencias 5-12 y 5-22.

A medida que se va congelando el agua en el concreto húmedo, produce presiones osmóticas e hidráulicas en los capilares y poros de la pasta de cemento y del agregado. Si la presión sobrepasa la resistencia a tensión de lapasta o del agregado, la cavidad se dilatará y llegará a romperse. Efecto acumulativo de ciclos sucesivos de congelación-deshielo junto con la fractura de la pasta y del agregado causarán eventualmente una expansión y deterioro del concreto con-

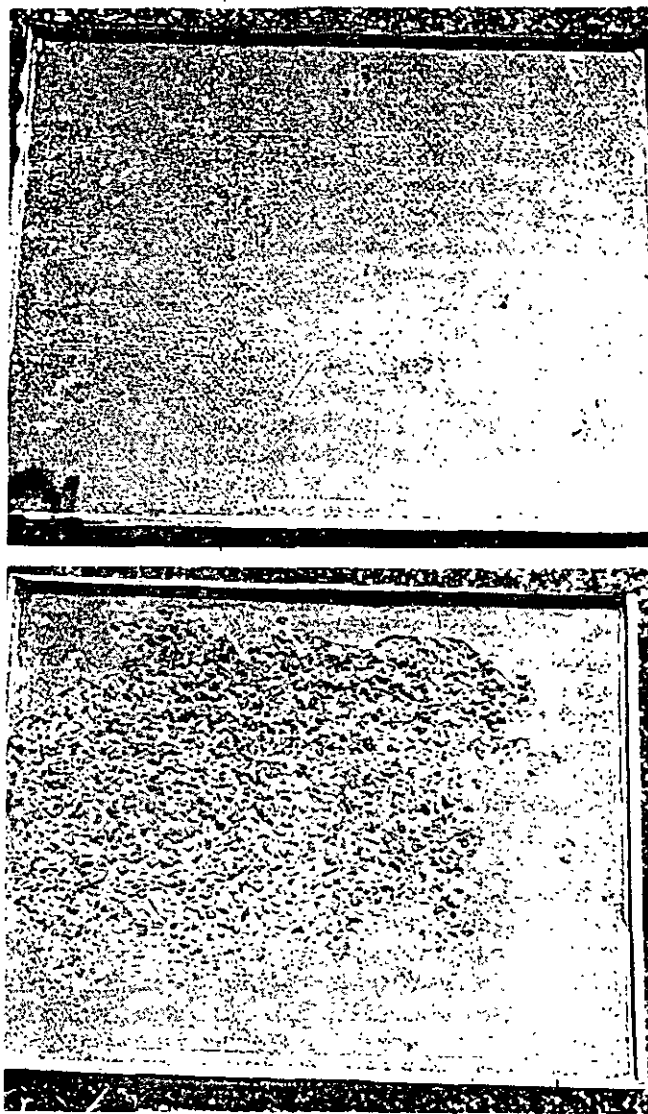


Figura 5-3. Efecto del intemperismo sobre las losas de piso en el terreno de pruebas al aire libre para estudios a largo plazo, Proyecto 10 C, PCA, Skokie, Illinois. El espécimen de arriba tiene aire incluido; el espécimen de abajo, mismo que muestra un descascamiento severo, no tiene aire incluido. Ambos fueron elaborados con 335 kg de cemento portland Tipo I por metro cúbico. Se aplicó periódicamente 0.5 kg de cloruro de calcio por metro cuadrado de espécimen cada invierno. Los especímenes tenían 20 años de edad en el momento en que fueron fotografiados. Referencia 5-23.

siderables. El deterioro es visible en forma de agrietamiento, descascamiento\*, y desmoronamiento.

Las presiones hidráulicas son causadas por la expansión del 9 % del agua al congelarse, en la cual los cristales de hielo que se van formando, desplazan al agua que no se ha congelado. Si un capilar se encuentra por encima de la saturación crítica, (91.7 % lleno de agua), las presiones hidráulicas irán produciéndose a medida que progrese la congelación. Con menores contenidos de agua no debe existir presión hidráulica alguna. A saturación crítica, todo el espacio vacío del capilar quedará lleno de hielo al congelarse, teóricamente sin desarrollo de presión.

Las presiones osmóticas se desarrollan a partir de concentraciones diferenciales de soluciones de álcalis en la pasta.

A medida que se forma el hielo, se crea una solución adyacente de alta concentración de álcalis. La solución de alta concentración de álcalis, a través del mecanismo de ósmosis, extrae agua de las soluciones menores de álcali en los poros. Esta transferencia osmótica de agua prosigue hasta que se alcanza el equilibrio en la concentración de álcalis en los fluidos. La presión osmótica se considera un factor de menor importancia, si acaso se encuentra presente, en la acción de congelación del agregado, mientras que puede ser dominante en algunas pastas de cemento. Las presiones osmóticas, tal como se ha descrito anteriormente, se consideran un factor principal en el "descascamiento por sal".

El hielo existente en los capilares (o cualquier hielo presente en los vacíos de gran tamaño o grietas), extrae agua de los poros para avanzar en su crecimiento. También, como la mayoría de los poros en la pasta de cemento y en algunos agregados son demasiado pequeños para que en ellos se formen cristales de hielo, el agua trata de emigrar hacia los lugares donde pueda congelarse.

Los vacíos de aire incluido actúan como cámaras huecas en la pasta para que penetre el agua que se congela, liberando así las presiones anteriormente descritas y evitando que el concreto sufra daños. Con el deshielo, la mayor parte del agua regresa a los capilares debido a la acción capilar y a la presión del aire comprimido en las burbujas. De esta manera, las burbujas quedan listas para proteger al concreto del siguiente ciclo de congelación.\*\*

La presión ejercida por el agua a medida que se expande durante la congelación, depende en gran medida de la distancia que el agua debe viajar hacia el vacío más cercano para desahogarse. En consecuencia, los vacíos deben quedar espaciados lo suficientemente cerca para que la presión quede por debajo de la que excede la resistencia a tensión del concreto.

El espaciamiento y tamaño de los vacíos de aire son factores de importancia que contribuyen a la efectividad de la inclusión de aire en el concreto. La norma ASTM C 457 describe una forma de evaluar el sistema de vacíos de un concreto endurecido. Casi todas las autoridades consideran las siguientes características de los vacíos, como representativas de un sistema con una adecuada resistencia a la congelación-deshielo:\*\*\*

1. Factor calculado de espaciamiento,  $\bar{L}$ , (distancia máxima promedio a partir de cualquier punto en la pasta de cemento hasta el borde del vacío más cercano) - menor que 0.20 mm.
2. Superficie específica,  $a$ , (superficie de los vacíos) - 24 cm<sup>2</sup> por cm<sup>3</sup> de volumen de vacío de aire, o mayor.
3. Número de vacíos por cada 2.5 cm lineales de dimensión transversal,  $n$ , - al menos una y media a dos veces mayor que el valor numérico del porcentaje de aire en el concreto.

\* El descascamiento se refiere al pelado o desconchamiento del mortero o del concreto en la superficie, comúnmente causado por el congelamiento y deshielo del concreto en un medio húmedo o saturado en agua (Fig. 5-3). Diversos factores pueden agravar al descascamiento (vea el Capítulo 9).

\*\* Referencias 5-12, 5-17, 5-22, y 5-26.

\*\*\* Para mayor información consulte las Referencias 5-8, 5-11, 5-19, 5-21, 5-25, 5-26, y 5-27.

La práctica usual de control en el campo solamente involucra la medición del volumen de aire en el concreto fresco. Aunque la medición del volumen de aire por sí sola no permite una evaluación completa de las características importantes del sistema de vacíos, la inclusión de aire generalmente se considera efectiva para la resistencia contra la congelación-deshielo cuando el volumen de aire en la fracción del mortero en el concreto (el material que pasa la malla No. 4), es de aproximadamente  $9 \pm 1\%$ .† El contenido total de aire requerido por durabilidad aumenta conforme se reduce el tamaño del agregado grueso y se vuelven más severas las condiciones de exposición (vea en este capítulo "Contenidos de aire recomendados" y consulte también el Capítulo 7).

La resistencia a la congelación-deshielo también aumenta de manera significativa con el uso de un agregado de buena calidad, una relación agua-cemento baja (0.50 ó menos), un contenido mínimo de cemento de 335 kg por metro cúbico,†† y con el empleo de técnicas apropiadas de acabado y de curado.‡ Los elementos de concreto deberán estar drenados adecuadamente y conservarse lo más secos posible puesto que a mayor grado de saturación aumenta la probabilidad de falla ocasionada por los ciclos de congelación-deshielo. El concreto que está seco o que sólo contiene una pequeña cantidad de humedad, no se ve afectado sustancialmente aún cuando quede sujeto a un gran número de ciclos de congelación y deshielo. Refiérase a la sección sobre "Resistencia a los productos descongelantes y a las sales" y a "Contenidos de aire recomendados" en este capítulo y al Capítulo 7 para consideraciones en el diseño de mezclas.

## Resistencia a los productos descongelantes y a las sales

Los productos químicos empleados para la remoción del hielo y de la nieve pueden agravar y ser causa de descascamientos en las superficies del concreto. El daño se debe primordialmente a una acción física. Se cree que el descascamiento provocado por los productos descongelantes en aquellos concretos con una inadecuada inclusión de aire o sin aire incluido es causado principalmente por la elevación de las presiones osmótica e hidráulica, excediendo las presiones hidráulicas producidas, cuando se congela el agua en el concreto. Estas presiones llegan a ser críticas y, a menos que se cuente con vacíos de aire incluido que actúen como válvulas de alivio, se producirán los descascamientos. Las propiedades higroscópicas (absorbentes de humedad) de las sales también atraen el agua y mantienen más saturado al concreto, aumentando el potencial de deterioro por congelación-deshielo. Un concreto con aire incluido diseñado y colocado adecuada-

† Referencia 5-11. Note que para iguales proporciones de dosificación de aditivo por kilogramo de cemento, el contenido de aire del mortero estándar según la norma ASTM C 185, sería de aproximadamente 19 % debido a las propiedades del agregado estándar. El contenido de aire de un concreto con agregado de tamaño máximo de 19 mm sería de alrededor de 6 %. La relación entre el contenido de aire del mortero estándar y el concreto se ilustra en la Referencia 5-5.

†† Referencias 5-32 y 5-38.

‡ Se recomienda que el concreto con aire incluido, alcance una resistencia a la compresión mínima de 250 a 280 kg/cm<sup>2</sup> antes de quedar expuesto a ciclos repetidos de congelación-deshielo en estado saturado.

mente resistirá a los productos descongelantes durante muchos años.

Se ha mostrado mediante estudios que la formación de cristales de sal en el concreto puede contribuir al descascamiento del concreto y a un deterioro similar al desmoronamiento que ocurre en las rocas por el intemperismo a las sales. Los vacíos de aire incluido en el concreto dejan espacio para que los cristales de sal crezcan, liberando así el esfuerzo interno de manera similar a como los vacíos liberan el esfuerzo causado por el agua al congelarse en el concreto.\*

Los productos descongelantes pueden tener muchos efectos sobre el concreto y el medio inmediato. El cloruro de sodio, el cloruro de calcio y la urea son los productos más comúnmente empleados. Cuando no hay congelamiento, el cloruro de sodio casi no tiene un efecto químico en el concreto, pero sí daña a las plantas y corroe al metal. El cloruro de calcio en soluciones débiles tiene poco efecto químico en el concreto y en la vegetación pero corroe al metal. Se ha demostrado que las soluciones concentradas de cloruro de calcio pueden atacar químicamente al concreto. La reacción se acelera cuando se aumenta la temperatura.\*\* La urea no daña químicamente al concreto, ni a la vegetación ni al metal. El uso de productos descongelantes que contengan nitrato de amonio y sulfato de amonio debe prohibirse estrictamente porque atacan y desintegran rápidamente al concreto.

El grado de descascamiento depende de la cantidad empleada de producto descongelante y de la frecuencia en su aplicación. Las concentraciones de producto descongelante relativamente bajas (del orden de 2 % a 4 % en peso), producen más descascamientos superficiales que las concentraciones mayores o incluso la ausencia de productos descongelantes.†

Los productos descongelantes pueden alcanzar las superficies de concreto de manera distinta a su aplicación directa, como por las salpicaduras de los vehículos y por el goteo de las caras inferiores de los vehículos. El descascamiento es mucho más severo en las áreas pobremente drenadas porque la solución descongelante queda retenida en la superficie del concreto durante la congelación y el deshielo.

La inclusión de aire es efectiva para prevenir el descascamiento de las superficies y se recomienda para todos los concretos que pudieran entrar en contacto con los productos descongelantes. Para proporcionar una durabilidad y una resistencia al descascamiento adecuadas bajo exposiciones severas estando presentes los productos descongelantes, el concreto con aire incluido deberá estar compuesto de materiales durables y tener (1) una relación agua-cemento baja (máximo 0.45), (2) un revenimiento de 10 cm ó menos,†† (3) un contenido de cemento de 335 kg/m<sup>3</sup> ó más, (4) un acabado adecuado luego que el agua de sangrado se haya evaporado de la superficie, (5) un drenaje adecuado con una pendiente de 1 cm por metro lineal o más, (6) un curado húmedo mínimo durante 7 días a 10°C ó arriba de este valor, (7) una resistencia a compresión a 28 días mínima de 280 kg/cm<sup>2</sup>, y (8) un período mínimo de secado de 30 días luego del curado húmedo si el concreto se ha colocado en otoño y va a quedar expuesto a ciclos de congelación-deshielo

\* Referencias 5-31 y 5-37.

\*\* Referencia 5-30.

† Referencia 5-18.

†† Se puede emplear un superplastificante para elevar el revenimiento y la trabajabilidad sin aumentar la relación agua-cemento.

y a productos descongelantes cuando se sature. En la Tabla 5-4 se muestran los contenidos de aire recomendados.

Cuando las temperaturas bajan hasta cerca de los 4°C, puede ser necesario un período de curado de 14 días si se usa cemento normal, Tipo I. Sin embargo, el período de curado requerido se puede reducir a siete días si se usa un cemento de alta resistencia temprana Tipo III o un mayor contenido de cemento en el concreto.

**Secado al aire.** La resistencia del concreto con aire incluido a los ciclos de congelación-deshielo y a los productos descongelantes se eleva notoriamente con el secado al aire luego del curado inicial. Con el secado al aire se remueve la humedad en exceso del concreto, lo que a su vez reduce los esfuerzos internos causados por las condiciones de congelación-deshielo y por los productos descongelantes. Un concreto saturado en agua se deteriora más rápido al quedar expuesto a ciclos de congelación-deshielo y a productos descongelantes que un concreto secado al aire. Los concretos colocados durante la primavera o el verano tienen un período de secado adecuado. Sin embargo, los concretos colocados durante la temporada de otoño a menudo no se secan lo suficiente antes de que sean empleados los productos descongelantes. Esto es especialmente cierto en el caso de los pavimentos colados durante el otoño y que han sido curados con compuestos formadores de membrana. Las membranas permanecen intactas hasta que son desgastadas por el tránsito y por lo tanto se puede dar el caso de que no se tenga un secado adecuado antes de la llegada del invierno. Los métodos de curado que permiten el secado al terminar el período de curado son los preferibles para las pavimentaciones en otoño en todos los proyectos donde se vayan a emplear productos descongelantes. Se deberá permitir al concreto colado durante el otoño un período de secado de al menos 30 días luego del período de curado. La duración exacta para que

tenga lugar un secado apropiado puede variar según la temperatura y las condiciones ambientales.

**Tratamiento de las superficies descascaradas.** Si se presenta descascamiento en la superficie durante la primera temporada de hielo (señal de un inadecuado sistema de vacíos o de prácticas incorrectas de acabado), o si el concreto es de mala calidad, se le puede aplicar al concreto seco algún tratamiento de superficie respirable para ayudar a protegerlo contra daños subsecuentes. El tratamiento a menudo consiste de un sellador que penetre hecho con aceite de linaza,\* silana, siloxana, metacrilato respirable, o con otros materiales. Se deben evitar las formulaciones no respirables porque pueden provocar desprendimientos en láminas.

El efecto que tiene el diseño de la mezcla, el tratamiento a la superficie, el curado, u otras variables sobre la resistencia al descascamiento superficial se puede evaluar con la especificación ASTM C 672.

## Resistencia a los sulfatos

La resistencia del concreto a los sulfatos se ve mejorada con la inclusión de aire porque se aprovecha la reducción en la relación agua-cemento, tal como se muestra en las Figs. 5-4 y 5-5. El concreto con aire incluido elaborado con una relación agua-cemento baja y con un factor de cemento adecuado empleando cemento de bajo contenido de aluminato tricálcico, será resistente al ataque de los suelos y de las aguas sulfatadas.

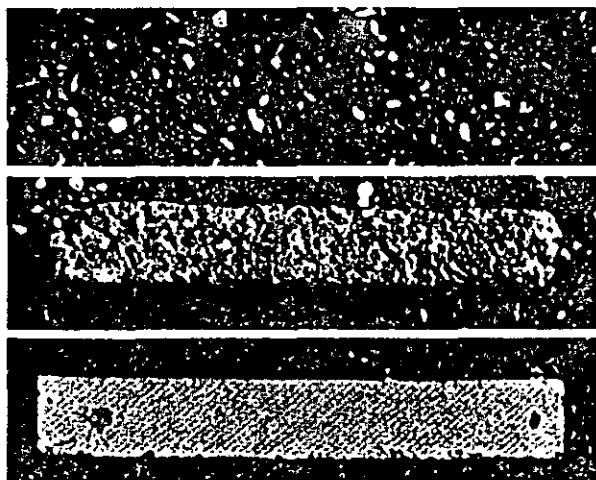
## Resistencia a la reactividad álcali-sílice

La falla por expansión provocada por la reactividad álcali-sílice, se reduce con la inclusión de aire.\*\* Los álcalis del cemento

\* Consulte la Referencia 5-24.

\*\* Referencia 5-7.

Sin aire incluido

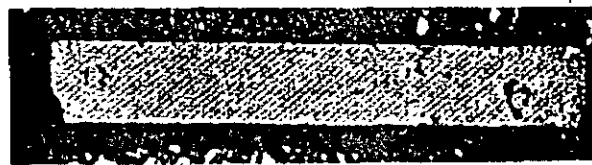


Con aire incluido

222 kg/m<sup>3</sup>



306 kg/m<sup>3</sup>



392 kg/m<sup>3</sup>

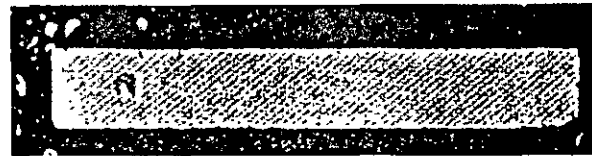


Figura 5-4. Efecto de la inclusión de aire y del contenido de cemento en el comportamiento de especímenes de concreto (con cemento Tipo II) expuestos a un suelo con sulfatos. Los especímenes sin aire incluido elaborados con menores cantidades de cemento se deterioraron extremadamente. Los especímenes elaborados con la mayor cantidad de cemento, y la menor relación agua-cemento, fueron todavía mejorados con la inclusión de aire. Los números indican el contenido de cemento. Cuando se les fotografió, los especímenes tenían 5 años de edad. Referencias 5-4 y 5-22.

reaccionan con la sílice de los agregados reactivos para formar productos de reacción expansivos, lo que provoca que el concreto se expanda. La expansión en extremo hará que el concreto se deteriore y falle. Como se muestra en la Fig. 5-6, la expansión de las barras de mortero hechas con materiales reactivos se reduce conforme aumenta el contenido de aire.

## Resistencia

Cuando el contenido de aire se mantiene constante, la resistencia varía de manera inversa con la relación agua-cemento. La Fig. 5-7 muestra una correlación típica entre la resistencia a la compresión a los 28 días y la relación agua-cemento para un concreto que tiene los porcentajes recomendados de aire incluido. A medida que aumenta el contenido de aire, generalmente se puede mantener la resistencia si se conserva constante la relación vacíos-cemento\*; no obstante, puede ser necesario algún aumento en el contenido de cemento en las mezclas más ricas.

Tanto el concreto con aire incluido como el concreto sin aire incluido pueden ser proporcionados de manera adecuada para suministrar resistencias moderadas similares. Ambos contienen generalmente la misma cantidad de agregado grueso. Cuando el contenido de cemento y el revenimiento se mantienen constantes, la inclusión de aire reduce los requisi-

tos de arena y de agua, como se ilustra en la Fig. 5-8. De esta manera, los concretos con aire incluido pueden tener menores relaciones agua-cemento que los concretos sin aire incluido, lo que a su vez minimiza las reducciones en resistencia que acompañan generalmente a la inclusión de aire. Si se mantiene constante la relación agua-cemento, los aumentos en el contenido de aire reducirán la resistencia en forma proporcional. No obstante, ciertas reducciones en la resistencia pueden ser tolerables en vista de los demás beneficios del aire como la mejora en la trabajabilidad. Las reducciones en la resistencia se vuelven de mayor importancia únicamente en las mezclas de alta resistencia (de mayor contenido de cemento), como se ilustra en la Fig. 5-9. En las mezclas ásperas y de menor contenido de cemento, generalmente aumenta la resistencia gracias a la inclusión de aire en cantidades adecuadas debido a la disminución en la relación agua-cemento y a la mejora en la trabajabilidad. Para los concretos de resistencias moderadas, cada punto porcentual de aire incluido reduce la resistencia a compresión aproximadamente de 2 % a 6 %.\*\* La resistencia real varía y se ve afectada por la fuente de suministro del cemento, por los aditivos, y por otros ingredientes del concreto.†

La adquisición de resistencias altas en el concreto con aire incluido puede ser en ciertas ocasiones difícil de lograr. Aún cuando una reducción en el agua de mezclado se puede asociar con la inclusión de aire, las mezclas con contenidos elevados de cemento necesitan más agua de mezclado que las mezclas con contenidos de cemento bajos; por esto el aumento esperado en la resistencia debido al cemento adicional se compensa en cierta forma con el agua adicional.

## Trabajabilidad

El aire incluido mejora la trabajabilidad del concreto. Resulta efectivo particularmente en las mezclas pobres (de bajo contenido de cemento) que de otra manera serían ásperas y difíciles de trabajar. En un estudio se encontró que una mezcla con aire incluido hecha con agregado natural, con 3 % de aire, y un revenimiento de 4 cm tenía casi la misma trabajabilidad que un concreto sin inclusión de aire con 1 % de aire y un revenimiento de 7.5 cm, a pesar de que se había requerido menos cemento para la mezcla con aire incluido.†† Similarmente, se mejora la trabajabilidad de las mezclas con agregados granulares y pobremente graduados. Gracias a esta mejora en la trabajabilidad, el contenido de agua y de arena se puede reducir de manera muy notoria (Fig. 5-8). Un volumen de concreto con aire incluido necesita menos agua que el mismo volumen de concreto sin aire incluido de igual consistencia y tamaño máximo de agregado. El concreto fresco que contiene aire incluido es cohesivo, se ve y se siente trabajable o grasoso, y se le puede manejar y dar acabado con

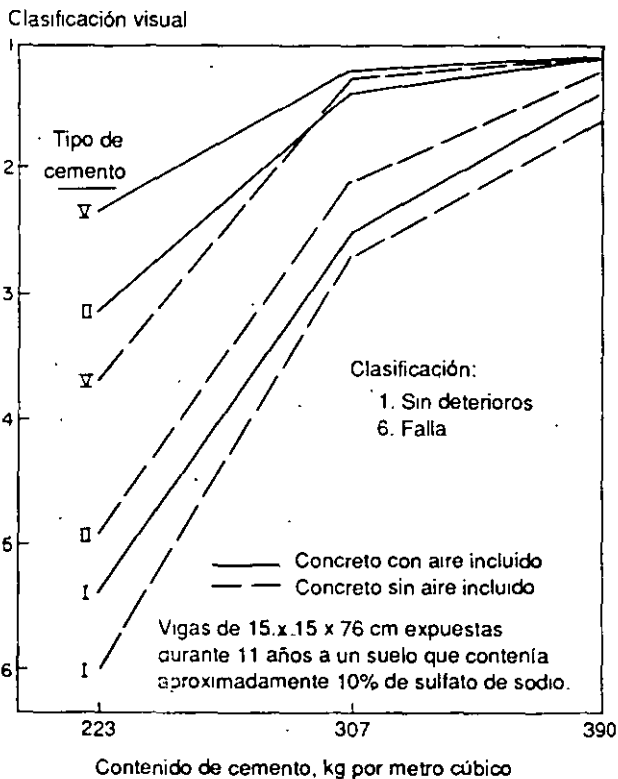


Figura 5-5. Comportamiento de concretos con aire incluido y sin aire incluido expuestos a un suelo con sulfatos según el tipo y el contenido de cemento. La resistencia a los sulfatos se ve incrementada con el uso de cementos Tipo II y Tipo V, con un mayor contenido de cemento, con una menor relación agua-cemento y con la inclusión de aire. Vea la Figura 2-5 y la Referencia 5-36.

\* Aire más agua.

\*\* Referencias 5-11, 5-19, y 5-33.

† La Referencia 5-2 ilustra que un concreto que tenga la misma relación agua-cemento y la misma granulometría de agregados ve reducida su resistencia a compresión a 28 días, en aproximadamente 14 kg/cm<sup>2</sup> por cada punto porcentual que aumente el contenido de aire para un concreto en el rango 210 a 350 kg/cm<sup>2</sup>.

†† Referencia 5-2.

Reducción en la expansión a un año, porciento

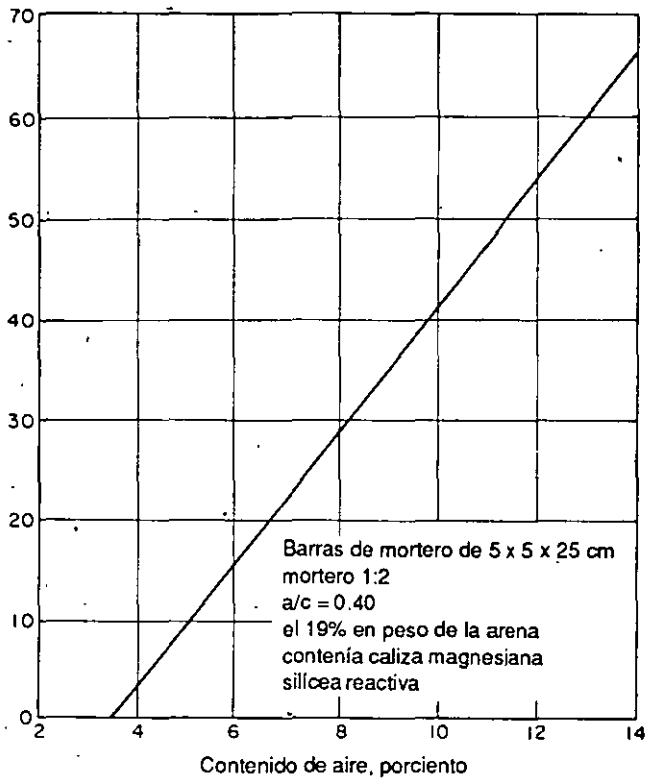


Figura 5-6. Efecto que el contenido de aire tiene en la reducción de la expansión debida a la reacción álcali-silíceo. Referencia 5-7.

facilidad. El aire incluido también reduce la segregación y el sangrado en el concreto fresco recién colocado.

### MATERIALES INCLUSORES DE AIRE

La inclusión de aire en el concreto se puede lograr agregando un aditivo inclusor de aire en la mezcladora, empleando un cemento inclusor de aire, o mediante la combinación de estos métodos. Sin importar el método empleado, es preciso contar siempre con un control y seguimiento adecuados para asegurar el contenido de aire.

Comercialmente se dispone de numerosos aditivos inclusores de aire fabricados a partir de una gran variedad de materiales. La mayoría de los aditivos inclusores de aire consisten generalmente en uno o más de los materiales siguientes: resina de madera (resina Vinsol), hidrocarburos sulfonados, ácidos grasos y resinosos, y materiales

Resistencia a la compresión,  $\text{kg/cm}^2$

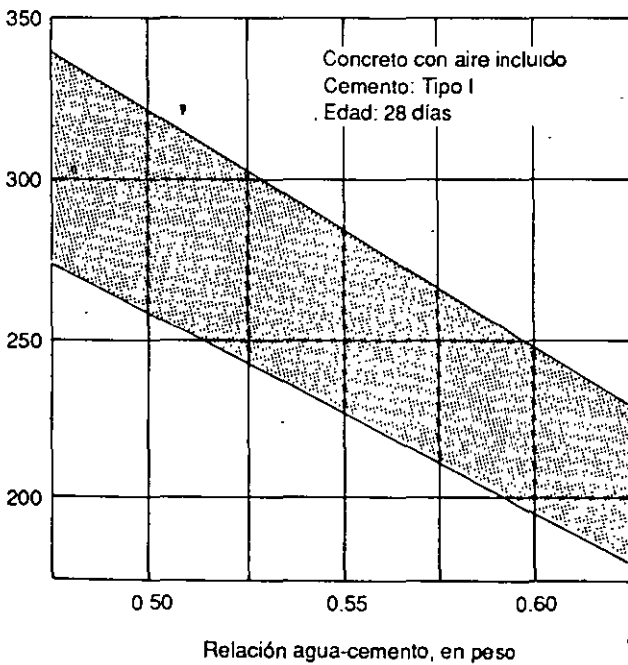
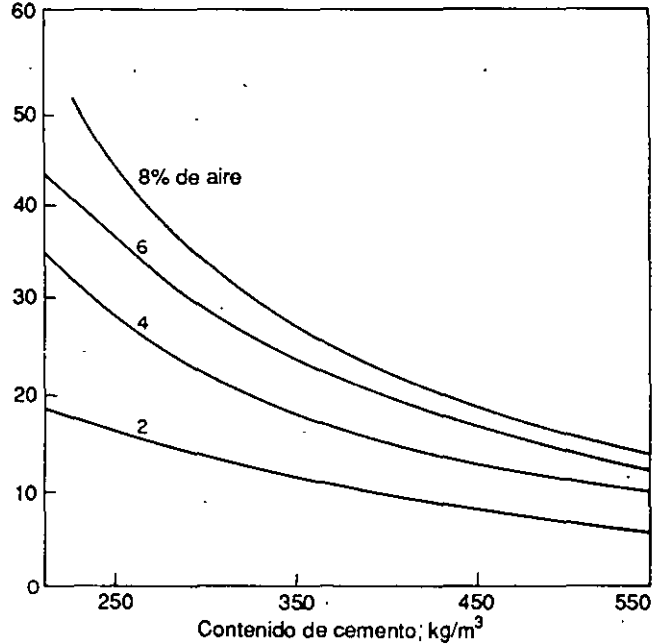


Figura 5-7. Relación típica entre la resistencia a compresión a 28 días y la relación agua-cemento para una amplia variedad de concretos con aire incluido usando cemento Tipo I.

Reducción de agua,  $\text{Kg por m}^3$



Reducción de arena, litros por  $\text{m}^3$

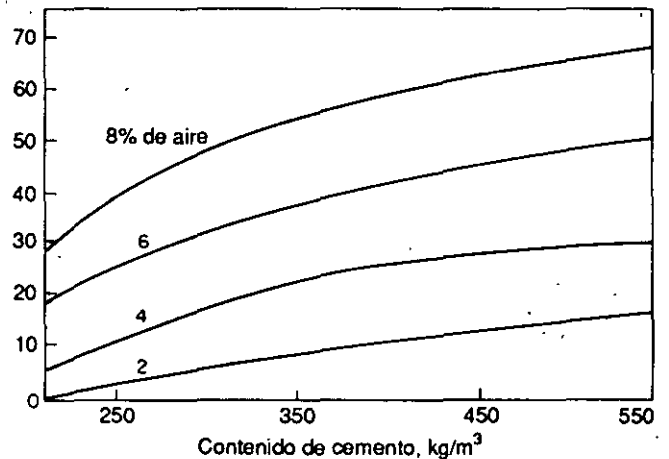


Figura 5-8. Reducciones en los contenidos de agua y de arena obtenidas a distintos niveles de contenidos de aire y de cemento. Referencia 5-20.

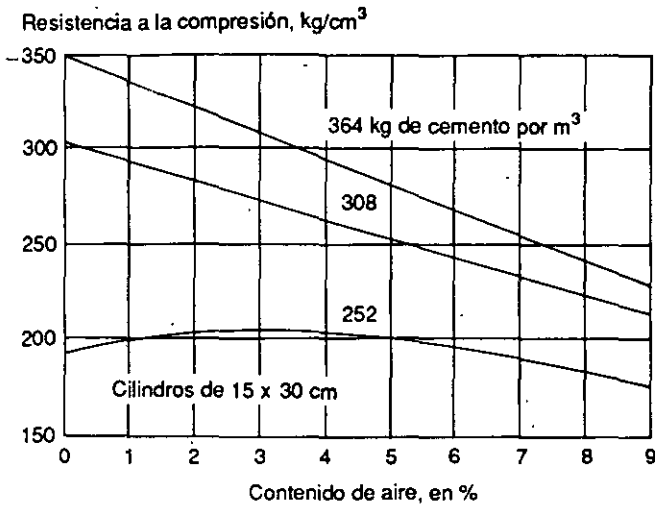


Figura 5-9. Relación entre el contenido de aire y la resistencia a compresión a 28 días para concretos con tres contenidos de cemento constantes. El contenido de agua se redujo aumentando el contenido de aire para conservar el mismo revenimiento. Referencia 5-2.

sintéticos. Normalmente los aditivos inclusores de aire son líquidos y no se debe dejar que se congelen. Dichos aditivos, agregados en la mezcladora, deben cubrir la norma ASTM C 260.

Los cementos inclusores de aire deben cumplir las especificaciones en las normas ASTM C 150 y C 595. Para producir tales cementos, durante su manufactura se muelen junto con el clínker del cemento adiciones inclusoras de aire acordes con la norma ASTM C 226. Los cementos inclusores de aire generalmente proporcionan una cantidad adecuada de aire incluido para cubrir la mayoría de requisitos de trabajo; sin embargo, probablemente no se pueda obtener en el concreto un cierto contenido especificado de aire. Si se ha incluido un volumen de aire insuficiente, también podría ser necesario agregar algún agente inductor de aire en la mezcladora.

Cada uno de estos métodos tiene ciertas ventajas. En los trabajos donde no es práctico un control cuidadoso, los cementos inclusores de aire son especialmente útiles para asegurarse que siempre se obtenga una porción importante del contenido de aire requerido. Eliminan la posibilidad de algún error humano o mecánico al agregar el aditivo durante la dosificación. Con los aditivos inclusores de aire, el volumen de aire incluido puede ajustarse fácilmente para satisfacer las condiciones del trabajo cambiando la cantidad de aditivo al agregarlo en la mezcladora.

Se pueden esperar variaciones en el contenido de aire de acuerdo con las variaciones en las proporciones de los agregados y la granulometría, tiempo de mezclado, temperatura, y revenimiento. Cuando se usa un aditivo inductor de aire, el orden al dosificar y mezclar los ingredientes del concreto tiene una influencia muy importante en cuanto a la cantidad de aire incluido; por lo tanto, para mantener un control adecuado se necesita tener una cierta estabilidad al dosificar.

Cuando la cantidad de aire incluido es excesiva, se puede reducir empleando alguno de los diversos agentes para retirar

espuma (exclusores de aire) como lo son el fosfato tributilo, ftalato dibutilo, alcohol octilo, los ésteres insolubles en agua del ácido carbónico y del ácido bórico, y los silicones.\* Para reducir el contenido de aire hasta los límites especificados sólo se debe hacer uso de la menor dosificación posible de agente despumante. Las cantidades en exceso podrían tener efectos adversos en las propiedades del concreto.

## FACTORES QUE AFECTAN EL CONTENIDO DE AIRE

### Cemento

Dentro del rango normal de los contenidos de cemento, a medida que aumenta el contenido de cemento, el contenido de aire disminuye si se cuenta con una dosificación fija de aditivo inductor de aire por unidad de cemento (vea la Fig. 5-10). Al variar de 240 a 350 kg de cemento por metro cúbico, la razón de dosificación podría llegar a duplicarse para mantener un contenido de aire constante. Sin embargo, algunos estudios indican que cuando esto se hace, el factor de espaciamiento de vacíos normalmente disminuye con el aumento en el contenido de cemento; y para un contenido de aire dado aumenta la superficie específica, mejorando así la durabilidad.

Un aumento en la finura del cemento dará como resultado una disminución en la cantidad de aire incluido. El cemento Tipo III, un material muy fino, podría necesitar hasta el doble de la cantidad de agente inductor de aire requerida para un cemento Tipo I de finura normal.

Los cementos con alto contenido de álcalis tal vez incluya más aire que los cementos de bajo contenido de álcalis con la misma cantidad de material inductor de aire. Para lograr obtener un contenido de aire equivalente, un cemento con bajo contenido de álcalis podría requerir una cantidad extra de agente inductor de aire de 20 % a 40 % (y en ocasiones hasta de 70 %). Por lo anterior, es necesario tomar precauciones cuando se emplea más de una fuente de cemento en una planta dosificadora y asegurarse que se han determinado los requisitos de aditivo adecuados para cada cemento.\*\*

### Agregado grueso

El tamaño del agregado grueso tiene un efecto pronunciado en el contenido de aire en el concreto, ya sea que éste tenga o no aire incluido, como se muestra en la Fig. 5-10. Cuando el tamaño del agregado aumenta por encima de aproximadamente 38 mm (1.5 pulg), ocurre poca variación en el contenido de aire. Para tamaños de agregado menores, si se tiene una proporción constante de dosificación de aditivo, el contenido de aire aumenta severamente a medida que el tamaño del agregado disminuye de 38 mm (1.5 pulg) debido al mayor aumento en el volumen de mortero.

\* Referencia 5-33, apéndice, pág. 106.

\*\* Referencia 5-28.



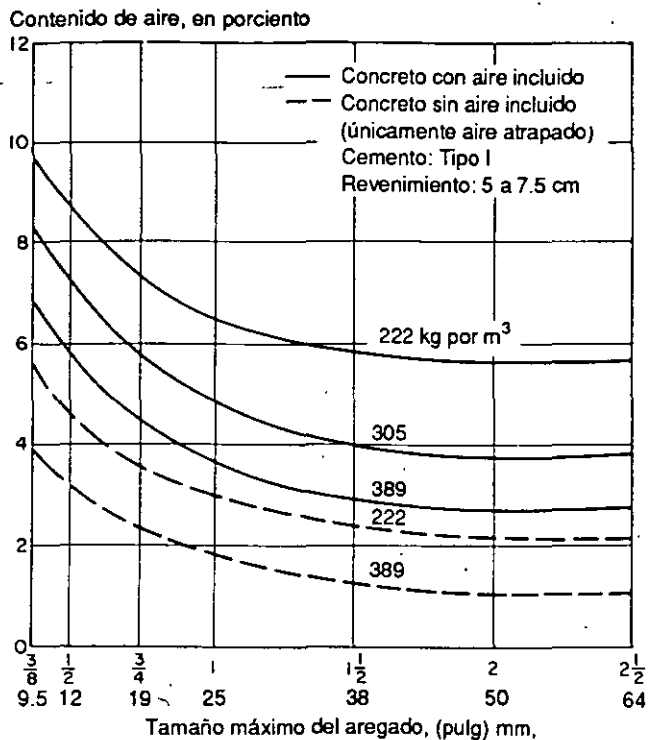


Figura 5-10. Relación entre el tamaño del agregado, el contenido de cemento, y el contenido de aire del concreto. La dosificación de aditivo inclusor de aire por unidad de cemento fue constante para el concreto con aire incluido. Fuente: PCA Major Series 336.

### Agregado fino

El contenido de agregado fino de una mezcla afecta el porcentaje de aire incluido. Como se muestra en la Fig. 5-11, el aumento de la cantidad de agregado fino provoca la inclusión de más aire para una cantidad dada de cemento inclusor de aire o de aditivo (también se atrapa más aire en un concreto sin aire incluido).

Las partículas de agregado fino que pasan de la malla de 0.60 mm (No. 30) a la de 0.15 mm (No. 100) incluyen más aire que las partículas muy finas o más gruesas. El material que pasa la malla de 0.15 mm (No. 100) en cantidades apreciables producirá como resultado una reducción considerable en el aire incluido.

Los agregados finos procedentes de distintas fuentes pueden incluir diferentes cantidades de aire aún cuando tengan granulometrías idénticas. Esto se puede deber a las diferencias en cuanto a su forma y textura superficial o a la contaminación en pequeñas cantidades de materiales orgánicos.

### Agua de mezclado y revenimiento

Con el aumento en el agua de mezclado se aprovecha más agua para la generación de burbujas de aire, de este modo se incrementa el contenido de aire, y además los revenimientos aumentan hasta cerca de 15 a 18 cm. Un aumento en la relación agua-cemento de 0.4 a 1.0 puede elevar el contenido de aire en cuatro puntos porcentuales. Una porción en el incremento de aire se debe a la relación entre el revenimiento y el contenido de aire. (El contenido de aire aumenta con el

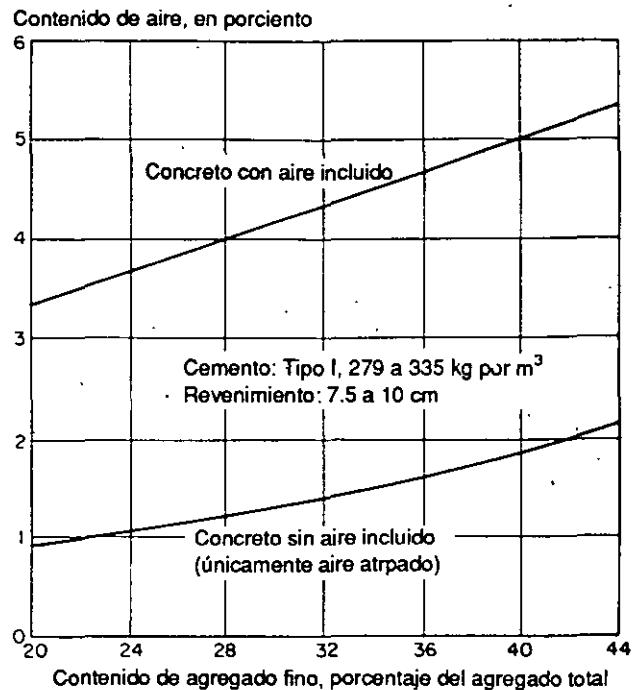


Figura 5-11. Relación entre el porcentaje de agregado fino y el contenido de aire del concreto. Fuente: PCA Major Series 336.

revenimiento aún cuando se mantenga constante la relación agua-cemento.) El factor de espaciamento, L, del sistema de vacíos de aire aumenta, es decir, los vacíos se vuelven más grandes con mayores relaciones agua-cemento, reduciendo con ello la durabilidad del concreto a la congelación-deshielo.\*

La adición de cinco litros de agua por metro cúbico de concreto puede aumentar el revenimiento en 2.5 cm aproximadamente. Un incremento de 2.5 cm en el revenimiento eleva el contenido de aire en aproximadamente de medio a un punto porcentual en los concretos con un revenimiento bajo a moderado y con dosificación constante de aditivo inclusor de aire. Sin embargo, esta aproximación se modifica severamente con la temperatura del concreto, con el revenimiento, y con el tipo y la cantidad de cemento y aditivos presentes en el concreto. Un concreto de revenimiento bajo con una dosificación elevada de aditivos reductores de agua e inclusores de aire puede experimentar fuertes aumentos en el revenimiento y en el contenido de aire con una pequeña adición de agua. Por otro lado, una mezcla de concreto muy fluída (con revenimiento de 20 a 25 cm) puede perder aire con la adición de agua. Para mayor información, refiérase a las Tablas 5-1 y 5-2.

El agua de mezclado empleada también puede afectar el contenido de aire. Las aguas contaminadas con algas aumentan el contenido de aire. Las aguas de enjuague fuertemente alcalinas provenientes de los camiones mezcladores también pueden ser causa de problemas. El efecto de la dureza del agua en la mayoría de suministros municipales generalmente es insignificante; sin embargo, las aguas muy duras pueden disminuir el contenido de aire en el concreto.

\* Referencia 5-38.

## Revenimiento y vibración

El efecto que el revenimiento y la vibración tienen en el contenido de aire del concreto se muestra en la Fig. 5-12. Para una cantidad constante de aditivo inclusor de aire, el contenido de aire aumenta a medida que el revenimiento aumenta hasta cerca de 15 a 18 cm y luego comienza a disminuir con los subsecuentes incrementos en el revenimiento. Sin embargo, en todos los revenimientos, aún 15 segundos de vibración causarían una considerable reducción en el contenido de aire. Se deberá evitar una vibración prolongada en el concreto.

Entre mayor sea el revenimiento, el contenido de aire, y el tiempo de vibración, mayor será el porcentaje de reducción de contenido de aire durante la vibración (vea la Figura 5-12). Sin embargo, si el vibrado se aplica adecuadamente, se pierde poco aire intencionalmente incluido. El aire perdido durante el manejo del concreto y su vibración moderada consiste principalmente de burbujas de gran tamaño que son indeseables desde el punto de vista de resistencia y durabilidad. El tamaño promedio de los vacíos de aire se reduce y el factor de espaciamiento de los vacíos permanece relativamente constante.

Los vibradores internos reducen más el contenido de aire que los vibradores externos. La pérdida de aire por vibración aumenta a medida que el volumen de concreto se reduce o se hace aumentar de manera importante la frecuencia de vibración. También las frecuencias de vibración bajas (8,000 vpm) tienen un menor efecto en los factores de espaciamiento y en los contenidos de aire que las frecuencias elevadas de vibración (14,000 vpm). Las frecuencias elevadas pueden aumentar significativamente los factores de espaciamiento y disminuir los contenidos de aire luego de 20 segundos de vibración.\*

## Temperatura del concreto

La temperatura del concreto influye en el contenido de aire, tal como se muestra en la Figura 5-13. Si la temperatura del concreto aumenta, se incluye menos aire, particularmente a medida que aumenta el revenimiento. Este efecto es especialmente importante durante los colados en clima cálido que es cuando el concreto puede tener una temperatura elevada. Cuando sea necesario, la disminución en el contenido de aire puede compensarse aumentando la cantidad de aditivo inclusor de aire.

En los colados en clima frío, el aditivo inclusor de aire puede perder algo de su efectividad si se usa agua caliente durante la dosificación. Para compensar esta pérdida, los aditivos se deberán agregar a la revoltura luego de que se haya equilibrado la temperatura del concreto.

A pesar de que la elevada temperatura del concreto durante el mezclado generalmente reduce el volumen de aire, el factor de espaciamiento y la superficie específica sólo son afectados muy ligeramente.

## Aditivos y agentes colorantes

La ceniza volante, los agentes colorantes como el negro de humo u otros materiales finamente divididos normalmente disminuyen la cantidad de aire incluido para una cantidad de

Contenido de aire, en porcentaje

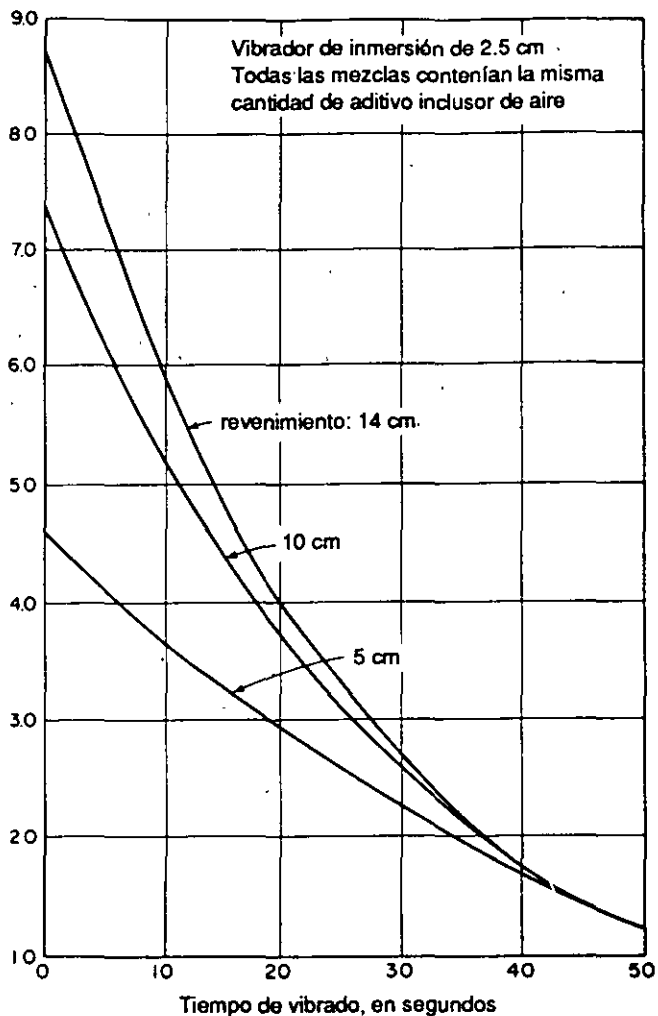


Figura 5-12. Relación entre el revenimiento, la duración de vibrado, y el contenido de aire del concreto. Referencia 5-6.

aditivo.\*\* Esto es especialmente cierto con los materiales con porcentajes elevados de carbono.

Los aditivos reductores de agua y retardantes del fraguado generalmente aumentan la eficiencia de los aditivos inclusores de aire de 50 % a 100 %; por lo tanto, cuando se emplean, una menor cantidad de aditivo inclusor de aire dará habitualmente el contenido de aire deseado. También, el tiempo de adición de estos aditivos en la mezcla afecta a la cantidad de aire incluido, aumentando generalmente las adiciones demoradas el contenido de aire.

Los retardantes de fraguado pueden aumentar el espaciamiento de los vacíos en el concreto. Ciertos aditivos reductores de agua o retardantes de fraguado no son compatibles con algunos agentes inclusores de aire. Si se agregan juntos al agua de mezclado antes de ser introducidos en la mezcladora, pueden formar un precipitado. Este se sedimentará y se producirán grandes reducciones en la can-

\* Referencias 5-6 y 5-38.

\*\* Referencia 5-5.

**Tabla 5-2. Efecto de diseño de la mezcla y de los componentes del concreto en el control del contenido de aire en el concreto**

Tipo de componente	Efectos en el		Acción correctiva
	Contenido de aire	Sistema de vacíos	
Acelerantes	El cloruro de calcio aumenta el contenido de aire. Otros tipos tienen poco efecto	Desconocido	Disminuya el AIA* cuando se emplee cloruro de calcio
Composición del cemento	Una mayor finura (Tipo III) requiere de más AIA. Los álcalis aumentan el contenido de aire	Efectos no bien definidos	Emplee de 50% a 100% más de AIA para el Tipo III. Disminuya la dosificación de AIA de 20% a 40% para contenidos elevados de álcalis
Contaminantes en el cemento	Los aceites oxidados aumentan el contenido de aire. Los aceites sin oxidar disminuyen el contenido de aire	Poco efecto aparente	Obtenga una certificación del cemento. Pruebe para buscar contaminantes si se llega a tener problemas
Contenido de cemento en el diseño de la mezcla	Disminuye conforme aumenta el cemento	Vacíos de menor tamaño y mayor número conforme aumenta el contenido de cemento	Aumente el AIA en un 50% por cada incremento de 120 kg de cemento por metro cúbico. Aumente el AIA 10 veces o más para las mezclas muy ricas, de bajo revenimiento
Agregado grueso	Disminuye conforme aumenta el tamaño máximo del agregado. Los finos de trituración en el agregado grueso disminuyen el contenido de aire	Poco efecto	No se necesita ninguna corrección puesto que el aire requerido disminuye con el aumento en el tamaño de agregado. Mantenga el porcentaje de finos debajo del 4%
Agregado fino	Aumenta con el aumento en el contenido de arena. Las impurezas orgánicas pueden elevar o disminuir el contenido de aire	La textura superficial puede afectar la superficie específica de los vacíos	Disminuya el AIA a medida que aumente el contenido de arena. Revise la arena de conformidad con la norma ASTM C 40 antes de aceptarla
Ceniza volante	Una alta pérdida por ignición o un alto contenido de carbono provocan que descienda el contenido de aire. La finura de la ceniza puede tener un cierto efecto	Poco efecto	Aumente el AIA. Puede requerir hasta 5 veces más con una ceniza de alto carbono. La prueba del Índice de Espuma es un útil procedimiento de revisión. La reducción de aire si ocurre un periodo prolongado de mezclado (90 minutos) puede ser considerable con cenizas de alto carbono. Agregue más AIA
Contaminantes en el agua de mezclado	El agua de enjuague de los camiones mezcladores disminuye el aire. Una dureza extremada en el agua puede hacer disminuir el aire. Las algas aumentan el aire	Desconocido	Ensaye los suministros de agua para verificar las algas y otros contaminantes antes de aceptarlos
Pigmentos	Los pigmentos basados en el negro de humo y en el óxido de hierro negro pueden absorber a los AIA y deprimir el contenido de aire	Desconocido	Pruebe antes los pigmentos con los materiales para la obra
Revenimiento	Aumenta de 0.5 a 1 punto porcentual por cada 2.5 cm de incremento para los revenimientos hasta 15 a 18 cm, a partir de allí los revenimientos más altos producen una disminución en el aire	Se vuelve más grande conforme aumentan los revenimientos	Reduzca la dosificación de AIA
Superplastificantes (Reductores de agua de alto rango)	Los materiales basados en melaminas pueden reducir el aire o tener un efecto poco apreciable. Los materiales basados en naftalinas y en lignosulfonatos aumentan el contenido de aire. Las mezclas notoriamente fluidas pueden perder aire	Produce sistemas con vacíos de mayor tamaño. Los factores de espaciamiento aumentan	Emplee menos AIA con las naftalinas. De ser posible, especifique un mayor contenido de aire de 1% a 2%
Contenido de agua en el diseño de la mezcla	Aumenta con el aumento de agua aproximadamente de medio a un punto porcentual por cada 5 litros de agua. Las mezclas fluidas experimentan pérdida de aire	Se vuelve de mayor tamaño cuando se tienen contenidos de agua elevados	Disminuya el AIA en conformidad
Reductores de agua, retardantes	Los lignosulfonatos aumentan el contenido de aire. Otros tipos tienen menores efectos	A dosis elevadas, los factores de espaciamiento aumentan	Disminuya de 50% a 90% el AIA por la presencia de lignosulfonatos, especialmente a temperaturas bajas. Reduzca el AIA de 20% a 40% para otros tipos. No mezcle los aditivos antes de dosificar

\* Aditivo inclusor de aire

Referencia 5-33

Nota: La información de la tabla probablemente no sea aplicable en todas las situaciones

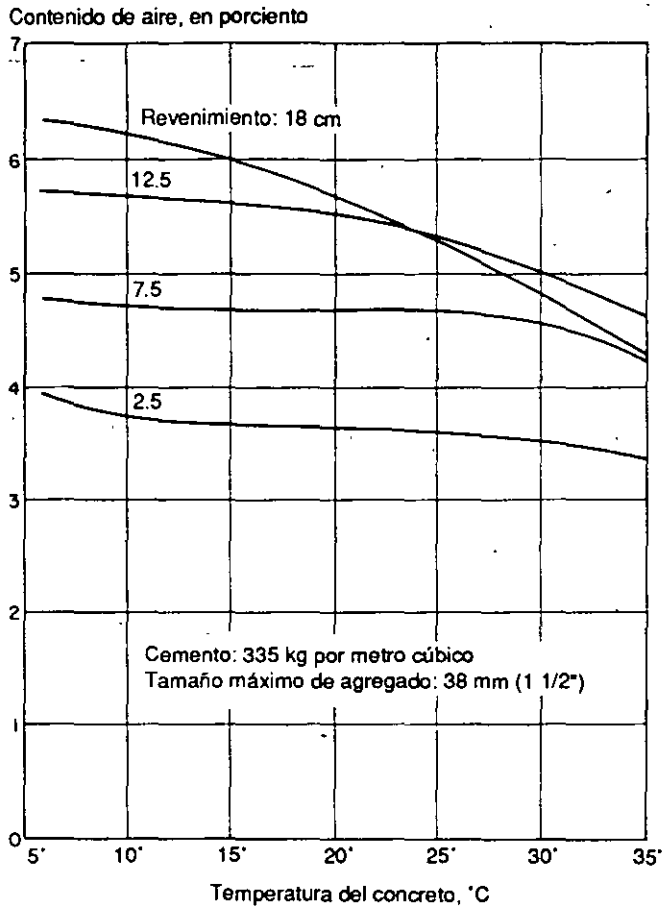


Figura 5-13. Relación entre la temperatura, el revenimiento, y el contenido de aire del concreto. Fuente: PCA Major Series 336 y Referencia 5-22.

cantidad de aire incluido. El hecho de que los aditivos individuales interactúen de esta manera no significa que no serán totalmente efectivos si se surten separadamente en una mezcla de concreto.

Los superplastificantes (reductores de agua de alto rango) pueden elevar o disminuir el contenido de aire en una mezcla de concreto con base en la formulación química del aditivo y al revenimiento del concreto. Los superplastificantes que tienen como base a la naftalina tienden a aumentar el contenido de aire, mientras que los materiales que tienen como base a la melamina pueden disminuir o tener poco efecto en el contenido de aire. La pérdida normal de aire en el concreto fresco durante su mezclado y transporte es de aproximadamente 1.5 puntos porcentuales.†

Los superplastificantes también afectan las características del sistema de vacíos de aire del concreto endurecido aumentando el tamaño general de los vacíos de aire incluido. Esto resulta en un factor de espaciamiento mayor de lo normal, ocasionalmente mayor de lo que podría considerarse como deseable para la durabilidad a congelación-deshielo. Sin embargo, las pruebas en los concretos con superplastificantes cuyos factores de espaciamiento son ligeramente mayores han indicado que estos concretos poseen una buena durabilidad a la congelación-deshielo. Esto puede deberse a

la reducida relación agua-cemento frecuentemente asociada con los concretos con superplastificantes.

En los climas fríos a veces se utiliza una pequeña cantidad de cloruro de calcio para acelerar el endurecimiento del concreto. Se puede emplear exitosamente con aditivos inclusores de aire si se agrega por separado en forma de solución al agua de mezclado. El cloruro de calcio aumentará ligeramente el contenido de aire. Sin embargo, si el cloruro de calcio entra en contacto directo con ciertos aditivos inclusores de aire, puede ocurrir una reacción química que disminuya la efectividad del aditivo. Los acelerantes que no contienen cloruros pueden elevar o disminuir el contenido de aire, dependiendo de la química individual del aditivo, aunque generalmente tienen un efecto mínimo en el contenido de aire.

### Efecto del mezclado

El mezclado es uno de los factores más importantes en la producción de aire incluido en el concreto. Una distribución uniforme de los vacíos de aire incluido es esencial para producir un concreto resistente al descascaramiento; su falta de uniformidad podría ser resultado de una dispersión inadecuada del aire incluido durante el mezclado. En la producción de concreto premezclado, es especialmente importante que semantenga siempre un mezclado consistente y adecuado.

La cantidad de aire incluido varía con el tipo y estado de la mezcladora, con la cantidad de concreto que se está mezclando, y con la velocidad y duración del mezclado. La cantidad de aire incluido en una mezcla disminuirá apreciablemente si las aspas de la mezcladora se han desgastado o si se permite que el concreto endurecido se acumule en el tambor o en las aspas. Debido a las diferencias en el mezclado y en su duración, los concretos hechos en una mezcladora estacionaria y los hechos en un camión mezclador pueden diferir en forma importante en sus cantidades de aire incluido. El contenido de aire puede elevarse o disminuir cuando el tamaño de la revoltura se desvíe significativamente de la capacidad estimada de la mezcladora. En una mezcladora de gran capacidad, se incluirá poco aire en las revolturas muy pequeñas; sin embargo, el contenido de aire aumentará a medida que se alcance la capacidad de la mezcladora.

La Fig. 5-14 muestra el efecto que tienen la velocidad y duración de mezclado sobre el contenido de aire de los concretos frescos hechos en un camión mezclador. Generalmente se incluye más aire a medida que la velocidad de mezclado se aumenta hasta 20 rpm, más allá de la cual disminuye la inclusión de aire. En las pruebas de las cuales se derivaron los datos expuestos en la Fig. 5-14, el contenido de aire alcanzó un límite superior durante el mezclado y se produjo una disminución gradual en el contenido de aire con un mezclado prolongado. El tiempo y la velocidad de mezclado tienen diferentes efectos sobre los contenidos de aire en mezclas distintas. Se pueden perder cantidades importantes de aire durante el mezclado con algunas mezclas y con ciertos tipos de equipo de mezclado.\*

\*Referencia 5-33.

\*\* Para mayor información, consulte las Referencias 5-9 y 5-22.

La Figura 5-15 muestra el efecto de la agitación continua de la mezcladora en el contenido de aire. Los cambios en el contenido de aire con una agitación prolongada se pueden explicar por la relación que existe entre el revenimiento y el contenido de aire. Para concretos con revenimientos elevados, el contenido de aire aumenta con la agitación continua conforme disminuye el revenimiento hasta cerca de 15 ó 18 cm. La agitación prolongada hará descender aún más al revenimiento y también al contenido de aire. Para revenimientos iniciales menores que 15 cm, tanto el contenido de aire como el revenimiento disminuyen con la agitación continua. Cuando el concreto se retempla (es decir, se le agrega agua y se remezcla para restituirle su revenimiento original), el contenido de aire aumenta; sin embargo, pasadas 4 horas, el retemplado es ineficaz para elevar el contenido de aire. El mezclado o la agitación del concreto prolongados van acompañados por una progresiva reducción en el revenimiento.

## Transporte y manejo

Generalmente se pierde una cierta cantidad de aire, de aproximadamente 1 a 2 puntos porcentuales, durante el transporte del concreto de la mezcladora a la obra. El contenido de aire durante el transporte se ve afectado por diversas variables, incluyendo el tiempo de transporte, la cantidad de agitación o de vibración durante el transporte, la temperatura, revenimiento, retemplado y los ingredientes del concreto.

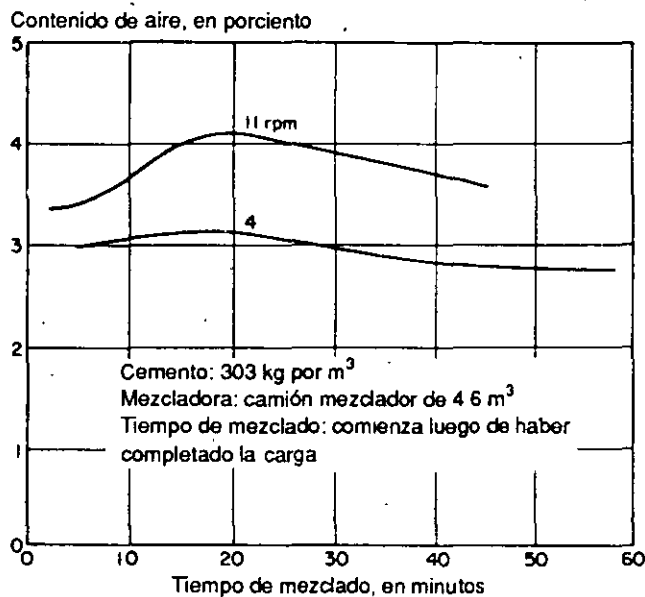


Figura 5-14. Relación entre el tiempo de mezclado y el contenido de aire del concreto. Fuente: PCA Major Series 336.

Una vez en la obra, el contenido de aire del concreto permanece constante durante su manejo si éste se realiza mediante descarga en canaleta, grúa y bote, carretilla, vagón de volteo, y pala. Sin embargo, el bombeo del concreto y el manejo de concreto con banda transportadora a grandes distancias pueden provocar la pérdida de algo de aire, especialmente en las mezclas con alto contenido de aire. Se sabe que las bombas de concreto llegan a causar una pérdida de hasta 2.5 puntos porcentuales de aire.\*

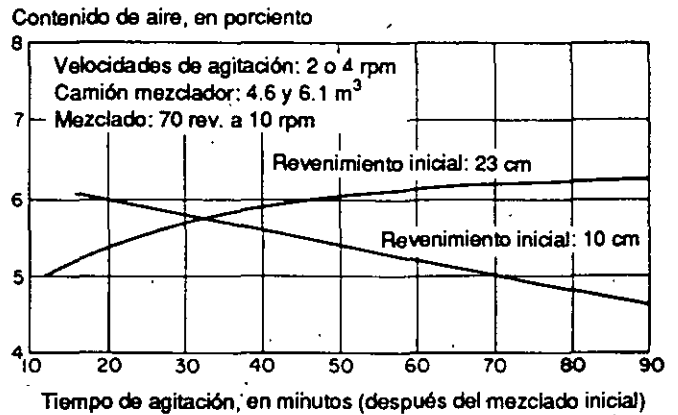


Figura 5-15. Relación entre el tiempo de agitación, el contenido de aire, y el revenimiento del concreto. Fuente: PCA Major Series 336.

## Acabados prematuros

Las prácticas correctas de enrasado, aplanado y deacabado en general no deberían afectar el contenido de aire. Sin embargo, las operaciones de acabado prematuras pueden reducir la cantidad de aire incluido en la región superficial convirtiendo así a la superficie de concreto vulnerable al descascaramiento. También un acabado excesivo puede ser causa de pérdidas de aire incluido en la superficie.

## PRUEBAS PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE AIRE

Se dispone de cuatro métodos para determinar el contenido de aire en el concreto fresco. A pesar de que sólo miden el volumen de aire y no las características de los vacíos de aire, se ha demostrado mediante pruebas de laboratorio que estos métodos casi siempre son indicativos respecto a la suficiencia del sistema de vacíos.

Para efectos de control de rutina se deberán realizar regularmente pruebas de recepción de contenido de aire en el concreto fresco. Las muestras se deberán obtener y ensayar de acuerdo con la norma ASTM C 172. Además, debido a los efectos del manejo, colocación y vibrado, se deberán tomar muestras para determinar el contenido de aire luego de que el concreto se haya colado y consolidado.

A continuación se presentan los métodos para determinar el contenido de aire del concreto fresco:

1. Método de presión (ASTM C 231, Método estándar de prueba para determinar el contenido de aire del concreto fresco por el método de presión) - aplicable para el ensaye en el campo de todos los concretos exceptuando a los hechos con agregados ligeros y sumamente porosos.
2. Método volumétrico (ASTM C 173, Método estándar de prueba para determinar el contenido de aire del concreto fresco por el método volumétrico) - aplicable para el ensaye en el campo de todos los concretos, y especialmente útil para los concretos hechos con agregados ligeros

\*\* Referencia 5-33.

**Tabla 5-3. Efecto de los procedimientos de producción, de las prácticas constructivas, y del medio ambiente sobre el control del contenido de aire en el concreto.**

Variable	Efectos	Acción correctiva
Medición del aditivo	El grado de precisión y la confiabilidad del sistema de medición afectará la uniformidad en el contenido de aire	Evite los sistemas surtidores manuales de caída de gravedad, y los contadores de tiempo. Son preferibles los dispositivos de desplazamiento positivo. Establezca un programa frecuente de mantenimiento y calibración
Secuencia de dosificación	La dosificación simultánea reduce el aire	Evite la adición del AIA* con la lechada
	La adición tardía del AIA aumenta el aire	No dosifique el AIA sobre el cemento. Mantenga uniformidad en cuanto a la secuencia de dosificación
Consolidación	El contenido de aire disminuye si se aplican vibraciones prolongadas o frecuencias muy altas	No vibre en exceso. Evite los vibradores de alta frecuencia. Evite múltiples pasadas con las plantillas vibratorias
Acabado	El contenido de aire se reduce en la capa superficial como consecuencia de un acabado excesivo	Evite dar acabado cuando se tenga agua de sangrado en la superficie. Evite acabados en exceso. No riegue agua en la superficie antes de dar el acabado
Tiempo de descarga	Las descargas largas reducen el contenido de aire, especialmente en los climas cálidos	Optimice los horarios de entrega. Mantenga las temperaturas del concreto dentro de los rangos recomendados
Capacidad de la mezcladora	El contenido de aire aumenta a medida que se alcanza la capacidad	Trabaje con la mezcladora a una capacidad cercana a la total; evite sobrecargarla, límpiela con frecuencia
Velocidad de mezclado	El contenido de aire aumenta hasta llegar a aproximadamente 20 rpm. Disminuye a mayores velocidades	Evite velocidades altas en las revolventoras
Tiempo de mezclado	En las mezcladoras centrales el aire aumenta conforme se llega a los 90 segundos. En los camiones mezcladores el aire aumenta conforme llega a 10 minutos. El contenido de aire comienza a disminuir luego de haber alcanzado el tiempo óptimo de mezclado	Establezca un tiempo de mezclado óptimo para cada mezcladora en particular. Evite mezclar en exceso
Retemplado	El contenido de aire aumenta después del retemplado. No resulta efectivo más allá de 4 horas	Retemple sólo lo suficiente para restaurar la trabajabilidad. Evite adicionar agua en exceso
Temperatura	El contenido de aire disminuye con los aumentos de temperatura	Aumente la dosificación de AIA conforme se eleve la temperatura
Transporte	Normalmente se pierde una cierta cantidad de aire (de 1% a 2%) durante el transporte. Se pierde aire con el bombeo y con las bandas transportadoras, especialmente si se tienen contenidos de aire elevados	Evite contenidos elevados de aire en los concretos bombeables. No use tuberías de aluminio, ni camiones de volteo

\* Aditivo inclusor de aire  
Referencia 5-33

Nota: La información de la tabla probablemente no sea aplicable en todas las situaciones

y porosos. Cuando se emplean agregados mayores de 5 cm, se deberán remover manualmente y se deberá calcular el efecto de su remoción al llegar al contenido total de aire.

- Método gravimétrico (ASTM C 138, Método estándar de prueba para determinar peso volumétrico, el rendimiento, y el contenido de aire [gravimétrico] del concreto) - requiere del conocimiento exacto de la densidad relativa y de los volúmenes absolutos de los ingredientes del concreto. No es práctico para campo pero en el laboratorio se puede emplear satisfactoriamente.
- Indicador de aire Chace (AASHTO T 199, Método estándar de prueba para determinar el contenido de aire del concreto fresco por medio del indicador Chace) es una manera muy simple y económica para verificar el contenido aproximado de aire en un concreto fresco. Se efectúa por medio de un aparato de bolsillo que prueba una muestra de mortero del concreto. *Sin embargo, esta prueba no sustituye a los métodos de mayor grado de exactitud como lo son el de presión, volumétrico, y gravimétrico.*

La prueba del índice de espuma se puede emplear para medir el contenido necesario relativo de aditivo inclusor de aire en los concretos que contienen combinaciones de cemento-ceniza volante.\*

Las características de los vacíos de aire en el concreto endurecido se pueden determinar por medio de los métodos ASTM C 457. Esta prueba se usa para determinar el factor de espaciamiento de los vacíos, la superficie específica del aire incluído, y el número de vacíos por cm lineal de sección transversal.

Consulte el Capítulo 14 para obtener más información sobre las pruebas que se utilizan para determinar el contenido de aire.

\* Referencia 5-35.

## CONTENIDOS DE AIRE RECOMENDADOS

La cantidad de aire que se llega a emplear en el concreto con aire incluido depende de: (1) tipo de estructura, (2) condiciones climáticas, (3) número de ciclos de congelación y deshielo, (4) grado de exposición a los productos descongelantes, y (5) grado de exposición a los sulfatos u otros productos químicos agresivos existentes en el suelo o en las

**Tabla 5-4. Contenidos totales de aire recomendados para el concreto**

Tamaño nominal máximo de agregado, mm	Contenido de aire, en por ciento*		
	Exposición severa**	Exposición moderada**	Exposición ligera**
10	7 1/2	6	4 1/2
12	7	5 1/2	4
19	6	5	3 1/2
25	6	4 1/2	3
38	5 1/2	4 1/2	2 1/2
50†	5	4	2
76†	4 1/2	3 1/2	1 1/2

\*Las especificaciones de proyecto frecuentemente permiten que el contenido de aire del concreto entregado se encuentre dentro de -1 a +2 puntos porcentuales de los valores recomendados en la tabla.

\*\*Se considera exposición severa al medio en el cual el concreto queda expuesto a condiciones húmedas de congelación-deshielo, a productos descongelantes o a otros agentes agresivos. La exposición moderada es el medio en el cual el concreto queda expuesto al congelamiento pero sin encontrarse siempre húmedo, ni expuesto al agua durante períodos prolongados antes de que ocurra el congelamiento, y no estará en contacto con productos químicos agresivos ni con descongelantes. La exposición ligera es el medio en el cual el concreto no está expuesto a condiciones de congelación, productos descongelantes o a agentes agresivos. Adaptado de las Referencias 5-32 y 5-34.

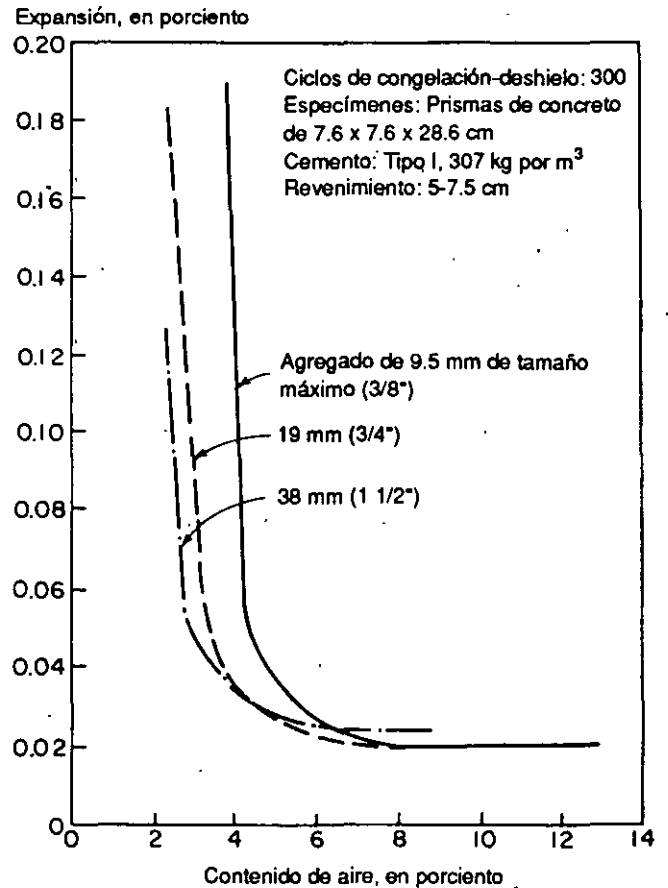
†Estos contenidos de aire son aplicables para toda la mezcla, así como para los tamaños de agregado precedentes. Sin embargo, al ensayar estos concretos, los agregados mayores de 38 mm se retirarán manualmente o por cribado, y el contenido de aire se determinará en la fracción de concreto menor de 38 mm. (La tolerancia en el contenido de aire al entregarse se refiere a este valor.) El contenido de aire de toda la mezcla se calcula a partir del valor determinado en la fracción inferior a 38 mm.

aguas. Las mezclas de concreto con relaciones agua-cemento bajas, probablemente no necesitan la misma cantidad de aire incluido para tener la misma durabilidad como lo requieren los concretos de menor calidad.

El Reglamento de construcciones de concreto reforzado ACI 318 señala que un concreto que vaya a quedar expuesto a congelamiento y deshielo en estado saturado o a productos químicos descongelantes deberá tener una inclusión de aire dentro de los límites mostrados en la Tabla 5-4 para condiciones de exposición moderada y severa. La Fig. 5-16 ilustra el efecto del aumento del aire en la reducción de la expansión ocasionada por la congelación-deshielo en estado saturado y también muestra la necesidad de cumplir con los requisitos de la Tabla 5-4 para condiciones de exposición severa. Este tema también se trata en los Capítulos 1, 7, y 12.

Cuando no es necesaria la inclusión de aire para la protección contra el congelamiento-deshielo o contra los productos descongelantes, se hace uso de los contenidos de aire para exposición ligera dados de Tabla 5-4. Se pueden emplear también mayores contenidos de aire siempre y cuan-

do se logre la resistencia de diseño. El aire incluido ayuda a reducir el sangrado y la segregación y mejora la trabajabilidad y las cualidades para efectuar los acabados en el concreto.



**Figura 5-16. Relación entre el contenido de aire y la expansión de especímenes de prueba durante 300 ciclos de congelación y deshielo para varios tamaños máximos de agregado. Referencia 5-11.**

## REFERENCIAS

- 5-1. Gonnerman, H. F., *Test of Concretes Containing Air-Entraining Portland Cements or Air Entraining Materials Added to Batch at Mixer*, Research Department Bulletin RX013, Portland Cement Association, 1944.
- 5-2. Cordon, W. A. *Entrained Air—A Factor in the Design of Concrete Mixes*, Materials Laboratories Report No. C-310, Research and Geology Division, Bureau of Reclamation, Denver, March 15, 1946.
- 5-3. Elfert, Rl J., *Investigation of the Effect of Vibration Time on the Bleedign Property of Concrete With and Without Entrained Air*, Materials Laboratories Report

- No. C-375, Research and Geology Division, Bureau of Reclamation, Denver, January 26, 1948.
- 5-4. Stanton, Thomas E., "Durability of Concrete Exposed to Sea Water and Alkali Soils—California Experience," *Journal of the American Concrete Institute*, May 1948.
  - 5-5. Taylos, Thomas G., *Effect of Carbon Black and Black Iron Oxide on Air Content and Durability of Concrete*, Research Department Bulletin RX023, Portland Cement Association, 1948.
  - 5-6. Brewster, R. S., *Effect of Vibration Time upon Loss of Entrained Air from Concrete Mixes*, Materials Laboratories Report No. C-461, Research and Geology Division, Bureau of Reclamation, Denver, November 25, 1949.
  - 5-7. Kretsinger, D. G., *Effect of Entrained Air on Expansion of Mortar Due to Alkali-Aggregate Reaction*, Materials Laboratories Report No. C-425, Research and Geology Division, U. S. Bureau of Reclamation, Denver, February 16, 1949.
  - 5-8. Powers, T. C., *The Air Requirements of Frost-Resistant Concrete*, Research Department Bulletin RX033, Portland Cement Association, 1949.
  - 5-9. Bloem, D. L., *Air-Entrainment in Concrete*, National Sand and Gravel Association and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, 1950.
  - 5-10. Gonnerman, H. F., "Durability of Concrete in Engineering Structures," *Building Research Congress 1951*, collected papers, Division No. 2, Section D. Building Research Congress, London, England, 1951, pages 92-104.
  - 5-11. Klieger, Paul, *Studies of the Effect of Entrained Air on the Strength and Durability of Concretes Made with Various Maximum Sizes of Aggregates*, Research Department Bulletin RX040, Portland Cement Association, 1952.
  - 5-12. Bates, A. A.; Woods, H.; Tyler, I. L.; Verbeck, G.; and Powers, T. C., *Rigid-Type Pavement*, Association of Highway Officials of the North Atlantic States, 28th Annual Convention. Proceedings pages 164-200, March 1952.
  - 5-13. Menzel, Carl A., and Woods, William M., *An Investigation of Bond, Anchorage and Related Factors in Reinforced Concrete Beams*, Research Department Bulletin RX042, Portland Cement Association, 1952.
  - 5-14. Powers, T. C., and Helmut, R. A., *Theory of Volumen Changes in Hardened Portland Cement Paste During Freezing*, Research Department Bulletin RX046, Portland Cement Association, 1953.
  - 5-15. Woods, Hubert, *Observations on the Resistance of Concrete to Freezing and Thawing*, Research Department Bulletin RX067, Portland Cement Association, 1954.
  - 5-16. Walker, S., and Bloem, D. L., *Design and Control of Air-Entrained Concrete*, Publication No. 60, National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, 1955.
  - 5-17. Powers, T. C., *Basic Considerations Pertaining to Freezing and Thawing Test*, Research Department Bulletin RX058, Portland Cement Association, 1955.
  - 5-18. Verbeck, George, and Klieger, Paul, *Studies of "Salt" Scaling of Concrete*, Research Department Bulletin RX083, Portland Cement Association, 1956.
  - 5-19. Klieger, Paul, *Further Studies on the Effect of Entrained Air on Strength and Durability of Concrete with Various Sizes of Aggregate*, Research Department Bulletin RX077, Portland Cement Association, 1956.
  - 5-20. Gilkey, H. J., "Re-Proportioning of Concrete Mixtures for Air Entrainment", *Journal of the American Concrete Institute*, vol. 29, No. 8, Proceedings, 54, February 1958, pages 633-645.
  - 5-21. Mielenz, R. C.; Wokodoff, V. E.; Backstrom, J. E.; and Flack, H. L., "Origin, Evolution, and Effects of the Air-Void System in Concrete, Part 1—Entrained Air in Unhardened Concrete," July 1958, "Part 2—Influence of Type and Amount of Air-Entraining Agent," August 1958, "Part 3—Influence of Water-Cement Ratio and Compaction," September 1958, and "Part 4—The Air-Void System in Job Concrete," October 1958, *Journal of the American Concrete Institute*.
  - 5-22. Lerch, William, *Basic Principles of Air-Entrained Concrete*, T-101, Portland Cement Association, 1960.
  - 5-23. Klieger, Paul, *Extensions to the Long-Time Study of Cement Performance in Concrete*, Research Department Bulletin RX157, Portland Cement Association, 1963.
  - 5-24. *Scale-Resistant Concrete Pavements, IS117P*, Portland Cement Association, 1964.
  - 5-25. Powers, T. C., *Topics in Concrete Technology: ... (3) Mixtures Containing Intentionally Entrained Air: (4) Characteristics of Air-Void Systems*, Research Department Bulletin RX174, Portland Cement Association, 1965.
  - 5-26. Powers, T. C., "The Mechanism of Frost Action in Concrete," *Stanton Walker Lecture Series on the Materials Sciences*, Lecture No. 3. National Sand and Gravel Association and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, 1965.
  - 5-27. Klieger, Paul, *Air-Entraining Admixtures*, Research Department Bulletin RX199, Portland Cement Association, 1966.
  - 5-28. Greening, Nathan R., *Some Causes for Variation in Required Amount of Air-Entraining Agent in Portland Cement Mortars*, Research Department Bulletin RX213, Portland Cement Association, 1967.
  - 5-29. Verbeck, G. J., *Field and Laboratory Studies of the Sulphate Resistance of Concrete*, Research Department Bulletin RX227, Portland Cement Association, 1967.
  - 5-30. Brown, F. P., and Cady, P. D., "Deicer Scaling Mechanisms in Concrete," *Durability of Concrete, ACI SP-47*, American Concrete Institute, 1975, pages 101-119.
  - 5-31. "Entrained Air Voids in Concrete Help Prevent Salt Damage," *Civil Engineering*, American Society of Civil Engineers, New York, May 1982.
  - 5-32. *Guide to Durable Concrete*, ACI 201.2R, reaffirmed 1982, ACI Committee 201 Report, American Concrete Institute.
  - 5-33. Whiting, D., and Stark, D., *Control of Air Content in Concrete*, National Cooperative Highway Research Program Report No. 258 and Addendum, Transportation Research Board and National Research Council, Washington, D.C., May, 1983.
  - 5-34. *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*, ACI 318-83, ACI Committee 318 Report, American Concrete Institute, 1983.



- 5-35. Gebler, S. H., and Klieger, P., *Effect of Fly Ash on the Air-Void Stability of Concrete*, Research and Development Bulletin RD085T, Portland Cement Association, 1983.
- 5-36. Stark, David, *Longtime Study of Concrete Durability in Sulfate Soils*, Research and Development Bulletin RD086T, Portland Cement Association, 1984.
- 5-37. Sayward, John M., *Salt Action on Concrete*, Special Report 84-25, U.S., Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire, August 1984.
- 5-38. Stark, David C., *Effect of Vibration on the Air-Void System and Freeze-Thaw Durability of Concrete*, Research and Development Bulletin RD092T, Portland Cement Association, 1986.
39. *Standard Practice for Curing Concrete*, ACI 308-81, revised 1986, ACI Committee 308 Report, American Concrete Institute.



## CAPITULO 6

# Aditivos para el concreto

Los aditivos son aquellos ingredientes del concreto además del cemento portland, del agua y de los agregados que se agregan a la mezcla inmediatamente antes del mezclado o durante el mismo. Por su función, se les puede clasificar a los aditivos como:

1. Aditivos inclusores de aire
2. Aditivos reductores de agua
3. Aditivos retardantes
4. Aditivos acelerantes
5. Superplastificantes
6. Aditivos minerales finamente divididos
7. Aditivos diversos, para mejorar la trabajabilidad, la adherencia, a prueba de humedad, impermeabilizantes, para lechadeado, formadores de gas, colorantes, inhibidores de la corrosión, y ayudas para bombeo

En la Tabla 6-1 se presenta una amplia clasificación de aditivos.

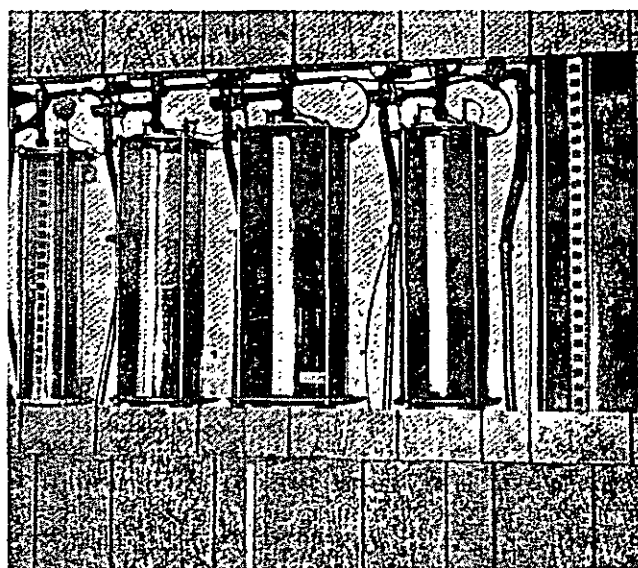
El concreto debe ser trabajable, capaz de dársele acabados, fuerte, durable, impermeable y resistente al desgaste. Estas cualidades frecuentemente se pueden obtener de una manera fácil y económica seleccionando los materiales adecuados sin que se tenga que recurrir a los aditivos (excepto los aditivos inclusores de aire cuando son necesarios).

Las principales razones del empleo de los aditivos son:

1. Para reducir el costo de la construcción de concreto
2. Para obtener algunas propiedades en el concreto de manera más efectiva que por otros medios
3. Para asegurar la calidad del concreto durante las etapas de mezclado, transporte, colocación, y curado en condiciones ambientales adversas
4. Para superar ciertas eventualidades durante las operaciones de colado

A pesar de estas consideraciones, se debe tener presente que ningún aditivo de ningún tipo ni en cualquier cantidad se podrá considerar como sustituto de una práctica correcta de colado.

La efectividad del aditivo depende de factores tales como el tipo, marca y cantidad de cemento; el contenido de agua, la forma, granulometría y proporciones de los agregados; el tiempo de mezclado; el revenimiento; y las temperaturas del concreto y del aire.



**Figura 6-1. Aditivos líquidos en tanques surtidores automáticos.** La mayoría de los aditivos inclusores de aire, reductores de agua, acelerantes y retardantes son líquidos generalmente de color oscuro y parecidos a un jarabe. Los aditivos se agregan a la mezcla de concreto en cantidades específicas por medio de tanques surtidores automáticos. Los aditivos líquidos comúnmente se surten individualmente en el agua de mezclado; de cualquier modo, no se deben entremezclar antes de su dosificación.

Los aditivos que hayan sido considerados para emplearse en el concreto, deberán cubrir las especificaciones pertinentes que se presentan en la Tabla 6-1. Se deberán realizar mezclas de prueba con el aditivo y los materiales por utilizar a las temperaturas y humedades que se vayan a tener en la obra. De esta manera se pueden observar tanto la compatibilidad del aditivo con otros aditivos y con los materiales a emplear, como los efectos del aditivo sobre las propiedades del concreto fresco y endurecido. Se deberá usar la cantidad de aditivo recomendada por el fabricante o la cantidad óptima de aditivo determinada por medio de ensayos de laboratorio.

**Tabla 6-1. Clasificación de los aditivos para concreto.**

Tipo de aditivo	Efecto deseado	Material
Acelerantes (ASTM C 494, Tipo C)	Aceleran el fraguado y el desarrollo de la resistencia a edad temprana	Cloruro de calcio (ASTM D 98) Trietanolamina, tiocianato de sodio, formato de calcio, nitrato de calcio, nitrato de calcio
Exclusores de aire	Disminuyen el contenido de aire	Fosfato tributilo, ftalato dibutilo, alcohol octilo, ésteres insolubles al agua de ácido carbónico y bórico, silicones
Aditivos inclusores de aire (ASTM C 260)	Mejoran la durabilidad en los ambientes en que existe congelación-deshielo, productos químicos descongelantes, sulfatos, y reactividad a los álcalis Mejoran la trabajabilidad	Sales de resinas de madera (resina Vinsol) Algunos detergentes sintéticos Sales de lignina sulfonada Sales de ácidos de petróleo Sales de material proteínico Ácidos grasos y resinosos y sus sales Sulfonatos de alquilbenceno Sales de hidrocarburos sulfonados
Reductores de reactividad con los álcalis	Reducen la expansión provocada por la reactividad con los álcalis	Puzolanas (ceniza volante, humo de sílice), escoria de alto horno, sales de litio y de bario, agentes inclusores de aire
Aditivos para unir	Mejoran la unión	Hule, cloruro de polivinilo, acetato de polivinilo, acrílicos, copolímeros de butadienoestireno
Agentes colorantes	Concreto con color	Negro de humo modificado, óxido de hierro, tierra de sombra, óxido de cromo, óxido de titanio, azul cobalto (ASTM C 979)
Inhibidores de la corrosión	Reducen el avance de la corrosión del acero en un ambiente con cloruros	Nitrato de calcio, nitrato de sodio, benzoato de sodio, algunos fosfatos o fluosilicatos, fluoaluminatos
Aditivos a prueba de humedad	Retardan la penetración de la humedad en el concreto seco	Jabones de calcio o estearato de amonio u oleato Estearato butilo Productos de petróleo
Aditivos minerales finamente divididos		
Cementantes	Propiedades hidráulicas Sustitución parcial del cemento	Escoria de alto horno granulada molida (ASTM C 989) Cemento natural Cal hidráulica hidratada (ASTM C 141)
Puzolanas	Actividad puzolánica Mejoran la trabajabilidad, la plasticidad, la resistencia a los sulfatos; reducen la reactividad con los álcalis, la permeabilidad y el calor de hidratación Sustitución parcial del cemento Relleno	Tierras diatomáceas, horstemos opalinos, arcillas, pizarras, tufas volcánicas, pumicitas (ASTM C 618, Clase N); cenizas volantes, (ASTM C 618, Clases F y C), humo de sílice
Puzolánicos y cementantes	Los mismos que en las categorías de cementantes y puzolánicos	Cenizas volantes con contenidos altos de calcio (ASTM C 618, Clase C) Escoria de alto horno granulada molida (ASTM C 989)
Nominalmente inertes	Mejoran la trabajabilidad Relleno	Mármol, dolomita, cuarzo, granito
Fungicidas, germicidas e insecticidas	Inhiben o controlan el crecimiento de bacterias y hongos	Fenoles polihalogenados Emulsiones de dieltrín Compuestos de cobre
Formadores de gas	Provocan expansión antes de que se presente el fraguado	Polvo de aluminio Jabón de resina y goma vegetal o animal Saponina Proteínas hidrolizadas
Agentes para morteros (lechadas)	Ajustan propiedades de los morteros (lechadas) para aplicaciones específicas	Vea los aditivos inclusores de aire, acelerantes, retardantes y agentes para la trabajabilidad
Impermeabilizantes	Disminuyen la permeabilidad	Humo de sílice Cenizas volantes (ASTM C 618) Escoria sólida (ASTM C 989) Puzolanas naturales Reductores de agua Látex
Ayudas de bombeo	Mejoran la capacidad de bombeo	Polímeros orgánicos y sintéticos Floculantes orgánicos Emulsiones orgánicas de parafina, alquitrán, asfalto, acrílicos Bentonitas y sílices pirogénicas Puzolanas naturales (ASTM C 618, Clase N) Cenizas volantes (ASTM C 618, Clases F y C) Cal hidratada (ASTM C 141)

**Tabla 6-1. Clasificación de los aditivos para concreto. (Continuación)**

Tipo de aditivo	Efecto deseado	Material
Retardantes (ASTM C 494, Tipo B)	Retardan el tiempo de fraguado	Lignina Bórax Azúcares Ácido tartárico y sales
Superplastificantes* (ASTM C 1017, Tipo 1)	Concreto con mayor fluidez Disminuyen la relación agua-cemento	Condensados de formaldehído de melamina sulfonatados Condensados de formaldehído de naftaleno sulfonatados Lignosulfonatos
Superplastificantes* y retardantes (ASTM C 1017, Tipo 2)	Concreto con mayor fluidez y con retardo en el fraguado Disminuyen la cantidad de agua	Vea los aditivos superplastificantes y también los reductores de agua
Reductores de agua (ASTM C 494, Tipo A)	Reducen la demanda de agua al menos 5%	Lignosulfonatos Ácidos carboxílicos hidroxilados Carbohidratos (También tienden a retardar el fraguado, por lo que a menudo se les agrega un acelerante)
Reductores de agua y acelerantes (ASTM C 494, Tipo E)	Reducen el agua (mínimo 5%) y aceleran el fraguado	Vea los aditivos reductores de agua, Tipo A (Se agrega un acelerante)
Reductores de agua y retardantes (ASTM C 494, Tipo D)	Reducen el agua (mínimo 5%) y aceleran el fraguado	Vea los aditivos reductores de agua, Tipo A
Reductores de agua —de alto rango (ASTM C 494, Tipo F)	Reducen la demanda de agua (mínimo 12%)	Vea los aditivos superplastificantes
Reductores de agua —de alto rango— y retardantes (ASTM C 494, Tipo G)	Reducen la demanda de agua (mínimo 12%) y retardan el fraguado	Vea los aditivos superplastificantes y también los reductores de agua
Agentes para la trabajabilidad.	Mejoran la trabajabilidad	Aditivos inclusores de aire Aditivos minerales finamente divididos, excepto el humo de sílice Reductores de agua

\* A los superplastificantes también se les conoce como reductores de agua de alto rango o plastificantes. Estos aditivos a menudo cubren simultáneamente las especificaciones ASTM C 494 y C 1017.

Aún cuando un aditivo puede producir un concreto con las propiedades deseadas, se pueden frecuentemente obtener los mismos resultados económicos, cambiando las proporciones de la mezcla o eligiendo otros ingredientes para el concreto. Siempre que sea posible, se deberá comparar el costo de cambiar la mezcla básica de concreto, contra el costo adicional de emplear un aditivo. Este último deberá incluir, además del costo del aditivo, cualquier efecto que el uso del aditivo tenga sobre los costos de transporte, colocación, acabado, curado y protección del concreto.

## ADITIVOS INCLUSORES DE AIRE

Los aditivos inclusores de aire se utilizan para retener intencionalmente burbujas microscópicas de aire en el concreto. La inclusión de aire mejorará drásticamente la durabilidad de los concretos que estén expuestos a la humedad durante los ciclos de congelación y deshielo. El aire incluido mejora considerablemente la resistencia del concreto contra el descascamiento de la superficie causado por los productos químicos deshelantes. También se ve mejorada de manera importante la trabajabilidad del concreto fresco, y la segregación y el sangrado se reducen o se llegan a eliminar.

El concreto con aire incluido, contiene diminutas burbujas de aire distribuidas uniformemente en toda la pasta de cemen-

to. La inclusión de aire en el concreto, se puede producir usando un cemento inclusor de aire, o con la introducción de un aditivo inclusor de aire, o con una combinación de ambos métodos. Un cemento inclusor de aire es un cemento portland con una adición inclusora de aire molida conjuntamente con el clinker durante su fabricación. Por otra parte, los aditivos inclusores de aire se agregan directamente a los componentes del concreto antes o durante el mezclado. Los principales ingredientes que se utilizan en los aditivos inclusores de aire se enlistan en la Tabla 6-1. Las especificaciones así como los métodos de ensaye para los aditivos inclusores de aire se presentan en las normas ASTM C 260 y C 233. Las adiciones inclusoras de aire que se emplean en la fabricación de los cementos inclusores de aire, deben cumplir con los requisitos de la norma ASTM C 226. Los requisitos aplicables a los cementos inclusores de aire se presentan en la norma ASTM C 150. Para mayor información, consulte el Capítulo 5.

## ADITIVOS REDUCTORES DE AGUA

Los aditivos reductores de agua se emplean para disminuir la cantidad de agua de mezclado requerida para producir un concreto con un cierto revenimiento, reducir la relación agua-cemento, o para aumentar el revenimiento. Los reductores de agua típicos disminuyen el contenido de agua en aproximada-

mente 5% a 10 %. Los reductores de agua de alto rango reducen el contenido de agua de 12% a 30% (consulte la sección "Superplastificantes"). El hecho de agregar un aditivo reductor de agua a una mezcla sin haber disminuido el contenido de agua puede producir una mezcla con un revenimiento mucho mayor. No obstante, la velocidad en la pérdida de revenimiento no se reduce, sino que incluso aumenta en muchos casos. La pérdida rápida de revenimiento, tiene como resultado una reducción en la trabajabilidad así como un menor tiempo para colocar el concreto.

Con los aditivos reductores de agua generalmente se obtiene un aumento en la resistencia porque se reduce la relación agua-cemento. A pesar de la reducción en el contenido de agua, los aditivos reductores de agua pueden causar incrementos considerables en la contracción por secado. El emplear un reductor de agua para reducir el contenido de agua y cemento de una mezcla de concreto mientras se mantiene una relación agua-cemento constante, puede dar como resultado una resistencia a compresión igual o menor, y puede aumentar la pérdida de revenimiento en un factor de dos o más.

Dependiendo de su composición química, los aditivos reductores de agua pueden disminuir, aumentar o no tener ningún efecto en el sangrado. Muchos aditivos reductores de agua también pueden retardar el tiempo de fraguado del concreto. A algunos se les modifica para producir varios grados de retardo, mientras que otros no afectan significativamente el tiempo de fraguado. Algunos aditivos reductores de agua, como los lignosulfonatos, también pueden incluir algo de aire en el concreto.

La efectividad de los reductores de agua en el concreto es función de su composición química, de la temperatura del concreto, de la composición y finura del cemento, del contenido de cemento, y de la presencia de otros aditivos. Algunos aditivos son más efectivos al emplearse en mezclas pobres y cementos con contenidos bajos de álcalis o de aluminato tricálcico. Los componentes y la clasificación de los aditivos reductores de agua se enlistan en la Tabla 6-1.

## ADITIVOS RETARDANTES

Los aditivos retardantes se emplean para aminorar la velocidad de fraguado del concreto. Las temperaturas altas en el concreto fresco (30° a 32°C y mayores), son frecuentemente la causa de una gran velocidad en el endurecimiento, lo que provoca que el colado y acabado del concreto sea difícil. Uno de los métodos más prácticos de contrarrestar este efecto consiste en hacer descender la temperatura del concreto enfriando el agua de mezclado o los agregados. Los aditivos retardantes no bajan la temperatura inicial del concreto.

Los retardantes se emplean en ocasiones para: (1) compensar el efecto acelerante que tiene el clima cálido en el fraguado del concreto, (2) demorar el fraguado inicial del concreto o lechada cuando se presentan condiciones de colado difíciles o poco usuales, como puede ocurrir al colar estribos o cimentaciones de gran tamaño, cementar pozos petroleros, o bombear lechada o concreto a distancias considerables, o (3) retrasar el fraguado para aplicar procesos de acabado especiales, como puede ser una superficie de agregado expuesto.

Debido a que la mayoría de los retardantes también actúan como reductores de agua, se les denomina frecuentemente retardantes reductores de agua. Los retardantes también pueden incluir un poco de aire en el concreto.

En general, el empleo de retardantes va acompañado una cierta reducción de resistencia a edades tempranas (una a tres días). Los efectos de estos materiales en las demás propiedades del concreto, tales como la contracción, pueden ser impredecibles. En consecuencia, se deberán efectuar pruebas de recepción de los retardantes con los materiales con que se va a trabajar en condiciones anticipadas de trabajo. En la Tabla 6-1 se enlistan las clasificaciones y los componentes de los retardantes.

## ADITIVOS ACELERANTES

Estos aditivos se emplean para acelerar el desarrollo de la resistencia del concreto a edades tempranas. Tal desarrollo de resistencia también se puede acelerar: (1) con el empleo de cemento portland de alta resistencia a edad temprana Tipo III, (2) reduciendo la relación agua cemento con el aumento de 60 a 120 kg de cemento adicional por metro cúbico de concreto, ó (3) curando a mayores temperaturas.

El cloruro de calcio ( $\text{Ca Cl}_2$ ) es el material comúnmente usado en los aditivos acelerantes. Deberá cubrir los requisitos de la norma ASTM D 98 y también deberá ser muestreado y ensayado de acuerdo con la norma ASTM D 345. El amplio uso de los aditivos a base de cloruro de calcio, ha brindado muchos datos y experiencias sobre su efecto en las propiedades del concreto. Aparte del incremento en aceleración de resistencia, el cloruro de calcio produce aumento en la contracción por secado, una posible corrosión del refuerzo, descoloramiento (oscurece al concreto),\* y posibles descascaramientos.

El cloruro de calcio no es un agente anticongelante. Cuando se emplea en cantidades permisibles, reducirá el punto de congelación del concreto en más de unos cuantos grados. Los intentos que se hagan con este método para proteger al concreto de la congelación son riesgosos. En vez de usarlo para este fin, se deben tomar medidas confiables y probadas en climas fríos.\*\*

El cloruro de calcio se debe agregar a la mezcla de concreto en forma de solución como parte del agua de mezclado. Si se agrega estando seco al concreto, se corre el riesgo de que no todas las partículas secas queden completamente disueltas durante el mezclado. Los grumos no disueltos en la mezcla pueden causar reventones o manchas oscuras en el concreto endurecido.

La cantidad de cloruro de calcio que se vaya a agregar, no debe ser mayor de lo necesario para producir los resultados esperados y en ningún caso deberá exceder el 2% del peso del cemento. Para calcular el contenido de cloruros del cloruro de calcio comercialmente disponible, se puede suponer que:

\* Referencia 6-20.

\*\* Consulte el Capítulo 12, "Colados en clima frío".

1. Las hojuelas corrientes contienen un mínimo de 77% de  $\text{CaCl}_2$
2. Las hojuelas concentradas, las pelotillas, o las formas granulares contienen un mínimo de 94% de  $\text{CaCl}_2$

Una sobredosis puede producir problemas en el colado y ser nociva para el concreto, pues podría provocar un endurecimiento rápido, causar un fuerte incremento en la contracción por secado, corroer al refuerzo, y ser causa de pérdidas de resistencia a edades tardías.

Los casos en los que se debe emplear con precaución el cloruro de calcio son:

1. En concretos sujetos a curado al vapor
2. En concretos que tengan inmersos metales distintos, especialmente si están conectados eléctricamente al acero de refuerzo
3. En losas de concreto soportadas por cimbras permanentes de acero galvanizado.

No se recomienda el empleo de cloruro de calcio ni de aditivos que contengan cloruros solubles, bajo las siguientes condiciones:

1. En los concretos presforzados debido a los posibles riesgos de corrosión
2. En los concretos que contengan aluminio ahogado (por ejemplo tubo-conductos), puesto que puede producirse una severa corrosión del aluminio, especialmente si el aluminio está en contacto con el acero ahogado y el concreto se encuentra en un medio húmedo
3. En concretos sujetos a reacciones álcali-agregado, o expuestos a suelos o aguas que contengan sulfatos
4. En losas de piso en que se trate de dar acabados metálicos en seco con llama.
5. En climas cálidos en general
6. En colados de concreto masivo

En la Tabla 6-2, se presenta el contenido máximo de ión cloruro para proteger al concreto contra la corrosión, recomendado por el Reglamento ACI 318. La resistencia contra la corrosión del acero ahogado todavía se ve mejorada con el incremento en el recubrimiento de concreto al acero de refuerzo, y con menores relaciones agua-cemento.

En las situaciones donde no se recomienda el uso de cloruros, se puede disponer de acelerantes no corrosivos que no contienen cloruros (Vea la Tabla 6-1). Sin embargo, muchos de estos acelerantes no son tan efectivos como el cloruro de calcio y son más costosos.

## ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES (REDUCTORES DE AGUA DE ALTO RANGO)

Los aditivos superplastificantes\* son aditivos reductores de agua de alto rango que cubren las especificaciones ASTM C 1017 y C 494 Tipos F y G, que se agregan a los concretos de revenimiento y relación agua-cemento bajos a normales para producir concretos fluidos de alto revenimiento. Los concretos producidos son concretos muy fluidos pero trabajables

**Tabla 6-2. Contenido máximo de ión cloruro para protección contra la corrosión**

Tipo de miembro	Ión cloruro máximo soluble en agua ( $\text{Cl}^-$ ) en el concreto, por ciento del cemento en peso
Concreto presforzado	0.06
Concreto reforzado expuesto a cloruros durante su servicio	0.15
Concreto reforzado que estará seco o protegido de la humedad durante su servicio	1.00
Otras construcciones de concreto reforzado	0.30

Referencia 6-19.

los cuales se pueden colocar con poca o ninguna vibración o compactación, pudiendo quedar todavía libres de sangrado o segregación excesivos. El concreto fluido se emplea (1) en colados de secciones delgadas, (2) en áreas que tengan el acero de refuerzo cercanamente espaciado o muy congestionado, (3) en colados con tubo-embudo (bajo el agua), (4) como concreto bombeable para disminuir la presión de la bomba, obteniendo con ello un aumento en la distancia de bombeo horizontal y vertical, (5) en las áreas donde los métodos convencionales de consolidación no se puedan emplear o resulten poco prácticos, y (6) para aminorar los costos de manejo. Con la adición de un superplastificante a un concreto con revenimiento de 7.5 cm se puede producir fácilmente un concreto con 22.5 cm de revenimiento. El concreto fluido queda definido por la especificación ASTM C 1017 como aquel concreto que tiene un revenimiento mayor de 19 cm y que todavía conserva sus propiedades cohesivas. Los revenimientos excesivamente altos, mayores o iguales de 25 cm, pueden provocar que el concreto se segregue.

Los reductores de agua de alto rango (ASTM C 1017 y C 494 Tipos F y G), también se pueden emplear para fabricar concretos de baja relación agua-cemento y de alta resistencia con trabajabilidades dentro de los límites normalmente especificados para consolidar por medio de vibración interna. Con el uso de estos aditivos se puede obtener una reducción de agua del 12 al 30%. Esta reducción en el contenido de agua y en la relación agua-cemento permite producir concretos con: (1) resistencias últimas a compresión arriba de 700  $\text{kg/cm}^2$ , (2) mayores adquisiciones de resistencia a edad temprana, y (3) una menor penetración del ión cloruro así como otras propiedades favorables que están asociadas con los concretos que tienen relaciones agua-cemento bajas.

Los reductores de agua de alto rango normalmente son más efectivos, aunque más costosos, que los aditivos reductores de agua normales para producir concretos trabajables. En la mayoría de los superplastificantes, el efecto para elevar la

\* Los términos "reductor de agua de alto rango" y "superplastificante" a menudo se emplean como sinónimos.  
N. del T.: En México también se emplean los términos "superfluidizante" o "superfluidificante" para denominar a este tipo de aditivos.

trabajabilidad o para producir concretos fluidos es de corta duración, de 30 a 60 minutos, y va seguido por una pérdida muy rápida de trabajabilidad (pérdida de revenimiento). Debido a esta pérdida de revenimiento, la adición de estos aditivos frecuentemente se hace en la obra. Los reductores de agua de alto rango de revenimiento prolongado que se adicionan en las plantas dosificadoras ayudan a reducir los problemas de pérdida de revenimiento. El tiempo de fraguado se puede acelerar o retardar dependiendo de la composición química individual del aditivo, de la proporción dosificada, y de la interacción con los demás aditivos presentes en la mezcla de concreto.

Se ha demostrado mediante pruebas que algunos concretos que contienen aditivo superplastificante sangran más que los concretos testigo de igual relación agua-cemento, pero sangran mucho menos que los concretos testigo con el mismo revenimiento elevado.\*\* El concreto con superplastificante de alto revenimiento y bajo contenido de agua experimenta una menor contracción por secado que un concreto convencional de alto revenimiento y alto contenido de agua, aunque experimenta una contracción por secado similar o mayor que un concreto convencional de bajo revenimiento y bajo contenido de agua.

La efectividad del superplastificante se eleva con el aumento en la cantidad de cemento y finos del concreto. También se modifica con el revenimiento inicial del concreto.

El concreto con superplastificante tiene vacíos de aire incluido de mayor tamaño que un concreto normal con aire incluido. Esto indicaría una menor resistencia a la congelación y deshielo en condiciones normales; sin embargo, las pruebas de laboratorio han mostrado que un concreto con superplastificante tiene una muy buena durabilidad a la congelación-deshielo, aún con sus mayores factores de espaciamiento. Esto puede ser resultado de las menores relaciones agua-cemento que se asocian frecuentemente con el concreto con superplastificante. En la Tabla 6-1 se enlistan los componentes primarios, así como las especificaciones de los aditivos superplastificantes. La información anterior sobre los aditivos reductores de agua también es aplicable a los superplastificantes.

## ADITIVOS MINERALES FINAMENTE DIVIDIDOS

Los aditivos minerales finamente divididos son materiales pulverizados que se agregan al concreto antes del mezclado o durante éste para mejorar o transformar algunas de las propiedades del concreto de cemento portland en estado plástico o endurecido. Estos aditivos son generalmente materiales naturales o subproductos (vea la Tabla 6-3). De acuerdo con sus propiedades químicas o físicas, se clasifican como (1) materiales cementantes, (2) puzolanas, (3) materiales puzolánicos y cementantes, y (4) materiales nominalmente inertes.

\*\* Para lograr el revenimiento deseado, los concretos testigo emplearon un alto contenido de agua. Consulte las Referencias 6-3 y 6-6.

**Tabla 6-3. Especificaciones y clases de aditivos minerales finamente divididos.**

Cal hidráulica hidratada - ASTM C 141	
Escorias de alto horno de hierro granuladas molidas - ASTM C 989	
Grado 80	Escorias con un bajo índice de actividad
Grado 100	Escorias con un índice de actividad moderado
Grado 120	Escorias con un alto índice de actividad
Ceniza volante y puzolanas naturales - ASTM C 618	
Clase N	Puzolanas naturales crudas o calcinadas incluyendo
	Tierras diatomáceas
	Horstenos opalinos y pizarras
	Tufas y cenizas volcánicas o pumicitas
	Algunas pizarras y arcillas calcinadas
Clase F	Ceniza volante con propiedad puzolánicas
Clase C	Ceniza volante con propiedades puzolánicas y cementantes

## Materiales cementantes

Los materiales cementantes son sustancias que por sí solas tienen propiedades hidráulicas cementantes (fragan y endurecen en presencia del agua). Los materiales cementantes incluyen a la escoria granulada de alto horno molida, cemento natural, a la cal hidráulica hidratada, y a las combinaciones de estos y de otros materiales.

La escoria granulada de alto horno molida fabricada a partir de la escoria de alto horno de hierro, es un producto no metálico que consiste principalmente de silicatos y aluminosilicatos de calcio y de otras bases que se desarrollan en la fundición simultáneamente con el hierro en los altos hornos. La escoria fundida a una temperatura de aproximadamente 1500°C, queda templada rápidamente al enfriarse por inmersión en agua y forma un material granular vítreo parecido a la arena. El material granular, el cual es molido a menos de 45 micras, tiene una finura Blaine de aproximadamente 400 a 600 m<sup>2</sup>/kg. Esta escoria molida áspera y angulosa al entrar en contacto con el agua y con un activador, NaOH o CaOH, ambos facilitados por el cemento portland, se hidrata y fragua de manera similar al cemento portland. La escoria enfriada al aire no tiene las propiedades hidráulicas que tiene la escoria enfriada por agua. La especificación ASTM C 989 clasifica a la escoria según su reactividad con los Grados 80, 100 ó 120.

El cemento natural se forma al calcar calizas arcillosas justo debajo del punto de fusión; luego se muele el material hasta obtener un polvo muy fino.

La cal hidráulica hidratada, ASTM C 141, se obtiene calcinando calizas que contengan sílice y alúmina hasta un punto en el cual se encuentre presente suficiente óxido de calcio libre y silicatos de calcio sin hidratar para lograr las propiedades de hidratación e hidráulica del material.



## Materiales Puzolánicos

Una puzolana es un material síliceo o aluminosilíceo que por sí mismo posee poco o ningún valor cementante pero que, en forma finamente molida y en presencia del agua, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio liberado por la hidratación del cemento portland para formar compuestos que poseen propiedades cementantes.

Como puzolanas se emplean un gran número de materiales naturales: las tierras diatomáceas, los horstemos opalinos, las arcillas, las pizarras, las tobas volcánicas, y la piedra pómez. La mayoría de las puzolanas naturales se deben moler antes de ser usadas y muchas se tienen que calcinar a temperaturas de 650°C a 980°C, para activar sus componentes arcillosos. Estos materiales se clasifican según la norma ASTM C 618 como puzolanas Clase N.

Las puzolanas también incluyen a la ceniza volante y al humo de sílice. El aditivo mineral más ampliamente utilizado en el concreto, la ceniza volante, es un residuo finamente dividido (polvo que se asemeja al cemento) que resulta de la combustión del carbón mineral pulverizado en las plantas generadoras de electricidad. Con la ignición en el horno, la mayor parte de la materia volátil y de carbono existentes en el carbón mineral se calcina. Durante la combustión, las impurezas del carbón mineral (como la arcilla, el feldespato, cuarzo y la pizarra) se funden en suspensión, y son retiradas de la cámara de combustión por el gas de escape. Mientras transcurre el proceso, el material fundido se enfría y se solidifica formando partículas esféricas llamadas cenizas volantes. Luego se recolecta la ceniza volante de los gases de escape por medio de precipitadores electrostáticos o con filtros de bolsa. Normalmente no se necesitan procesos adicionales para emplear la ceniza volante en cementos mezclados o en concretos.

La mayor parte de las partículas en la ceniza volante son esferas sólidas y algunas otras son cenósferas huecas. También se encuentran presentes plerósferas, que son esferas que contienen a otras esferas de menor tamaño. Los materiales molidos, como el cemento portland, tienen partículas angulares sólidas. La naturaleza esférica de las cenizas volantes se muestra en la Fig. 6-2. Los tamaños de las partículas de ceniza volante varían desde menos de una micra hasta alcanzar más de 100 micras, teniendo un tamaño típico de partícula menor a 20 micras. Sólo del 10 al 30% de las partículas (en peso) son mayores de 45 micras. Normalmente el área superficial es de 300 a 500 m<sup>2</sup>/kg, aunque en algunas cenizas volantes las áreas superficiales llegan a ser tan bajas como 200 m<sup>2</sup>/kg y en otras las áreas superficiales alcanzan los 700 m<sup>2</sup>/kg.

La ceniza volante consiste principalmente de silicatos vítreos que contienen sílice, alúmina, hierro, y calcio. Otros componentes menores son el magnesio, el azufre, el sodio, el potasio, y el carbono. También se encuentra presente una pequeña cantidad de compuestos cristalinos. La densidad de la ceniza volante generalmente se encuentra dentro del rango de 2.2 a 2.8 y su color es gris o tostado.

Las cenizas volantes ASTM C 618 Clase F y Clase C se utilizan comúnmente como aditivos puzolánicos para el concreto. Los materiales Clase F son generalmente cenizas volantes de bajo contenido de calcio (menos de 10% de CaO), con contenidos de carbono usualmente inferiores a 5 %, aunque en algunas llega a alcanzar el 10 %. Los materiales

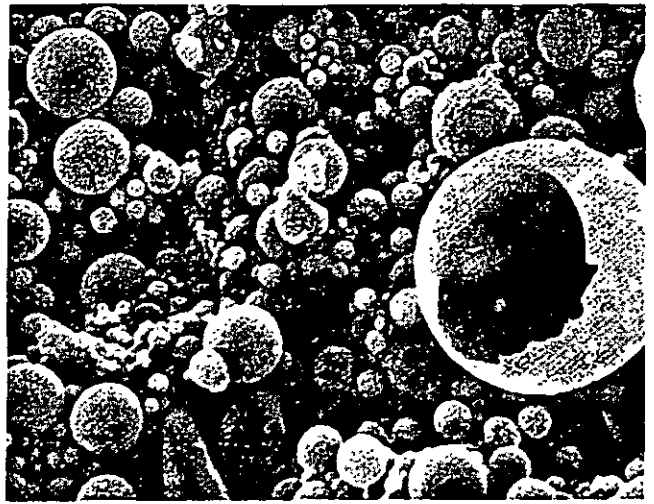


Figura 6-2. Fotografía con microscopio electrónico de partículas de ceniza volante a 1000 X. A pesar de que la mayor parte de las esferas de ceniza volante son sólidas, algunas esferas están huecas (como se muestra en la fotografía) y algunas encapsulan esferas adicionales de menor tamaño.

Clase C son frecuentemente cenizas volantes de contenido elevado de calcio (10 a 30% de CaO) cuyos contenidos de carbono usualmente son menores que 2%. Algunas cenizas volantes satisfacen las clasificaciones tanto para la Clase F como para la Clase C.

El humo de sílice, al que también se le conoce como microsílíceo o humo de sílice condensado, es otro material que se emplea como aditivo puzolánico. Este producto en forma de polvo de color gris claro a oscuro o en ocasiones gris azulado verdoso, es resultado de la reducción de cuarzo muy puro con carbón mineral en un horno de arco eléctrico durante la manufactura del silicio o de aleaciones de ferrosilicio. El humo de sílice asciende como vapor oxidado de los hornos a 2,000°C. Se enfría, se condensa y se recolecta en enormes bolsas de tela. Entonces se le procesa para retirarle las impurezas y para controlar su tamaño de partícula.

El humo de sílice condensado esencialmente consiste en dióxido de sílice (más de 90 %) en forma no cristalina. Puesto que es un material susceptible de ser conducido por el aire como la ceniza volante, tiene forma esférica (Fig. 6-3). Es extremadamente fino, con partículas con diámetros menores de una micra y con un diámetro promedio de aproximadamente 0.1 micra, casi 100 veces menor que las partículas promedio de cemento. El humo de sílice condensado tiene un área superficial de aproximadamente 20,000 m<sup>2</sup>/kg (por el método de adsorción de nitrógeno). El área superficial del humo de tabaco es de aproximadamente 10,000 m<sup>2</sup>/kg. Los cementos Tipo I y Tipo III tienen áreas superficiales (Blaine) de aproximadamente 300 a 400 m<sup>2</sup>/kg y de 500 a 600 m<sup>2</sup>/kg, respectivamente. El peso específico del humo de sílice por lo general se ubica dentro del rango de 2.10 a 2.25 pero puede llegar a 2.55. El cemento portland tiene un peso específico de aproximadamente 3.15. El peso volumétrico sin compactar del humo de sílice es de aproximadamente 250 a 300 kg/m<sup>3</sup>. Aunque el humo de sílice se vende en forma de polvo, es más fácil conseguirlo

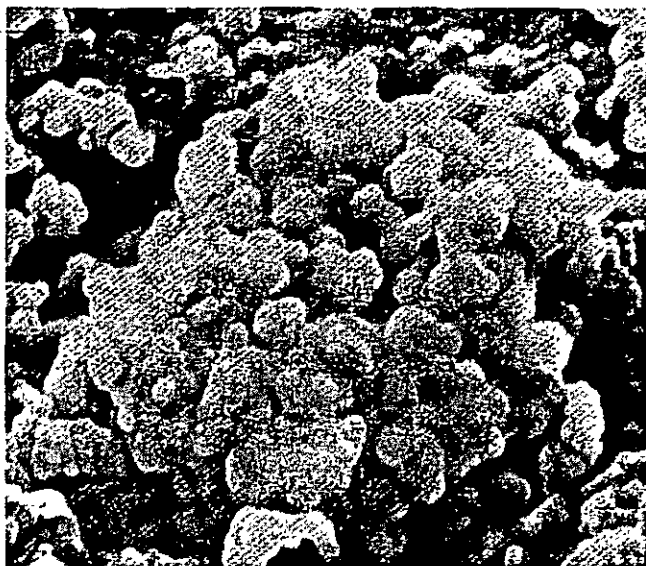


Figura 6-3. Fotografía con microscopio electrónico de partículas de humo de sílice, 20 000 X.

como líquido. Actualmente la ASTM está trabajando en una especificación para el humo de sílice.\*

### Materiales puzolánicos y cementantes

Algunas escorias granuladas de alto horno molidas y también algunas cenizas volantes, exhiben propiedades tanto puzolánicas como cementantes. Las cenizas volantes ASTM C 618 Clase C con un contenido de óxido de calcio de aproximadamente 15 a 30% en peso son las predominantes dentro de esta clasificación. Al exponerse al agua, muchas de estas cenizas se hidratan y endurecen en menos de 45 minutos.

La práctica de utilizar ceniza volante y escoria granulada de alto horno molida en las mezclas de concreto de cemento portland, ha ido aumentando en los últimos años en los Estados Unidos. Una de las principales razones de este incremento es el interés en la conservación de la energía así como la reducción en el costo del concreto que se obtiene al emplear cenizas o escorias para reemplazar parcialmente al cemento.

### Materiales nominalmente inertes

Los materiales nominalmente inertes tienen pocas o nulas propiedades cementantes. Algunos de los materiales nominalmente inertes son el cuarzo en bruto finamente dividido, las dolomitas, muchas calizas, el mármol, el granito, y otros materiales. Los materiales inertes frecuentemente se emplean como adición al cemento y como una sustitución parcial de la arena en el concreto para mejorar las trabajabilidades pobres causadas frecuentemente por la falta de finos en la arena. A veces se agrega a los concretos caliza pulverizada para reducir la reactividad álcali-sílice.

\* Referencia 6-31.

## EFFECTOS EN EL CONCRETO DEBIDOS A LOS ADITIVOS MINERALES

El objetivo de esta sección es proporcionar un breve conocimiento sobre las propiedades que los aditivos minerales modifican, así como el grado de influencia que ciertos aditivos minerales llegan a tener en el concreto.

Los aditivos minerales finamente divididos varían considerablemente respecto al efecto que producen en las mezclas de concreto. Antes que se acepte usar tales aditivos, se deberán ensayar junto con el cemento y los agregados específicos que se vayan a emplear para averiguar su conformidad respecto a los requerimientos de agua, al desarrollo de resistencia, a la contracción, al calor de hidratación, a la durabilidad, o con respecto a ciertas propiedades especiales, como la prevención de reacciones álcali-agregado o la reducción del ataque de los sulfatos. Dependiendo de las propiedades de los materiales y del efecto que se desee dar al concreto, los materiales finamente divididos se agregan al concreto además del cemento o bien como una sustitución parcial de éste.

La ceniza volante, la escoria granulada de alto horno molida, y el humo de sílice condensado son los principales materiales finamente divididos que se utilizan actualmente en el concreto. Se han desarrollado estudios muy completos a corto y a largo plazo con estos materiales. Por estas razones, esta sección se refiere principalmente al uso de la ceniza volante, de la escoria granulada de alto horno molida, y del humo de sílice en el concreto, salvo en los lugares donde se hace notar lo contrario. Además, los efectos que provocan la ceniza volante y la escoria molida en las propiedades que se comentan en seguida, son también aplicables a los cemento-mezclados (ASTM C 595) que hacen uso de estos materiales.

### Efectos sobre el concreto fresco

**Requerimientos de agua.** Las mezclas de concreto que contienen cenizas volantes o escorias granuladas de alto horno molidas, casi siempre requieren menos agua (aproximadamente de 1% a 10%) para obtener un cierto revenimiento que los concretos que sólo contienen cemento portland. Existen sin embargo, algunas cenizas volantes, escorias molidas y puzolanas naturales en que lo inverso es cierto; esto es, que el concreto fabricado con tales ingredientes requerirá más agua que sin ellos. La ceniza volante reduce la demanda de agua de la misma manera en que lo hacen los reductores de agua químicos en estado líquido.\*

Los concretos con humo de sílice requieren de más agua para obtener un revenimiento dado, a menos que se emplee un reductor de agua o un superplastificante. Algunas mezclas pobres no experimentan aumentos en la demanda de agua cuando se tiene presente solamente una pequeña cantidad de humo de sílice.

**Contenido de aire.** La cantidad de aditivo inclusor de aire que se requiere para lograr un contenido de aire especificado normalmente es mayor cuando se utilizan cenizas volantes o humo de sílice. La ceniza Clase C generalmente necesita menos aditivo inclusor de aire que la ceniza Clase F y tiende

\* Referencia 6-28.

a perder menos aire con el tiempo de mezclado. Las escorias molidas presentan efectos variables respecto a la dosificación necesaria de aditivo inductor de aire.

Las inclusiones de escorias molidas, ceniza volante, y humo de sílice en concretos sin aire incluido generalmente reducen la cantidad de aire atrapado. La ceniza volante y el humo de sílice normalmente muestran un mayor efecto en esta reducción que la escoria molida.

La cantidad requerida de aditivo inductor de aire para obtener un cierto contenido de aire es función de la finura, del contenido de carbono, del contenido de álcalis, del contenido de materia orgánica, de la pérdida por ignición, y de la presencia de impurezas en las cenizas volantes. Los incrementos en el contenido de álcalis disminuyen las dosificaciones de agente inductor de aire, mientras que los incrementos en los demás factores mencionados elevan los requisitos de dosificación. La prueba del Índice de Espuma (consulte el Capítulo 14) da una buena indicación de las dosis necesarias de aditivo inductor de aire para varias cenizas volantes.\*\*

Trabajabilidad. La ceniza volante, la escoria molida, y muchos materiales inertes generalmente mejoran la trabajabilidad de los concretos de igual resistencia y revenimiento. El humo de sílice podría reducir la trabajabilidad; por eso normalmente se agregan reductores de agua de alto rango a los concretos con humo de sílice para mantener la trabajabilidad.

Segregación y sangrado. Los concretos en los que se emplea ceniza volante o humo de sílice por lo general muestran menos segregación y sangrado que los concretos simples. Este efecto hace a la ceniza volante particularmente valiosa en los concretos fabricados con agregados que presentan deficiencias en su contenido de finos. Los concretos que utilizan ciertas escorias granulares de alto horno molidas, tienden a presentar sangrados ligeramente mayores que los concretos sin aditivo. Las escorias no tienen efectos adversos en lo referente a la segregación.

Calor de hidratación. El uso de cenizas volantes y de escorias molidas reducen la cantidad de calor que se forma en una estructura de concreto debido a su menor calor de hidratación. Algunas puzolanas tienen un calor de hidratación del orden del 40% del presentado por el cemento. Esta reducción en el aumento de la temperatura resulta especialmente benéfico en los concretos usados en estructuras masivas.† El humo de sílice puede o no reducir el calor de hidratación; sin embargo, el calor de hidratación se eleva con la presencia de aditivos superplastificantes hasta una cantidad mayor de la que se obtendría con el cemento portland ordinario.††

Tiempo de fraguado. El uso de cenizas volantes, puzolanas naturales y escorias granuladas de alto horno molidas generalmente provoca retardos en el tiempo de fraguado del concreto. Por ejemplo, en un estudio, la ceniza volante provocó que el fraguado inicial se retardara de 10 a 55 minutos y que el fraguado final se retardara de 5 a 130 minutos; la mezcla contenía 230 kg de cemento Tipo I y 76 kg de ceniza volante, en tanto que la mezcla testigo contenía 306 kg de cemento por metro cúbico y nada de ceniza volante. El grado de retardo en el fraguado depende de factores tales como la cantidad de cemento portland, el requisito de agua, el tipo del material finamente dividido, y la temperatura del concreto. El tiempo de fraguado aumenta con las cenizas

volantes que hacen aumentar los requisitos de agua. Habitualmente los retrasos considerables en los fraguados provocan incrementos en las presiones laterales en las cimbras, y deberán tomarse en cuenta al diseñar cimbras por presión de fluidos. Se puede hacer uso de aditivos acelerantes para reducir el tiempo de fraguado.†††

Acabados. Los aditivos finamente divididos generalmente mejoran la capacidad de acabados al concreto o tienen efectos mínimos, en comparación con las mezclas similares de concreto que no incluyen a estos aditivos.

Bombeo. El empleo de los aditivos minerales finamente divididos por lo general mejora al bombeo del concreto.

Proporciónamiento. Los aditivos minerales finamente divididos se agregan al concreto como una adición o para sustituir parcialmente al cemento en el concreto o bien como una combinación de adición y sustitución. El empleo de estos aditivos como sustitutos de cemento puede reducir sustancialmente las resistencias del concreto a edad temprana y a 28 días si se proporcionan rígidamente como un reemplazo del cemento más que como una combinación.

La ceniza volante, cuando se emplea en los Estados Unidos, consiste generalmente del 15 al 20% del peso del cemento más puzolana.‡ Sin embargo, algunas cenizas de alto contenido de calcio Clase C han sido empleadas de manera satisfactoria en concretos en los que el componente de ceniza era de 30 a 50% hasta un sorprendente 80% del material de cemento-más-puzolana.‡‡

La escoria de alto horno granulada molida, cuando se emplea en concretos en los Estados Unidos, normalmente constituye un promedio de aproximadamente 40% del material cementante en la mezcla. Algunos concretos con escoria tienen un componente de escoria correspondiente a un 70% ó más del material cementante.

El humo de sílice ha sido empleado como reemplazo parcial del cemento o como adición al cemento en cantidades que varían entre el 5 y 10% y hasta llegar al 30% en peso del material cementante total.

Cuando se pretende mejorar una propiedad particular, como la resistencia al ataque de los sulfatos o la resistencia a la reactividad álcali-agregado, el contenido óptimo de aditivo mineral se debe obtener con ensayos (1) para determinar si el aditivo está mejorando de verdad la propiedad y (2) para determinar la dosificación correcta, puesto que una sobredosificación o una dosificación en menores cantidades puede ser nociva o no tener efecto. Los aditivos minerales también reaccionan de manera distinta con cementos diferentes.

Curado. Los efectos de la temperatura y de las condiciones de humedad sobre las propiedades de fraguado y sobre el desarrollo de la resistencia de los concretos que contienen aditivos minerales finamente divididos, son parecidos a los

\*\* Referencia 6-8.

† Referencia 6-33.

†† Referencia 6-10, páginas 665 a 676, y Referencia 6-23, páginas 923 a 940 y 1231 a 1260.

††† Referencia 6-21.

‡ Referencia 6-17.

‡‡ Referencia 6-23, página 353.

efectos en el concreto fabricado únicamente con cemento portland; pese a lo anterior, el tiempo de curado efectivo podría requerir ser mayor. Un concreto que contenga cemento portland y aditivo mineral podría desarrollar su resistencia más lentamente que un concreto que solo contenga cemento portland. Se debe tener en cuenta esto al efectuar el proporcionamiento del concreto (Vea el párrafo subsecuente sobre "Resistencia").

Las dosificaciones de humo de sílice relativamente altas pueden producir concretos extremadamente cohesivos con muy poca segregación de agregados o sangrado. Al disponerse de poca o nula agua de sangrado en la superficie del concreto para evaporación; se pueden llegar a desarrollar agrietamientos plásticos en los días de colado cálidos y con viento si no se han tomado precauciones especiales.

El curado adecuado de todos los concretos, en especial de aquellos que contienen aditivos minerales, debe comenzar inmediatamente después del acabado. En los concretos que contienen ciertas cenizas volantes, las temperaturas bajas de curado (4°C), pueden llegar a producir una reducción en el desarrollo de resistencias a edades tempranas y en la durabilidad contra la congelación-deshielo y contra los productos descongelantes.†

## Efectos en el concreto endurecido

**Resistencia.** La ceniza volante, la escoria granulada de alto horno molida, el humo de sílice y otros aditivos minerales finamente divididos, contribuyen a la adquisición de resistencia del concreto. Sin embargo, la velocidad en la adquisición de resistencia de un concreto que contenga estos aditivos, variará con frecuencia respecto de la de un concreto que emplee exclusivamente cemento portland como material cementante. La resistencia a la tensión, a la flexión y a la torsión se ve afectada de igual manera que la resistencia a la compresión. Debido a la menor velocidad de hidratación cuando se emplean algunos de estos aditivos, la adquisición de resistencia a edades tempranas puede ser menor que la de un concreto comparable sin el aditivo, especialmente si las temperaturas de curado son bajas.

Debido a la lenta reacción puzolánica de algunos aditivos minerales, puede llegar a ser necesario un período de curado húmedo continuo con temperaturas de curado favorables mayor del que normalmente se requiere. No obstante, los concretos con humo de sílice se afectan menos con eso y por lo general igualan o exceden la resistencia a un día de edad de las mezclas de control que sólo contienen cemento.†† El humo de sílice contribuye al desarrollo de resistencia especialmente entre los 3 y los 28 días, tiempo durante el cual un concreto con humo de sílice rebasa la resistencia del testigo. El humo de sílice también contribuye a la adquisición de resistencia a edad temprana de los concretos con ceniza volante.‡

El desarrollo de la resistencia de un concreto con ceniza volante o con escoria molida, es similar al de un concreto normal si se cura alrededor de 21°C. Los concretos fabricados con ciertas cenizas volantes altamente reactivas (principalmente las cenizas con contenido elevado de calcio Clase C) o con escorias molidas, con sustituciones bajas o moderadas de cemento, pueden igualar o rebasar la resistencia del testigo durante los días 1 a 28. Algunas

cenizas volantes y puzolanas naturales requieren de 28 a 90 días o más para igualar o exceder la resistencia del testigo a los 28 días, dependiendo de las proporciones de las mezclas. Los concretos elaborados con otras cenizas volantes o puzolanas naturales tal vez nunca lleguen a alcanzar la resistencia del concreto testigo. Por lo general, los concretos que contienen cenizas Clase C desarrollan mayores resistencias a edad temprana que los concretos con cenizas Clase F.‡‡

La adquisición de resistencia se puede mejorar aumentando la cantidad de cemento en el concreto, disminuyendo la relación agua - cemento-más-puzolana, mejorando las condiciones de curado o usando un aditivo acelerante. El diseño de los concretos masivos generalmente aprovecha la adquisición retardada de resistencia de las puzolanas porque estas estructuras no se ponen en servicio total de manera inmediata.

Los aditivos minerales son a menudo esenciales para producir concretos de alta resistencia. Se han utilizado cenizas volantes especialmente en la producción de concreto de alta resistencia de entre 400 y 1000 kg/cm<sup>2</sup>. Con el humo de sílice, los productores de concreto premezclado tienen la capacidad de producir concretos con resistencias de 1400 kg/cm<sup>2</sup> ó más si se hace uso de agregados adecuados y de un aditivo reductor de agua de alto rango.

La adherencia del concreto al concreto o al acero, al igual que las resistencias al impacto y a la abrasión del concreto se relacionan con la resistencia a la compresión. Los aditivos minerales por lo general no afectan a estas propiedades más allá de su influencia sobre la resistencia.

**Contracción por secado y fluencia.** Cuando se emplean en cantidades bajas a moderadas, el efecto que la ceniza volante, la escoria granulada de alto horno molida y el humo de sílice ejercen sobre la contracción por secado y sobre la fluencia del concreto por lo general es pequeño y de poca importancia práctica. Los concretos que contienen escoria molida en proporción de 40 a 65% del peso del material cementante total, pueden llegar a exhibir una contracción por secado un poco mayor que la correspondiente a un concreto simple.‡‡‡ A niveles de sustitución elevados, la fluencia puede aumentar conforme se vayan aumentando los contenidos de ceniza.\* Se dispone de poca información acerca de los efectos que el humo de sílice tiene en la fluencia; sin embargo, algunos estudios indican que el humo de sílice puede reducir la fluencia.\*\*

**Permeabilidad y absorción.** Si se cuenta con un curado adecuado, las cenizas volantes y las escorias molidas, generalmente reducen la permeabilidad del concreto aún cuando el contenido de cemento sea relativamente bajo; a este respecto, el humo de sílice es especialmente efectivo. Las

† Referencia 6-22.

†† El contenido de cemento de la mezcla de control en este análisis se supone igual a los contenidos en peso de cemento más puzolana de la mezcla de prueba.

‡ Referencia 6-10, páginas 765 a 784.

‡‡ La Referencia 6-21 trata sobre el aumento de resistencia de concreto con ceniza volante con curado al aire y con curado húmedo.

‡‡‡ Referencia 6-5.

\* Referencia 6-10, páginas 87 a 102, 157, y 307 a 319.

\*\* Referencia 6-10, página 29.

pruebas indican que la permeabilidad del concreto disminuye conforme aumenta la cantidad de material cementante hidratado y disminuye la relación agua-cemento. La absorción de un concreto con ceniza volante casi es la misma de un concreto sin ceniza, aunque algunas cenizas pueden reducir la absorción en un 20% ó más.

**Color del concreto.** Algunos materiales finamente divididos pueden colorear ligeramente al concreto endurecido. Estos efectos se relacionan con el color y la cantidad de aditivo empleado en el concreto. Muchos aditivos minerales se parecen al cemento y por lo tanto tienen poco efecto en el color. Algunos humos de sílice pueden dar al concreto un tinte ligeramente azulado o gris oscuro, y la ceniza volante oscura puede impartir un color oscuro al concreto cuando se utiliza en grandes cantidades.

**Reactividad álcali-agregado.** La reactividad álcali-sílice entre los álcalis del cemento y la sílice reactiva del agregado puede controlarse por medio del uso de ciertos aditivos minerales. Se ha reportado que el humo de sílice, la ceniza volante y la escoria granulada de alto horno molida reducen de manera importante la reactividad álcali-sílice. Las cenizas Clase F han disminuido la expansión reactiva hasta en un 70% ó más en algunos casos. La mayoría de las cenizas Clase C también reducen la reactividad pero en menor grado que la mayoría de cenizas Clase F. Se deberá evitar el uso de aditivos minerales que contengan cantidades considerables de álcalis solubles en el agua, como ocurre con ciertas cenizas Clase C, pues más que disminuir la reactividad, la pueden llegar a aumentar. †† Los aditivos minerales proporcionan hidratos de silicato de calcio adicionales para enlazar químicamente a los álcalis en el concreto. La determinación de las proporciones óptimas de los aditivos minerales es importante para lograr reducciones máximas de reactividad. Consulte también el Capítulo 4.

Un aditivo mineral que reduzca las reacciones álcali-sílice no necesariamente puede reducir las reacciones álcali-carbonato, reacción que involucra a los álcalis del cemento y a ciertas calizas dolomíticas.

**Resistencia al ataque de los sulfatos.** Mediante un proporcionamiento adecuado, el humo de sílice, la ceniza volante y la escoria molida por lo general mejoran la resistencia del concreto contra el ataque de los sulfatos y contra el agua de mar, fundamentalmente porque reducen la cantidad necesaria de elementos reactivos (tales como el calcio) para que se produzcan las reacciones expansivas con los sulfatos.

La mejora relativa de resistencia a los sulfatos por el uso de cenizas volantes, es mayor en los concretos con bajo contenido de cemento que en aquellos concretos con contenidos de cemento altos. También la efectividad de la ceniza volante mejora conforme aumentan las concentraciones de sulfatos. Para una mayor resistencia a los sulfatos en un concreto pobre, un estudio demostró que en el caso de una ceniza particular Clase F, la cantidad óptima consistió de aproximadamente 20% ‡ del cemento-más-ceniza volante; con esto se ilustra lo necesario que es determinar los contenidos óptimos de ceniza, pues los contenidos mayores de ceniza resultaron ser perjudiciales al usarse junto con ciertos cementos. La resistencia a los sulfatos de un concreto con un alto contenido de cemento fabricado con un cemento de bajo C<sub>3</sub>A es tan grande que la ceniza volante tiene poca oportunidad de mejorar la resistencia. Las cenizas Clase F por lo general

elevan la resistencia a los sulfatos de manera más eficiente que las cenizas Clase C.

Según algunos reportes, las escorias granuladas de alto horno molidas aparentemente tienen un menor efecto en la resistencia del concreto al ataque de los sulfatos que las cenizas volantes. Un estudio a largo plazo mostró resistencias a los sulfatos ligeramente inferiores en un concreto que contenía escoria molida, en comparación con un concreto que contenía cemento portland como único material cementante. ‡‡ Otros estudios indican que el concreto con escoria molida, tiene una resistencia a los sulfatos igual o mayor que el concreto fabricado con cemento resistente a los sulfatos Tipo V.§

El humo de sílice suministra al concreto una excelente resistencia a los sulfatos, mejor que la obtenida por la ceniza volante o por la escoria molida en algunos estudios.

**Corrosión del acero ahogado.** Algunos aditivos minerales finamente divididos reducen la corrosión del acero al disminuir la permeabilidad al agua, aire, y iones cloruro de un concreto que ha sido curado adecuadamente. La ceniza volante puede reducir de manera importante la entrada de los iones cloruro. El humo de sílice disminuye grandemente la permeabilidad y la entrada de iones cloruro y también aumenta significativamente la resistividad eléctrica, reduciendo en consecuencia la reacción electroquímica de la corrosión. El concreto que contiene humo de sílice a menudo se emplea en las capas superiores y en el colado de losas enteras de puentes y de edificios para estacionamiento, estructuras que resultan ser particularmente vulnerables a la corrosión debido al ingreso de los iones cloruro.

**Carbonatación.** La carbonatación del concreto es un proceso por el cual el bióxido de carbono que existe en el aire penetra en el concreto y reacciona con los hidróxidos, tales como el hidróxido de calcio, para formar carbonatos. En la reacción con el hidróxido de calcio, se forma carbonato de calcio. La carbonatación aumenta la contracción al secarse (propiciando el desarrollo de agrietamientos) y disminuye la alcalinidad del concreto. Se requiere de una alta alcalinidad para proteger al acero ahogado contra la corrosión; consecuentemente el concreto debe ser resistente a la carbonatación para ayudar a prevenir la corrosión del acero. La carbonatación se ve incrementada de manera importante en los concretos que tienen una relación agua-cemento altas, bajos contenidos de cemento, períodos cortos de curado, resistencias bajas, y pastas extremadamente permeables o porosas. La profundidad de carbonatación en un concreto de buena calidad y bien curado generalmente es de poca importancia práctica.

El humo de sílice reduce ligeramente la velocidad de carbonatación. Se ha reportado que la escoria molida y la ceniza volante aumentan ligeramente la carbonatación en los concretos con períodos de curado cortos (normales) y dis-

†† Referencias 6-28, 6-29, 6-30, 6-31, y 6-32.

‡ Referencia 6-7.

‡‡ Referencia 6-13.

§ Referencia 6-5.

minuyen levemente o tienen poco efecto en la carbonatación con períodos de curado largos.\*

**Resistencia a la congelación-deshielo.** Generalmente se reporta que los concretos con inclusión de aire que contienen ceniza volante, escoria granulada de alto horno molida, o humo de sílice tienen una buena durabilidad a la congelación y al deshielo. Para lograr que los concretos que contienen aditivos minerales finamente divididos presenten la misma resistencia ante los ciclos de congelación-deshielo que los concretos fabricados con cemento portland como aglutinante único, se deben cumplir tres condiciones:

1. Que ambos concretos tengan aproximadamente la misma resistencia a la compresión
2. Que ambos concretos tengan un sistema equivalente y adecuado de vacíos de aire
3. Que ambos concretos hayan sido curados adecuadamente

Para una buena resistencia a la congelación se deberán seguir los requisitos que se presentan en el Capítulo 5.

**Descascaramiento por productos químicos descongelantes.** La resistencia a la descamación por productos descongelantes de un concreto hecho sin aditivos minerales, comúnmente es mejor que la de un concreto fabricado con aditivos minerales. La resistencia a la descamación disminuye a medida que aumenta el contenido de aditivo mineral.

En todos los concretos la resistencia al descascaramiento por productos descongelantes aumenta de manera importante con el empleo de una relación agua-cemento baja, con un contenido de cemento moderado a alto, con la inclusión de aire, con un acabado y curado adecuados, y con un período de secado previo a la exposición del concreto a las sales y a las temperaturas de congelación. Un concreto pobre con una cantidad de material cementante de aproximadamente 237 kg por metro cúbico o menos puede ser muy vulnerable al descascaramiento por productos descongelantes. Para una resistencia adecuada a estos productos se recomienda un contenido mínimo de material cementante de alrededor de 335 kg por metro cúbico de concreto así como una relación agua-(cemento más puzolana) máxima de 0.45. Para mayor información consulte el Capítulo 5.\*\*

**Resistencia química.** La resistencia del concreto a los productos químicos concentrados, tales como los ácidos, normalmente permanece sin cambio o mejora levemente (especialmente donde se reduce la permeabilidad y la absorción) con la adición de los aditivos minerales.

**Sanidad.** La sanidad se refiere aquí a la estabilidad volumétrica de la pasta cementante. La CaO y MgO (periclasa) libres en cantidades excesivas pueden causar falta de sanidad (expansión nociva). La mayoría de los aditivos minerales no contribuyen a la falta de sanidad y algunos de ellos pueden reducirla cuando se emplean en proporciones normales. La prueba en autoclave requerida por la norma ASTM C 618 ayuda a prevenir el uso de materiales carentes de sanidad.†

ciertas características del agregado como la forma de la partícula y a algunas granulometrías inadecuadas. Bajo estas circunstancias puede ser necesario mejorar la trabajabilidad, sobre todo si el concreto va a tener un acabado con llan. También es importante contar con una buena trabajabilidad en el concreto que se llegue a colar en miembros extremadamente reforzados o colocados por métodos de bombeo o con tubo tremie. Si se eleva el contenido de cemento o la cantidad de agregado fino frecuentemente se logra la trabajabilidad deseada.

Uno de los mejores agentes para la trabajabilidad es el aire incluido. Actúa como lubricante y es especialmente efectivo para mejorar la trabajabilidad de mezclas pobres y ásperas. Los reductores de agua normales y los de alto rango (superplastificantes) también mejoran la trabajabilidad.

Algunos materiales orgánicos, tales como los alginatos y los derivados de la celulosa, aumentan el revenimiento cuando se agregan al concreto con un contenido de agua dado. La composición de estos agentes para la trabajabilidad puede ser similar a la de algunos aditivos reductores de agua y retardantes. También pueden tener la capacidad de incluir aire.

Los aditivos minerales finamente divididos se emplean para mejorar la trabajabilidad de aquellas mezclas deficientes en material que pase las mallas No. 50 (0.30 mm) y No. 100 (0.15 mm).

## INHIBIDORES DE LA CORROSION

El acero ahogado en el concreto queda protegido contra la corrosión gracias a la naturaleza altamente alcalina del concreto. El ambiente de elevado PH (normalmente mayor 12.5) ocasiona que se forme una película protectora de óxido no corrosiva y pasiva en el acero. Sin embargo, la carbonatación o la presencia de iones cloruro provenientes de los productos descongelantes o del agua de mar puede destruir o penetrar la película. Una vez que esto ha ocurrido, se forma una celda eléctrica a lo largo del acero o entre las barras de acero y comienza el proceso electroquímico de la corrosión. Algunas áreas de acero a lo largo de la barra se convierten en el ánodo de descarga de corriente de la celda eléctrica y allí se va en solución el fierro. Las áreas de acero que reciben la corriente son los cátodos donde se forman los iones hidróxido. El fierro junto con los iones hidróxido forman hidróxido de fierro, FeOH, el cual posteriormente se oxida para formar herrumbre u óxido de fierro. La formación del herrumbre es un proceso expansivo - el herrumbre se expande hasta cuatro veces su volumen original - lo que induce esfuerzos internos y el eventual descascaramiento del concreto que recubre al acero de refuerzo. También el área transversal del acero puede quedar reducida de manera importante. Una vez que ha comenzado, la velocidad de corrosión del acero se ve afectada por la resistividad eléctrica del concreto, el contenido de humedad, y la velocidad a la que emigra el oxígeno a través del concreto para alcanzar al acero. Los iones cloruro

\* Referencias 6-10 y 6-30.

\*\* Referencias 6-1, 6-5, 6-10, 6-22, 6-25, 6-30, y 6-32.

† Referencia 6-28.

## AGENTES PARA LA TRABAJABILIDAD

El concreto fresco resulta ser en ciertas ocasiones áspero debido a los deficientes proporcionamientos de la mezcla o a



solos también pueden penetrar la película pasiva en el refuerzo y combinarse con los iones de hierro para formar un complejo cloruro de hierro soluble, que conduce al hierro dentro del concreto para quedar oxidado posteriormente y formar herrumbre.

Los aditivos inhibidores de la corrosión detienen químicamente la reacción de la corrosión. El inhibidor de corrosión líquido más comúnmente empleado, el nitrito de calcio, bloquea la reacción de corrosión de los iones cloruro reforzando químicamente y estabilizando la película pasiva. El ión nitrito provoca que los óxidos de hierro se vuelvan insolubles. En efecto, se evita que los iones cloruro penetren la película pasiva y que entren en contacto con el acero. Una cierta cantidad de nitrito de calcio puede parar la corrosión hasta un cierto nivel de penetración del ión cloruro. En consecuencia, mayores niveles de penetración de cloruros requieren de mayores niveles de nitrito de calcio para detener la corrosión. El nivel de penetración en el cual comienza la corrosión en un concreto normal sin inhibidor de corrosión es de 0.15% de ión cloruro soluble en el agua por peso de cemento.\* El acceso en el ingreso de cloruros y la corrosión disminuyen notablemente con relaciones agua-cemento bajas. El nitrito de calcio también es un acelerante.\*\*

Otros métodos para reducir la corrosión incluyen el uso de aceros de refuerzo recubiertos con epóxicos (ASTM D 3963), tratamientos de superficie, sobrecapas de concreto, y protección catódica.

El acero de refuerzo recubierto con epóxico actúa evitando que los iones cloruro alcancen al acero. Los tratamientos de superficie y las sobrecapas de concreto intentan detener o reducir la penetración del ión cloruro en la superficie del concreto. Como tratamientos de superficie se emplean las silanas, las siloxanas, los metacrilatos, los epóxicos, y otros materiales.

Los materiales impermeables, tales como la mayoría de epóxicos, no se deben usar en losas para pavimentos o en los concretos donde la humedad se pueda congelar bajo el recubrimiento. El agua congelada puede provocar delaminación superficial debajo de la capa impermeable. Para reducir el ingreso de iones cloruro en las sobrecapas se emplean concretos con cemento portland modificado con látex, concretos de bajo revenimiento y concretos con humo de sílice.

Los métodos de protección catódica invierten el flujo de la corriente de corrosión a través del concreto y el acero de refuerzo. Esto se logra insertando un ánodo no estructural en el concreto y forzando al acero para que sea el cátodo por medio de la carga eléctrica del sistema. El ánodo se conecta al polo positivo de un rectificador. Puesto que la corrosión ocurre donde la corriente abandona al acero, el acero no puede corroerse si está recibiendo la corriente inducida.†

## AGENTES A PRUEBA DE HUMEDAD

Se puede rastrear el paso de agua a través del concreto hasta la existencia de grietas o de áreas que han tenido una consolidación incompleta. Un concreto denso y sano que haya sido fabricado con una relación agua-cemento inferior a 0.50 en peso será hermético si fue colocado y curado de manera correcta.

Los aditivos que se conocen como agentes a prueba de humedad comprenden a ciertos jabones, estearatos, y productos derivados del petróleo. Pueden, aunque generalmente no lo hacen, reducir la permeabilidad de los concretos que tienen contenidos de cemento bajos, relaciones agua-cemento altas, o deficiencias de finos en los agregados. Su uso en mezclas bien proporcionadas, puede aumentar el agua de mezclado requerida y resultar realmente en un incremento en la permeabilidad, en lugar de una reducción en ésta.

Los aditivos a prueba de humedad se emplean en ocasiones para reducir la transmisión de humedad a través de concretos que estén en contacto con agua o con tierra húmeda. Muchos de estos aditivos no resultan efectivos, especialmente cuando se usan en concretos que están en contacto con agua a presión.

## AGENTES IMPERMEABILIZANTES

Los agentes impermeabilizantes reducen la velocidad a la cual se transmite agua a presión a través del concreto. Uno de los mejores métodos para disminuir la permeabilidad en el concreto, consiste en aumentar el contenido de cemento y el período de curado húmedo y reducir la relación agua-cemento a menos de 0.5. La mayoría de aditivos que reducen la relación agua-cemento disminuyen consecuentemente la permeabilidad. Algunos aditivos minerales, especialmente el humo de sílice, reducen la permeabilidad por medio del proceso de hidratación y de reacción puzolánica.

## ADITIVOS COLORANTES

Se da color al concreto haciendo uso de materiales naturales y sintéticos por razones estéticas y de seguridad. El concreto de color rojo se utiliza a menudo alrededor de las líneas subterráneas eléctricas o de gas como advertencia de su presencia. Normalmente, el peso de los pigmentos (ASTM C 979) no deberá exceder al 10% del peso del cemento. En general, el uso de pigmentos en cantidades inferiores al 6% del peso del cemento no afecta a las propiedades del concreto.

El negro de humo sin modificar reduce sustancialmente el contenido de aire. La mayoría de negros de humo que se utilizan como colorantes para concreto contiene un aditivo para compensar su efecto en el contenido de aire. Antes de que se emplee un aditivo colorante en un proyecto dado, deberá probarse su firmeza de color contra la luz solar y con autoclave, su estabilidad química con el cemento, y los efectos que pudiera ocasionar en las propiedades del concreto.

## AYUDAS DE BOMBEO

Las ayudas de bombeo se agregan a las mezclas de concreto para mejorar su bombeabilidad. Las ayudas de bombeo pueden corregir todas las mezclas de concreto no bombeables; su empleo se efectúa para convertir más bombeable a

\* Referencia 6-18, página 12.

\*\* Referencias 6-10, páginas 719-723; 6-14; y 6-16.

† Referencia 6-14.

algún concreto marginalmente bombeable. Estos aditivos espesan el fluido en el concreto (aumentan la viscosidad) para reducir la deshidratación de la pasta mientras se encuentra bajo la presión de la bomba.

Ciertas ayudas de bombeo pueden incrementar la demanda de agua, reducir la resistencia a compresión, provocar inclusión de aire, o retardar el tiempo de fraguado. Estos efectos colaterales pueden corregirse con el ajuste de las proporciones de la mezcla, o con la adición de algún otro aditivo que compense el efecto colateral.

En la Tabla 6-1 se presenta una lista parcial de los materiales empleados como ayudas de bombeo. Otros aditivos que se utilizan para distintos propósitos principales pero que también mejoran la bombeabilidad son los aditivos inclusores de aire, la ceniza volante, y algunos aditivos reductores de agua y retardantes de fraguado.

## ADITIVOS QUÍMICOS PARA REDUCIR LA REACTIVIDAD CON LOS ALCALIS

Algunos productos químicos han tenido éxito para reducir la expansión álcali-agregado. De éstos, las sales de litio y de bario han mostrado reducciones sobresalientes.

Sin embargo, los métodos más prácticos para reducir la expansión álcali-agregado consisten en el uso de puzolanas de las cuales se conozca su capacidad para reducir la expansión álcali-agregado, en el uso de agregados no reactivos, o en el empleo de cementos con bajo contenido de álcalis.

## ADITIVOS Y AGENTES PARA UNIR

Los aditivos para unir normalmente son emulsiones de agua de materiales orgánicos entre los que se incluyen al hule, al cloruro de polivinilo, al acetato de polivinilo, a los acrílicos, a los copolímeros de butadieno estireno, y a otros polímeros. Se les agregan a las mezclas de cemento portland para incrementar la adherencia entre un concreto nuevo y uno viejo. La resistencia a la flexión y la resistencia al ingreso de iones cloruro también son mejoradas. Estos aditivos se agregan en proporciones equivalentes de 5 a 20% en peso del cemento. La cantidad real dependerá de las condiciones de trabajo y del tipo de aditivo empleado. Algunos aditivos de este tipo pueden aumentar el contenido de aire de las mezclas a las cuales han sido suministrados.

Los tipos no reemulsionables son resistentes al agua, están mejor adaptados para su aplicación en exteriores, y se emplean en lugares donde exista humedad.

El resultado final obtenido con un aditivo para unir, dependerá en gran medida de la superficie en que se aplique. La superficie deberá estar seca, limpia, sana, libre de mugre, polvo, pintura y grasa, y a una temperatura adecuada. Los concretos orgánicos o los modificados con polímeros resultan ser aceptables para "parchados" o para sobrecapas delgadas unidas, particularmente donde se deseen biseles afilados.

No se debe confundir a los agentes para unir con los aditivos para unir. Los aditivos son ingredientes en el concreto; los agentes para unir se aplican a las superficies de concreto existentes inmediatamente antes de que se coloque

el concreto nuevo. Los agentes para unir ayudan a pegar los nuevos materiales con los ya existentes. Los agentes para unir se utilizan comúnmente en los trabajos de restauración y de reparación y consisten de mortero (lechada) de cemento portland o de cemento portland modificado con látex o de polímeros tales como los epóxicos (ASTM C 881) o como el látex (ASTM C 1059). Consulte el Capítulo 15 para mayor información acerca de los concretos de cemento portland con polímeros.

## LECHADAS

Las lechadas de cemento portland se emplean para una variedad de propósitos: para estabilizar cimentaciones, para montar bases para máquinas, para rellenar grietas y juntas en obras de concreto, para cementar pozos petrolíferos, para rellenar núcleos de muros de mampostería, para inyección de lechada en tendones de presfuerzo y pernos de anclaje, y para rellenar los vacíos en los concretos con agregados precolocados. Para modificar las propiedades de las lechadas en aplicaciones muy específicas, a menudo se utilizan diversos aditivos inclusores de aire, acelerantes, retardantes y agentes contra la contracción así como agentes para mejorar la trabajabilidad.

## AGENTES PRODUCTORES DE GAS

En ocasiones se agrega polvo de aluminio y otros materiales productores de gas al concreto o a las lechadas en cantidades muy pequeñas para producir una leve expansión antes del endurecimiento. Esto es de utilidad en los casos en que es esencial el relleno total de un área confinada, como bajo las bases de máquinas o en los ductos de postensado en concretos presforzados. Estos agentes se utilizan en cantidades mayores para producir concretos celulares ligeros (Consulte el Capítulo 15). La magnitud de la expansión resultante depende de la cantidad de material productor de gas que se haya utilizado, de la temperatura de la mezcla en estado fresco, del contenido de álcalis del cemento, y de otras variables. Donde la expansión resulte crítica, se deberá ejercer un control muy cuidadoso en las mezclas y en las temperaturas. Los agentes productores de gas no compensan la contracción posterior al endurecimiento provocada por secado o por carbonatación.

## EXCLUSORES DE AIRE

Los aditivos exclusores de aire reducen el contenido de aire en el concreto. Se emplean cuando no es posible reducir el contenido de aire con el ajuste de las proporciones de la mezcla ni con el cambio en la dosificación del agente inclusor de aire u otros aditivos. Aún así, los exclusores de aire se emplean muy raramente y tanto su efectividad como su dosificación deberán establecerse por medio de mezclas de prueba antes de utilizarlos en las mezclas definitivas. En la Tabla 6-1 se enlistan los principales componentes de los agentes exclusores de aire.

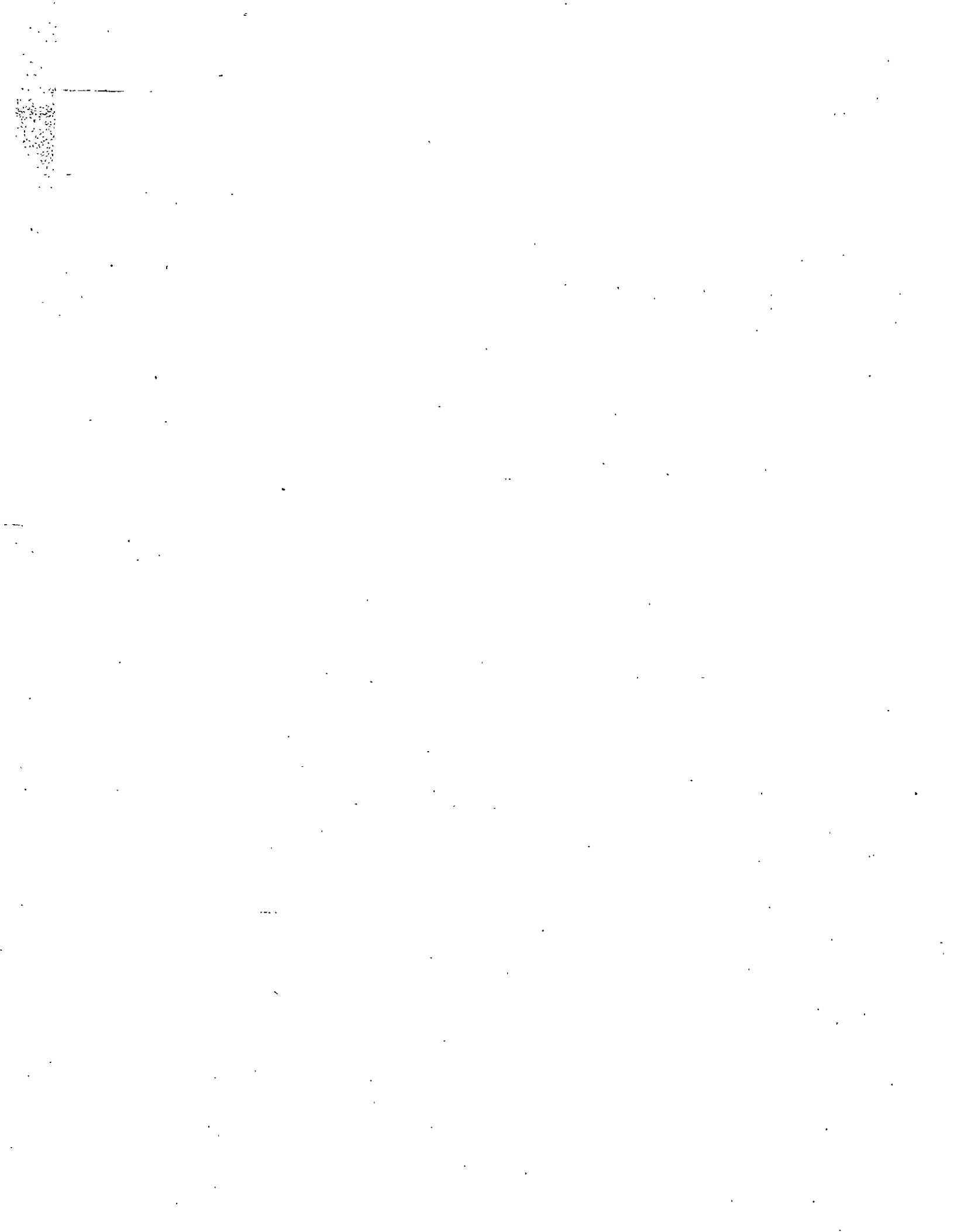


## ADITIVOS FUNGICIDAS, GERMICIDAS E INSECTICIDAS

Se puede controlar parcialmente al crecimiento de bacterias y hongos en el interior o en la superficie de los concretos endurecidos haciendo uso de aditivos fungicidas, germicidas e insecticidas. Los materiales más efectivos son los fenoles polihalogenados, las emulsiones de dieldrin, y los compuestos de cobre. Por lo general la efectividad de estos materiales resulta ser temporal, y en dosis elevadas pueden llegar a reducir la resistencia a la compresión del concreto.

## REFERENCIAS

- 6-1. Klieger, Paul, and Isberner, Albert W., *Laboratory Studies of Blended Cements—Portland Blast-Furnace Slag Cements*. Research Department Bulletin RX218, Portland Cement Association, 1967.
- 6-2. Klieger, Paul, and Perenchio, William F., *Laboratory Studies of Blended Cement: Portland Pozzolan Cements*, Research and Development Bulletin RD013T, Portland Cement Association, 1972.
- 6-3. Whiting, David, *Effects of High-Range Water Reducers on Some Properties of Fresh and Hardened Concretes*, Research and Development Bulletin RD061, Portland Cement Association, 1979.
- 6-4. Berry, E. E., and Malhotra, V. M., "Fly Ash for Use in Concrete—A Critical Review," *Journal of the American Concrete Institute*, Detroit, March-April 1980, pages 59-73.
- 6-5. Hogan, F. J., and Meusel, J. W., "Evaluation for Durability and Strength Development of a Ground Granulated Blast Furnace Slag," *Cement, Concrete, and Aggregates*, vol. 3, no. 1, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Summer 1981, pages 40-52.
- 6-6. Gebler, S. H., *The Effects of High-Range Water Reducers on the Properties of Freshly Mixed and Hardened Flowing Concrete*, Research Development Bulletin RD081T, Portland Cement Association, 1982.
- 6-7. Stark, David, *Logtime Study of Concrete Durability in Sulfate Soils*, Research and Development Bulletin RD086T, Portland Cement Association, 1982.
- 6-8. Gebler, S. H., and Klieger, P., *Effect of Fly Ash on the Air-Void Stability of Concrete*, Research Development Bulletin RD085T, Portland Cement Association, 1983.
- 6-9. Malhotra, V. M., and Carette, G. G., "Silica Fume Concrete—Properties, Applications, and Limitations," *Concrete International*, American Concrete Institute, May 1983, pages 40-46.
- 6-10. *Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete*, ACI Publication SP-79, American Concrete Institute, 1983.
- 6-11. Aitcin, P.C., *Condensed Silica Fume*, University of Sherbrooke, Sherbrooke, Quebec, Canada, 1983.
- 6-12. Carette, G. G., and Malhotra, V. M., "Mechanical Properties, Durability, and Drying Shrinkage of Portland Cement Concrete Incorporating Silica Fume," *Cement, Concrete, and Aggregates*, American Society for Testing and Materials, Summer 1983.
- 6-13. Mielenz, Richard C., "Mineral Admixtures—History and Background," *Concrete International*, American Concrete Institute, August 1983.
- 6-14. Chou, Gee Kin, "Cathodic Protection: An Emerging Solution to the Rebar Corrosion Problem," *Concrete Construction*, Addison, Illinois, June 1984.
- 6-15. Remachandran, V. S., *Concrete Admixtures Handbook*, Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, 1984.
- 6-16. Walitt, Arthur C., "Calcium Nitrite Offers Longterm Corrosion Prevention," *Concrete Construction*, April 1985.
- 6-17. Gaynor, R. D., and Mullarky, J. I., "Survey: Use of Fly Ash in Ready-Mixed Concrete," *NRMCA Technical Information Letter No. 426*, National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, June 1985.
- 6-18. *Corrosion of Metals in Concrete*, ACI 222R-85, ACI Committee 222 Report, American Concrete Institute, 1985.
- 6-19. *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*, ACI 318-83, revised 1986, ACI Committee 318 Report, American Concrete Institute.
- 6-20. Kosmatka, Steven H., "Discoloration of Concrete—Causes and Remedies," *Concrete Technology Today*, PL861B, Portland Cement Association, 1986.
- 6-21. Gebler, Steven H., and Klieger, Paul, *Effect of Fly Ash on Some of the Physical Properties of Concrete*, Research Development Bulletin RD089T, Portland Cement Association, 1986.
- 6-22. Gebler, Steven H., and Klieger, Paul, *Effect of Fly Ash on the Durability of Air-Entrained Concrete*, Research Development Bulletin RD090T, Portland Cement Association, 1986.
- 6-23. *Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*, SP-91, American Concrete Institute, 1986.
- 6-24. Rixom, M. R., and Mailvaganam, N. P., *Chemical Admixtures for Concrete*, E. & F. N. Spon, New York, 1986.
- 6-25. "Durability of Lean Concretes Containing Fly Ash," *Concrete Technology Today*, PL861B, Portland Cement Association, 1986.
- 6-26. *Admixtures for Concrete*, ACI 212.1R-81, revised 1986, ACI Committee 212 Report, American Concrete Institute.
- 6-27. *Guide for Use of Admixtures in Concrete*, ACI 212.2R-81, revised 1986, ACI Committee 212 Report, American Concrete Institute.
- 6-28. Helmuth, Richard A., *Fly Ash in Cement and Concrete*, SP040T, Portland Cement Association, 1987.
- 6-29. Buck, Alan D., and Mather, Katherine, *Methods for Controlling Effects of Alkali-Silica Reaction*, Technical Report SL-87-6, Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers Vicksburg, Mississippi, 1987.
- 6-30. *Concrete Durability, Katherine and Bryant Mather International Conference*, SP100, American Concrete Institute, 1987.
- 6-31. "Silica Fume in Concrete," ACI Committee 226 Report, *ACI Materials Journal*, American Concrete Institute, March-April 1987.
- 6-32. Kosmatka, Steven H., *Effect of Fly Ash on Concrete*, SS379, Portland Cement Association, 1987.
- 6-33. *Concrete for Massive Structures*, IS128T, Portland Cement Association, 1987.
- 6-34. *Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete*, ACI 226.1R-87, ACI Committee 226 Report, American Concrete Institute, 1987.



## CAPITULO 7

# Proporcionamiento de Mezclas de Concreto Normal

El objetivo al diseñar una mezcla de concreto consiste en determinar la combinación mas práctica y económica de los materiales con los que se dispone, para producir un concreto que satisfaga los requisitos de comportamiento bajo las condiciones particulares de uso. Para lograr tal objetivo, una mezcla de concreto bien proporcionada deberá poseer las propiedades siguientes:

1. En el concreto fresco, trabajabilidad aceptable
2. En el concreto endurecido, durabilidad, resistencia y presentación uniforme
3. Economía

La comprensión de los principios básicos del diseño de mezclas es tan importante como la realización de los cálculos mismos. Solamente con una selección adecuada de los materiales y de las características de la mezcla así como con un proporcionamiento adecuado se pueden obtener las propiedades anteriores al producir un concreto.

### ELECCION DE LAS CARACTERISTICAS DE LA MEZCLA

Antes de efectuar el proporcionamiento de una mezcla, se seleccionan sus características en base al uso que se propone dar al concreto, a las condiciones de exposición, al tamaño y forma de los miembros, y a las propiedades físicas del concreto (tales como la resistencia), que se requieran para la estructura. Una vez que estas características se han elegido, la mezcla se puede proporcionar a partir de datos de campo o de laboratorio (mismos que se discuten mas adelante en la sección de "Proporcionamiento"). Como la mayor parte de las propiedades que se busca obtener en el concreto endurecido, dependen fundamentalmente de la calidad de la pasta de cemento, el primer paso para proporcionar una mezcla de concreto es la selección de una relación agua-cemento acorde con la durabilidad y resistencia requerida. Las mezclas de concreto deberán mantenerse lo mas sencillas posible, pues un número excesivo de ingredientes, a menudo provocan que la mezcla de concreto sea difícil de controlar.

### Relación entre la relación agua-cemento y la resistencia

Por la facilidad con que se determina, la resistencia a la compresión es la medida para la calidad del concreto empleada más universalmente. A pesar de ser una característica importante, otras propiedades tales como la durabilidad, la permeabilidad, y la resistencia al desgaste pueden tener igual o mayor importancia.

Dentro del rango normal de resistencias empleadas en la construcción con concreto, la resistencia a la compresión se relaciona inversamente con la relación agua-cemento:

Para un concreto plenamente compactado fabricado con agregados limpios y sanos, la resistencia y otras propiedades deseables del concreto, bajo condiciones de trabajo dadas, están gobernadas por la cantidad de agua de mezclado que se utiliza por unidad de cemento.

Aún cuando las autoridades en la materia coinciden en que la relación entre el agua y el cemento tiene una influencia fundamental en la resistencia del concreto, existe menos acuerdo respecto a la forma de la relación. La importancia de la cantidad de agua sobre la resistencia es el parámetro, tal como se señala en el párrafo anterior, propuesto por Abrams.\* Muchos tecnólogos del concreto prefieren usar la relación agua-cemento, pues la resistencia y otras propiedades deseables en el concreto se relacionan casi linealmente con este índice. Un parámetro mas racional es la densidad relativa de la pasta de cemento, la cual también se relaciona linealmente con la resistencia.

La resistencia de la pasta de cemento en el concreto depende de la calidad y cantidad de los componentes reactivos y del grado al cual se completa la reacción de hidratación. El concreto se vuelve mas resistente con el tiempo, siempre y cuando exista humedad disponible y se tenga una temperatura favorable. Por lo tanto, la resistencia a cualquier edad particular no es tanto función de la relación agua-cemento original como lo es del grado de hidratación

\* D. A. Abrams, Design of Concrete Mixtures, Bulletin No. 1, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago, 1918.

que alcance el cemento. La importancia de un curado puntual y completo se reconoce fácilmente a partir de este análisis.

La diferencia en la resistencia para una relación agua-cemento dada pueden ser resultado de cambios en el tamaño de agregado, granulometría, textura superficial, forma, resistencia, y rigidez; de la diferencia en los tipos y fuentes del cemento; del contenido de aire incluido; de la presencia de aditivos; y de la duración del período de curado.

## Resistencia

La resistencia a la compresión especificada a los 28 días  $f'_c$ , para una clase individual de concreto, es la resistencia que se espera sea igualada o sobrepasada por el promedio de cualquier conjunto de tres ensayos de resistencia consecutivos, sin que ningún ensayo individual (promedio de dos cilindros) quede debajo de más de  $35 \text{ kg/cm}^2$  de la resistencia especificada cuando los especímenes hayan sido curados en condiciones de laboratorio.\*

La resistencia promedio debe igualar a la resistencia especificada mas una tolerancia que responde a las variaciones en los materiales; a las variaciones en los métodos de mezclado, transporte y colocación del concreto; y a las variaciones en la elaboración, curado y ensayo de los especímenes cilíndricos de concreto. La resistencia promedio, misma que es mayor que  $f'_c$  se denomina  $f'_{cr}$ ; y es la resistencia que se requiere para el diseño de la mezcla. Los requisitos para  $f'_{cr}$  se discuten en detalle en la sección "Proporcionamiento" de este mismo Capítulo.

## Relación Agua-cemento

La relación agua-cemento es sencillamente el peso del agua, dividido entre el peso del cemento. La relación agua-cemento que se elija para el diseño de la mezcla, debe ser el menor valor requerido para cubrir las consideraciones de exposición de diseño. Las Tablas 7-1 y 7-2 sirven como guías para escoger la relación agua-cemento adecuada para diversas condiciones de exposición.

Cuando la durabilidad no sea el factor que rija en el diseño, la relación agua-cemento deberá elegirse con base en la resistencia a compresión del concreto. En tales casos la relación agua-cemento y las proporciones de la mezcla para la resistencia requerida deberán basarse en datos de campo adecuados o en mezclas de prueba hechas con los materiales con los que verdaderamente se va a trabajar para determinar la relación entre la relación agua-cemento y la resistencia (Figura 7-1). La Tabla 7-3 puede usarse para escoger una relación agua-cemento, con respecto a la resistencia promedio requerida para mezclas de prueba, cuando no se disponga de ninguna otra información. La Tabla 7-4 puede usarse sólo con permiso del ingeniero proyectista cuando no se cuente con datos ni mezclas de diseño. Si se hace uso de alguna puzolana en el concreto, se puede usar una relación agua/cemento-más-puzolana en peso,  $W/(C+P)$ , en vez de la tradicional relación agua/ cemento-exclusivamente,  $(W/C)$ . En términos de equivalencia en peso,  $W/(C+P)$  es sencillamente el peso del agua dividido entre la suma de los pesos del cemento y la puzolana.\*\*

**Tabla 7-1. Relaciones agua-cemento máximas para diversas condiciones de exposición\*.**

Condición de exposición	Relación agua-cemento máxima (en peso) para concreto de peso normal
Concreto protegido contra la exposición a la congelación y deshielo o a la aplicación de productos químicos descongelantes	Escoja la relación agua-cemento basándose en los requisitos de resistencia, trabajabilidad y acabados
Concreto que se pretende sea hermético:	
a. Concreto expuesto a agua dulce	0.50
b. Concreto expuesto a agua salobre o a agua de mar	0.45
Concreto expuesto a congelación y deshielo en condición húmeda:**	
a. Guardarrieles, cunetas, guardarrieles, o secciones delgadas	0.45
b. Otros elementos	0.50
c. En presencia de productos químicos descongelantes	0.45
Como protección contra la corrosión del concreto reforzado expuesto a sales descongelantes, aguas salobres, agua de mar, o a rocío proveniente de estas fuentes	0.40†

\* Adaptado de la Referencia 7-9.

\*\* Concreto con aire incluido.

† Si el recubrimiento mínimo requerido por el Reglamento ACI 318 Sección 7.7 se incrementa en 13 mm, entonces la relación agua-cemento se puede aumentar a 0.45, para los concretos de peso normal.

## Agregados

Existen dos características en los agregados que tienen una importante influencia sobre el proporcionamiento de las mezclas de concreto, porque afectan la trabajabilidad del concreto fresco:

1. La granulometría (tamaño de partícula y distribución)
2. La naturaleza de las partículas (forma, porosidad, textura superficial)

La granulometría es importante para lograr una mezcla económica, porque afecta a la cantidad de concreto que puede fabricarse con una cantidad determinada de cemento y agua. Los agregados gruesos deberán llegar al máximo tamaño práctico en las condiciones de trabajo. El tamaño máximo que se pueda usar depende del tamaño y forma del elemento de concreto que se vaya a colar y de la cantidad y distribución del acero de refuerzo en el mismo.

El tamaño máximo de agregado grueso no debe exceder un quinto de la menor dimensión entre los lados de las cimbras ni tres cuartos de la distancia libre entre las varillas o cables de refuerzo individuales, paquetes de varillas, o ductos o tendones de presfuerzo. Para las losas de pavimentos sin refuerzo, el tamaño máximo no debe rebasar un tercio del espesor de la losa.† Se pueden usar tamaños menores cuando así lo requiera la disponibilidad o alguna consideración

\* Referencia 7-9.

\*\* La Referencia 7-6 trata un método de volúmenes absolutos equivalente

† Referencias 7-4 y 7-9.

**Tabla 7-2. Requisitos para concreto expuesto a soluciones que contengan sulfatos\***

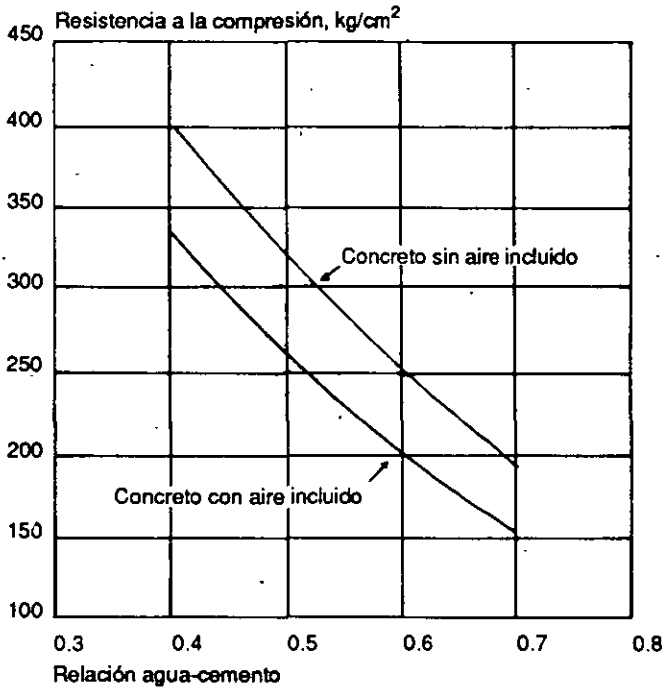
Exposición a sulfatos	Sulfatos solubles al agua (SO <sub>4</sub> ) en el suelo, porcentaje en peso	Sulfatos (SO <sub>4</sub> ) en el agua, ppm	Tipo de cemento	Concreto con agregado de peso normal
				Relación agua-cemento máxima, en peso**
Insignificante	0.00 - 0.10	0 - 150	—	—
Moderada†	0.10 - 0.20	150 - 1500	II, IP (MS), IS (MS)	0.50
Severa	0.20 - 2.00	1500 - 10,000	V	0.45
Muy severa	Mayor que 2.00	Mayor que 10,000	V más puzolana††	0.45

\* Adaptado de la Referencia 7-9.

\*\* Una relación agua-cemento inferior o una mayor resistencia pueden llegar a ser necesarias para protección contra la corrosión de los elementos embebidos o por hermeticidad o por congelación y deshielo (Tabla 7-1).

† Agua de mar.

†† Puzolana que por ensayos o por registros de servicio haya confirmado mejorar la resistencia a los sulfatos cuando se emplea en concretos que contengan cemento Tipo V.



**Figura 7-1. Curvas típicas de resistencia de mezclas de prueba o de datos de campo.**

**Tabla 7-3. Correspondencia típica entre la relación agua-cemento y la resistencia a compresión del concreto.**

Resistencia a compresión a los 28 días, kg/cm <sup>2</sup> *	Relación agua-cemento en peso	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
420	0.41	—
350	0.48	0.40
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

\* Los valores, son resistencias promedio estimadas para concretos que contengan porcentajes de aire no mayores a los mostrados en la Tabla 7-6. Para una relación agua-cemento constante, la resistencia del concreto va disminuyendo conforme aumenta el contenido de aire.

La resistencia se basa en cilindros de 15 x 30 cm con curado húmedo durante 28 días a 23°C ± 1.6°C, de conformidad con la Sección 9b de la norma ASTM C 31.

Para la correspondencia se supone un tamaño máximo de agregado de aproximadamente 19 mm (3/4") a 25 mm (1"). Adaptado de la Referencia 7-6.

**Tabla 7-4. Relaciones agua-cemento máximas permisibles para el concreto cuando no se dispone de datos de resistencia de experiencias en campo ni de mezclas de prueba.**

Resistencia a compresión a los 28 días, fc, en kg/cm <sup>2</sup>	Relación agua-cemento en peso	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
175	0.67	0.54
210	0.58	0.46
245	0.51	0.40
280	0.44	0.35
315	0.38	.
350	.	.

Con la mayoría de los materiales, las relaciones agua-cemento mostradas proporcionarán resistencias promedio mayores que las requeridas.

\* Para resistencias arriba de 315 kg/cm<sup>2</sup> (en concretos sin aire incluido) y de 280 kg/cm<sup>2</sup> (en concretos con aire incluido), las proporciones del concreto deberán establecerse a partir de datos de campo o de mezclas de prueba.

Adaptado de la Referencia 7-9.

económica. También es una buena práctica limitar el tamaño de agregado a no más de tres cuartos de la distancia libre entre el refuerzo y las cimbras.

La cantidad de agua de mezclado que se requiere para producir un metro cúbico de concreto con un revenimiento dado depende del tamaño máximo, forma y cantidad de agregado grueso. Los tamaños mayores minimizan el requisito de agua y por lo tanto permiten que el contenido de agua se reduzca. También, un agregado redondeado requiere de menos agua que un agregado triturado en concretos de igual revenimiento (vea "Contenido de Agua").

Para un contenido de cemento dado, el tamaño máximo de agregado grueso que producirá un concreto de máxima resistencia, dependerá de la fuente de agregado así como de su forma y granulometría. Para un concreto de alta resistencia a la compresión (de 420 kg/cm<sup>2</sup> en adelante) con un contenido de cemento que rebase los 350 kg por metro cúbico, el tamaño máximo óptimo es de aproximadamente 19 mm. Algunas veces también se pueden lograr mayores resistencias usando agregado de piedra triturada en vez de agregado redondeado.

La granulometría mas deseada para agregado fino dependerá del tipo de obra, de la riqueza de la mezcla, y del

tamaño del agregado grueso. En las mezclas pobres, se espera una granulometría más fina (menor módulo de finura), para cumplir con la trabajabilidad. En las mezclas más ricas se utiliza una granulometría más gruesa (mayor módulo de finura), para tener mayor economía.

El volumen de agregado grueso se puede determinar a partir de la Tabla 7-5.

**Tabla 7-5. Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto.**

Tamaño máximo de agregado mm (pulg)	Volumen de agregado grueso varillado en seco* por volumen unitario de concreto para distintos módulos de finura de agregado fino			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5 (3/8)	0.50	0.48	0.46	0.44
12.7 (1/2)	0.59	0.57	0.55	0.53
19.0 (3/4)	0.66	0.64	0.62	0.60
25.4 (1)	0.71	0.69	0.67	0.65
38.1 (1 1/2)	0.75	0.73	0.71	0.69
50.8 (2)	0.78	0.76	0.74	0.72
76.2 (3)	0.82	0.80	0.78	0.76
152.4 (6)	0.87	0.85	0.83	0.81

\* Los volúmenes se basan en los agregados en condición de varillado en seco, tal como lo describe la norma ASTM C 29. Estos volúmenes, se seleccionan a partir de relaciones empíricas para producir concreto con un grado de trabajabilidad adecuado para la construcción reforzada común. Para concretos menos trabajables, como los requeridos en la construcción de pavimentos de concreto, se pueden aumentar aproximadamente 10%. Para concretos más trabajables, como los que en ocasiones se llegan a necesitar cuando la colocación se hace por bombeo, se pueden reducir hasta en un 10%. Adaptado de la Referencia 7-6.

## Aire incluido

El aire incluido debe ser utilizado en todo concreto que esté expuesto a congelación y deshielo y a productos químicos descongelantes y puede emplearse para mejorar la trabajabilidad aún donde no se requiera.

La inclusión de aire se logra empleando un cemento portland inclusor de aire o agregando un aditivo inclusor de aire en el mezclador. La cantidad de aditivo deberá ajustarse para hacer frente a las variaciones en los ingredientes del concreto y en las condiciones de trabajo. La cantidad recomendada por el fabricante del aditivo producirá el contenido de aire deseado en la mayoría de los casos.

Los contenidos de aire recomendados para los concretos con aire incluido se muestran en la Tabla 7-6. Observe que la cantidad de aire requerida para suministrar la resistencia a la congelación-deshielo adecuada, depende del tamaño máximo del agregado y del nivel de exposición. El aire se incluye en la fracción de mortero del concreto; en las mezclas proporcionadas adecuadamente, el contenido de mortero disminuye conforme aumenta el tamaño máximo del agregado, haciendo descender en este caso el contenido de aire requerido en el concreto. El Comité ACI 211.1\* define a los niveles de exposición como a continuación se indica:

Exposición Ligera. En este tipo de exposición se incluye al servicio en interiores o en exteriores en climas donde el concreto

no quedará expuesto a congelación ni a agentes descongelantes. Cuando se desee incluir aire para algún efecto distinto a la durabilidad, como para mejorar la trabajabilidad o la cohesión o para mejorar la resistencia en un concreto con bajo contenido de cemento, se pueden usar contenidos de aire inferiores a los necesarios por durabilidad.

Exposición moderada. Se refiere al servicio en climas en que se espera congelación, pero donde el concreto no quedará expuesto de manera continua a la humedad o al agua libre durante períodos prolongados antes de la congelación y no quedará expuesto a los productos descongelantes ni a otros productos químicos agresivos. Los ejemplos incluyen a las vigas exteriores, columnas, muros, trabes, y losas que no se encuentren en contacto con el suelo húmedo y que estén ubicadas de manera tal que no reciban aplicaciones directas de productos químicos descongelantes.

Exposición severa. Se refiere al concreto expuesto a productos descongelantes, o a otros productos químicos agresivos o a los lugares donde el concreto pueda quedar fuertemente saturado por el contacto continuo con la humedad o con el agua libre antes de congelarse. Como ejemplo se tiene a los pavimentos, cubiertas de los puentes, guarniciones y cunetas, aceras, revestimientos de los canales, y tanques de agua exteriores y alcantarillas.

Cuando se mantenga constante al agua de mezclado, la inclusión de aire elevará el revenimiento. Cuando se mantengan constantes el contenido de cemento y el revenimiento, la inclusión de aire resulta en la necesidad de menos agua de mezclado, particularmente en las mezclas de concreto más pobres. Durante los ajustes de las mezclas, para mantener un revenimiento constante mientras se modifica el contenido de aire, el agua deberá disminuirse unos 3 kg por cada punto porcentual de incremento en contenido de aire o aumentarse unos 3 kg por cada punto porcentual de disminución. Refiérase al Capítulo 5 para mayor información.

No es posible obtener fácil o repetidamente algún contenido de aire específico debido a las muchas variables que afectan al contenido de aire; en consecuencia se debe proporcionar un rango permisible de contenidos de aire alrededor de un valor fijado. A pesar de que a menudo se usa en las especificaciones de proyectos un rango de 1 % de los valores de la Tabla 7-6, a veces esto es un límite estrecho y poco práctico. La solución consiste en emplear un rango más amplio tal como - 1 a + 2 puntos porcentuales de los valores fijados. Para un valor fijado en 6 %, el rango especificado para el concreto entregado en la obra podría ser de 5% a 8%.

## Revenimiento

El concreto debe ser fabricado para tener siempre una trabajabilidad, consistencia, y plasticidad adecuadas a las condiciones de trabajo. La trabajabilidad es una medida de lo fácil o difícil que resulta colocar, consolidar y darle acabado al concreto. La consistencia es la facultad del concreto fresco para fluir. La plasticidad determina la facilidad de moldear al concreto. Si se usa más agregado en una mezcla de concreto o si se agrega menos agua, la mezcla se vuelve más rígida (menos plástica y menos trabajable) y difícil de moldear. No se pueden considerar plásticas a las mezclas muy secas o mu desmoronables ni a las muy agudadas o fluidas.

\* Referencia 7-6.

**Tabla 7-6. Requisitos aproximados para el contenido de agua de mezclado y para el contenido de aire deseado para distintos revenimientos y tamaños máximos de agregado.**

Revenimiento, cm	Agua, kg por metro cúbico de concreto, para los tamaños máximos de agregado indicados*							
	9.5 mm (3/8")	12.7 mm (1/2")	19.0 mm (3/4")	25.4 mm (1")	38.1 mm (1 1/2")	50.8 mm** (2")	76.2 mm** (3")	152.4 mm** (6")
<b>Concreto sin aire incluido</b>								
2.5 a 5	208	199	187	178	163	154	130	113
7.5 a 10	228	217	202	193	178	169	145	125
15 a 18	243	228	214	202	187	178	160	—
Cantidad aproximada de aire atrapado en el concreto sin aire incluido, por ciento	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.2
<b>Concreto con aire incluido</b>								
2.5 a 5	181	175	166	160	148	142	122	107
7.5 a 10	202	193	181	175	163	157	134	119
15 a 18	216	205	193	184	172	166	154	—
Contenido de aire total promedio recomendado, por ciento, para el nivel de exposición:†	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
baja	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Exposición moderada	7.5	7.0	6.0	6.0	6.0	5.0	4.5	4.0
severa								

\* Estas cantidades de agua de mezclado son para emplearse en el cálculo de los factores de mezcla para las mezclas de prueba. Son valores máximos para agregados gruesos angulares de razonable buena forma con granulometrías dentro de los límites marcados por las especificaciones aceptadas.

\*\* Los valores de los revenimientos para los concretos que contienen agregados mayores que 38.1 mm (1 1/2") están basados en pruebas de revenimiento hechas después de haber removido por cribado húmedo las partículas mayores de 38.1 mm (1 1/2").

† El contenido de aire en las especificaciones de obra deberá especificarse para ser entregado dentro de -1 a +2 puntos porcentuales del valor anotado en la tabla para las exposiciones moderada y severa.

Adaptado de las Referencias 7-6 y 7-9.

**Tabla 7-7. Revenimientos recomendados para diversos tipos de construcción.**

Construcción de concreto	Revenimiento, cm	
	Máximo*	Mínimo
Zapatas y muros de cimentación reforzados	7.5	2.5
Muros de subestructuras, cajones y zapatas sin refuerzo	7.5	2.5
Vigas y muros reforzados	10.0	2.5
Columnas de edificios	10.0	2.5
Pavimentos y losas	7.5	2.5
Concreto masivo	5.0	2.5

\* Se puede aumentar 2.5 cm si se consolida por métodos manuales, como por varillado o por picado.

Adaptada de la Referencia 7-6.

La prueba de revenimiento es una medida de la consistencia del concreto. Para determinadas proporciones de cemento y de agregados sin aditivos, entre más alto es el revenimiento mas agua contiene la mezcla. El revenimiento es un indicador de la trabajabilidad cuando se evalúan mezclas similares. Sin embargo, no debe usarse para comparar mezclas de proporciones totalmente distintas. Un cambio de revenimiento en las diferentes mezclas de la misma proporción indica un cambio en la consistencia y en las características de los materiales, en las proporciones de la mezcla, o en el contenido de agua.

Se requieren distintos revenimientos para los diversos tipos de construcción con concreto. Usualmente se indica el revenimiento en las especificaciones de obra como un rango, por ejemplo de 5 a 10 cm, o como un valor máximo que no debe ser rebasado.\*\* Cuando no se le especifica, se puede seleccionar un valor aproximado de la Tabla 7-7, para aquellos concretos que se consoliden por vibración mecánica. Para los ajustes de mezclas, el revenimiento se puede elevar

aproximadamente 2.5 cm agregando 6 kg de agua por metro cúbico de concreto.

### Contenido de agua

El contenido de agua del concreto puede ser alterado por un gran número de factores: tamaño y forma del agregado, revenimiento, relación agua-cemento, contenido de aire, contenido de cemento, aditivos, y condiciones ambientales. Un mayor contenido de aire y tamaño de agregado, una reducción en la relación agua-cemento y en el revenimiento, los agregados redondeados, y el uso de aditivos reductores de agua o de ceniza volante disminuyen la demanda de agua. Por otra parte, los aumentos de temperatura, en los contenidos de cemento, de revenimiento, en la relación agua-cemento, de la angularidad de los agregados, así como la disminución en la proporción de agregado grueso a fino elevan la demanda de agua.

Los contenidos aproximados de agua de la Tabla 7-6, usados para hacer proporcionamientos, son para agregados gruesos angulares (roca triturada). Para algunos concretos y agregados, las estimaciones de agua de la Tabla 7-6 se pueden reducir aproximadamente unos 12 kg para agregado subangular, 21 kg para grava con algunas partículas trituradas, y 27 kg para gravas redondeadas para producir los revenimientos mostrados. Esto ilustra la necesidad de elaborar mezclas de prueba con los materiales locales, pues cada fuente de

\*\* La norma ASTM C 94 trata a detalle las tolerancias de los revenimientos.

agregados es distinta y puede afectar a las propiedades del concreto de manera muy diferente.

Debe tenerse en mente que cualquier cambio en la cantidad de algún ingrediente en una mezcla de concreto puede tener efectos de importancia en las proporciones de otros ingredientes, también puede alterar las propiedades de la mezcla. Por ejemplo, la adición de 6 kg de agua por metro cúbico aumentará aproximadamente 2.5 cm el revenimiento y asimismo elevará el contenido de aire. En los ajustes de las mezclas, la disminución en el contenido de aire en un punto porcentual aumentará la demanda de agua en aproximadamente 3 kg por metro cúbico de concreto para mantener el mismo revenimiento.

## Contenido de cemento y tipo de cemento

El contenido de cemento se determina usualmente a partir de la relación agua-cemento y del contenido de agua elegidos, aunque frecuentemente se incluye en las especificaciones un contenido mínimo de cemento además de una relación agua-cemento máxima. Los requisitos mínimos de cemento sirven para asegurar una durabilidad y acabado satisfactorios, una mayor resistencia al desgaste en las losas, y una apariencia apropiada de las superficies verticales. Esto es importante a pesar de que los requisitos de resistencia se satisfagan con menores contenidos de cemento.

Para las exposiciones severas a congelación-deshielo, productos descongelantes, y sulfatos, es adecuado especificar un contenido mínimo de cemento de 335 kg por metro cúbico de concreto y sólo la suficiente agua de mezclado para alcanzar la consistencia deseada sin exceder las relaciones agua-cemento máximas mostradas en las Tablas 7-1 y 7-2. Para colocar concreto bajo el agua, normalmente se debe usar no menos de 385 kg de cemento por metro cúbico de concreto. Para evitar problemas de colocación, acabados, resistencia a la abrasión, y durabilidad en los trabajos en plano, la cantidad de cemento a usar no deberá ser menor que la que muestra la Tabla 7-8.

Para lograr una mayor economía, el proporcionamiento debe ser tal que el consumo requerido de cemento sea mínimo sin que se llegue a sacrificar la calidad del concreto. Como la calidad depende principalmente de la relación agua-cemento, se debe mantener en un mínimo el contenido de agua para reducir la demanda de cemento. Entre las medidas para minimizar la demanda de agua y cemento se incluye el uso de: (1) la mezcla más áspera que sea práctica para usar, (2) el mayor tamaño máximo de agregado que sea posible usar, y (3) la relación óptima de agregado fino-a-grueso.

El concreto que vaya a quedar expuesto a condiciones en que existan sulfatos deberá ser fabricado con el tipo de cemento que se muestra en la Tabla 7-2. Refiérase al Capítulo 2 para obtener mayor información.

El agua de mar contiene cantidades importantes de sulfatos y de cloruros. A pesar que los sulfatos en el agua de mar pueden atacar al concreto, la presencia de cloruros inhibe la reacción expansiva que es característica del ataque de los sulfatos. El sulfoaluminato de calcio, producto de la reacción del ataque de los sulfatos, es más soluble en una solución de cloruros y puede ser lixiviado del concreto con mayor facilidad, resultando con esto una reacción menos destructiva. Este es el principal factor que explica las observaciones

**Tabla 7-8. Requisitos mínimos de cemento para concreto de peso normal, empleado en obras.**

Tamaño máximo de agregado, mm (pulg.)	Cemento, kg por metro cúbico*
38.1 (1 1/2)	279
25.4 (1)	309
19.0 (3/4)	320
12.7 (1/2)	350
9.5 (3/8)	362

\* Las cantidades de cemento pueden llegar a ser mayores si existe exposición severa.  
Adaptada de la Referencia 7-2.

anotadas en varias fuentes, acerca del hecho de que los concretos en agua de mar, fabricados con cementos portland que contengan contenidos de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) tan altos como de 10%, y en ocasiones mayores hayan mostrado una durabilidad satisfactoria, siempre que la permeabilidad del concreto sea baja y que el acero de refuerzo tenga un recubrimiento adecuado. Los cementos que satisfacen los requisitos de las normas ASTM C 150 y C 595 y que además cubren el requisito de un contenido de  $C_3A$  no mayor que 10% ni menor de 4% (para asegurar la durabilidad del refuerzo) resultan ser aceptables.\*

## Aditivos

Los aditivos reductores de agua se agregan al concreto para disminuir la relación agua-cemento, o para mejorar la trabajabilidad de un concreto sin cambiar la relación agua-cemento. Los aditivos reductores de agua, reducirán usualmente los contenidos de agua de un 5% a un 10% y mucho de ellos también aumentarán los contenidos de aire de 1/2 a 1 punto porcentual. Los aditivos retardantes también pueden aumentar el contenido de aire.

Los aditivos reductores de agua de alto rango (o aditivos superplastificantes), reducen los contenidos de agua entre 12% y 30% y algunos pueden aumentar simultáneamente el contenido de aire hasta 1 punto porcentual; otros pueden disminuir o no afectar el contenido de aire.

Los aditivos que tienen como base al cloruro de calcio, reducen los contenidos de agua en aproximadamente 3% y elevan el contenido de aire en aproximadamente 1/2 punto porcentual.

Los aditivos minerales finamente divididos, pueden tener efectos muy variados en cuanto a la demanda de agua y a los contenidos de aire. La adición de ceniza volante reducirá generalmente la demanda de agua y disminuirá el contenido de aire si no se hace ningún ajuste en la cantidad de aditivo inclusor de aire. El humo de sílice aumenta la demanda de agua y disminuye el contenido de aire.

Al usar un aditivo que contenga como base al cloruro de calcio, se deberán considerar los riesgos de corrosión en el acero de refuerzo. La Tabla 7-9 estipula límites recomendados en el contenido de ión cloruro soluble al agua para diferentes condiciones en concretos reforzados y presforzados.

\* Para información adicional consulte las Referencias 7-5 y 7-9.



**Tabla 7-9. Contenido máximo de ión cloruro, para protección contra la corrosión.**

Tipo de elemento	Contenido máximo de ión cloruro (Cl <sup>-</sup> ) soluble al agua en el concreto, por ciento respecto al peso de cemento*
Concreto presforzado	0.06
Concreto reforzado que va a quedar expuesto a los cloruros durante su vida útil	0.15
Concreto reforzado que estará seco o protegido contra la humedad durante su vida útil	1.00
Otras construcciones de concreto reforzado	0.30

\* En el concreto endurecido a la edad de 28 a 42 días. El procedimiento de pruebas debe concordar con el descrito en el Reporte de la Administración Federal de Carreteras de EEUU No. FHWA-RD-77-85, "Sampling and Testing for Chloride Ion in Concrete." (Consulte también el Capítulo 14). Adaptada de la Referencia 7-9.

Cuando se use más de un aditivo en un concreto, el fabricante del aditivo deberá asegurar la compatibilidad en el entremezclado de los aditivos o se deberá probar la combinación de los aditivos mediante mezclas de prueba. El agua contenida en muchos aditivos deberá considerarse parte del agua de mezclado si el contenido de agua del aditivo es suficiente para afectar la relación agua-cemento en 0.01 ó más (para mayores detalles refiérase al Capítulo 6).

## PROPORCIONAMIENTO

Los métodos de proporciónamiento han evolucionado desde el arbitrario método volumétrico (1:2:3 - cemento:arena:agregado grueso), de principios de siglo, hasta los métodos actuales de peso y de volumen absoluto descritos en la práctica estándar para el proporciónamiento de mezclas de concreto del Comité 211 del Instituto Americano del Concreto.\* Los métodos de proporciónamiento por peso son muy simples y rápidos para estimar las proporciones de las mezclas, utilizando un peso supuesto o conocido del concreto por unidad de volumen. Un método más exacto, el del volumen absoluto, involucra el uso de los valores de la densidad de todos los ingredientes para calcular el volumen absoluto que cada ingrediente ocupará en la unidad de volumen de concreto. Se ilustrará el método de volumen absoluto. Una mezcla de concreto se puede proporciónar a partir de experiencias de campo (datos estadísticos), o de mezclas de prueba de concreto.\*\*

### Proporciónamiento a partir de datos de campo

Cualquier diseño de mezclas que se encuentre en uso o que haya sido usado previamente, podrá ser empleado en un nuevo proyecto, si los datos de los ensayos de resistencia y las desviaciones estándar\*\*\* demuestran que las mezclas son aceptables. También se deben satisfacer los aspectos referentes a la durabilidad que ya han sido presentados con anterioridad. Los datos estadísticos deberán representar a los mismos materiales, proporciones, y condiciones de colado

que serán empleados en el nuevo proyecto. Los datos usados para el proporciónamiento, también deberán provenir de un concreto con un  $f'c$  dentro de  $70 \text{ kg/cm}^2$  de la resistencia requerida para el trabajo propuesto. Asimismo, los datos deberán representar al menos 30 ensayos consecutivos o dos grupos de ensayos consecutivos que totalicen al menos 30 ensayos (un ensayo es la resistencia promedio de dos cilindros tomados de una misma muestra). Si sólo se dispone de 15 a 29 ensayos consecutivos, se puede obtener una desviación estándar ajustada, multiplicando la desviación estándar (S) por los 15 a 29 ensayos y por un factor de modificación que se puede tomar de la Tabla 7-10. Los datos deberán representar 45 días de ensayos o más.

La desviación estándar o la modificada se utiliza en las Ecuaciones 7-1 y 7-2. Para que las proporciones del concreto se consideren aceptables, la resistencia a compresión promedio del registro de pruebas, deberá igualar o rebasar la resistencia a compresión promedio requerida por el ACI 318,  $f'cr$ . El valor de  $f'cr$  para las proporciones elegidas de la mezcla será igual al mayor de las Ecuaciones 7-1 y 7-2.

$$f'cr = f'c + 1.34 S \quad (7-1)$$

$$f'cr = f'c + 2.33 S - 35 \quad (7-2)$$

donde:

$f'cr$  = Resistencia a compresión promedio del concreto requerida como base para la selección de las proporciones del concreto,  $\text{kg/cm}^2$

$f'c$  = Resistencia a la compresión especificada en el concreto,  $\text{kg/cm}^2$

\* Referencia 7-6.

\*\* Referencias 7-4, 7-6, 7-8, y 7-9.

\*\*\* La desviación estándar de los ensayos de resistencia de una mezcla de concreto con al menos 30 ensayos consecutivos se puede determinar como sigue:

$$S = [\sum(X_i - \bar{X})^2 + (n - 1)]^{1/2}$$

donde:

S = desviación estándar,  $\text{kg/cm}^2$

$X_i$  = ensayo individual de resistencia (resistencia promedio de dos cilindros a 28 días)

$\bar{X}$  = promedio de n resultados de ensayos de resistencia

n = número de ensayos de resistencia consecutivos

Si se hace uso de dos registros para obtener al menos 30 ensayos, la desviación estándar usada deberá ser el promedio estadístico de los valores calculados de cada registro de ensayos de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$S = \left[ \frac{(n_1 - 1)(S_1)^2 + (n_2 - 1)(S_2)^2}{(n_1 + n_2 - 2)} \right]^{1/2}$$

donde:

$\bar{S}$  = desviación promedio estadística donde dos registros de ensayos se utilizan para estimar la desviación estándar.

$S_1, S_2$  = desviaciones estándar calculadas a partir de dos registros de ensayos, 1 y 2, respectivamente.

$n_1, n_2$  = número de ensayos en los registros de ensayos 1 y 2, respectivamente.

Si se dispone de menos de 30 ensayos, pero al menos 15, la desviación estándar calculada se incrementa por el factor dado en la Tabla 7-10.

Consulte las Referencias 7-3, 7-8, y 7-9 para tener información adicional sobre la determinación de la desviación estándar.

El coeficiente de variación,  $V = S / \bar{X}$

**Tabla 7-10. Factor de modificación para la desviación estándar, cuando se dispone de menos de 30 ensayos**

Número de ensayos*	Factor de modificación para la desviación estándar**
Menos de 15	Use la Tabla 7-11
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30 o más	1.00

\* Interpolar para números de ensayo intermedios.

\*\* Desviación estándar modificada, que será usada para determinar la resistencia promedio requerida,  $f'_{cr}$ .

Adaptada de la Referencia 7-9.

**Tabla 7-11. Resistencia a la compresión promedio requerida cuando no se dispone de datos para establecer una desviación estándar**

Resistencia a la compresión especificada, $f'_{c}$ , Kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia a la compresión requerida promedio, $f'_{cr}$ , kg/cm <sup>2</sup>
Menos que 210	$f'_{c} + 70$
210 a 350	$f'_{c} + 85$
Mayor que 350	$f'_{c} + 100$

Adaptada de la Referencia 7-9.

$S$  = Desviación estándar, kg/cm<sup>2</sup>

Cuando los registros de los ensayos de resistencia de campo no satisfacen los requisitos previamente expuestos, se puede obtener el  $f'_{cr}$  con la Tabla 7-11. Uno o varios registros de resistencia de campo, o los resultados de los ensayos de las mezclas de prueba deberán usarse como documentación, mostrando que la resistencia promedio de la mezcla es igual o mayor que el  $f'_{cr}$ .

Si se dispone de menos de 30 pero no menos de 10 ensayos, los ensayos podrán usarse como documentación de resistencias promedio si el período de tiempo no es inferior a 45 días. Las proporciones de las mezclas también se pueden establecer interpolando entre dos o mas registros de ensayos si cada uno de ellos cubre los requisitos anteriores así como los requisitos del proyecto. Si existe una diferencia importante entre las mezclas que se estén usando en la interpolación, se deberá considerar la elaboración de una mezcla de prueba para revisar el incremento de resistencia. Si los registros de los ensayos satisfacen los requisitos anteriores y también las limitaciones fijadas por el ACI 318,† se pueden suponer aceptables las proporciones de la mezcla para el trabajo propuesto.

Si la resistencia promedio de las mezclas con datos estadísticos inferiores a  $f'_{cr}$ , o si los datos estadísticos o los registros de ensayos son insuficientes o no se encuentran disponibles, la mezcla deberá ser proporcionada por medio del método de mezclas-de-prueba. La mezcla aceptada deberá tener una resistencia a la compresión que satisfaga o rebase a  $f'_{cr}$ . Se deberán probar tres mezclas de prueba, usando tres relaciones agua-cemento distintas, o tres diferentes contenidos de cemento. Entonces se puede graficar una curva de relación agua-cemento vs. resistencia

y las proporciones se pueden interpolar a partir de los datos. También es recomendable ensayar las propiedades de la mezcla recién proporcionada en una mezcla de prueba. Si no se dispone de datos de prueba y la elaboración de mezclas de prueba resulta impráctica, el Comité ACI 318\* estipula medidas especiales para el proporcionamiento de mezclas empleando la Tabla 7-4. Sin embargo, se debe tener un permiso especial para emplear estas estipulaciones mismas que producen diseños de mezclas conservadores los cuales por lo general sólo se usan en emergencias o en colados pequeños.

El Comité ACI 214\*\* proporciona métodos de análisis estadístico para controlar la resistencia del concreto en campo, con el fin de asegurar que la mezcla satisfaga adecuadamente o sobrepase la resistencia de diseño,  $f'_{c}$ .

### Proporcionamiento por mezclas de prueba

Cuando no se dispone de registros de campo, o cuando éstos son insuficientes para elaborar un proporcionamiento con los métodos de experiencia de campo, las proporciones elegidas para el concreto deberán estar basadas en mezclas de prueba. Las mezclas de prueba deberán usar los mismos materiales propuestos para la obra. Se deberán elaborar tres mezclas con tres distintas relaciones agua-cemento, o contenidos de cemento para producir un rango de resistencias que se encuentren cercanas a  $f'_{cr}$ . Las mezclas de prueba deberán tener un revenimiento y un contenido de aire dentro de 2 cm y 0.5 %, respectivamente, del máximo permitido. Se deberá fabricar tres cilindros por relación agua-cemento, mismos que se curarán, conforme a la norma ASTM C 192. A los 28 días o a la edad de ensayo designada, se determinará la resistencia a compresión del concreto ensayando los cilindros a compresión. Los resultados obtenidos se grafican para producir una curva de resistencia contra relación agua-cemento (Figura 7-1), que se utiliza para obtener el proporcionamiento de una mezcla.

Se han empleado un cierto número de métodos distintos para proporcionar los ingredientes del concreto, incluyendo:

- Asignación arbitraria (1:2:3); volumétrica
- Relación de vacíos
- Módulo de finura
- Area superficial de los agregados
- Contenido de cemento

Cualquiera de estos métodos puede producir de manera aproximada la misma mezcla final luego que se hayan practicado en el campo los ajustes correspondientes. El mejor enfoque, es elegir las proporciones, basándose en las anteriores experiencias y en datos confiables de ensayos con una relación ya establecida entre la resistencia y la relación agua-cemento, en los materiales que se van a usar para producir el concreto. Las mezclas pueden ser de volumen relativamente pequeño hechas con precisión de laboratorio o

† Referencia 7-9.

\* Referencia 7-9.

\*\* Referencia 7-3.

mezclas de gran volumen fabricadas durante el transcurso de una producción normal de concreto. A menudo es necesario el uso de ambas para lograr una mezcla satisfactoria para la obra.

Se deberán seleccionar primero los siguientes parámetros: resistencia requerida, contenido de cemento mínimo o relación agua-cemento máxima, tamaño máximo de agregado, contenido de aire, y revenimiento deseado. Entonces, se elaboran las mezclas de prueba variando las cantidades relativas de agregados fino y grueso así como otros ingredientes. Las proporciones de la mezcla adecuada se seleccionan tomando como base las consideraciones de trabajabilidad y de economía.

Cuando la calidad de la mezcla de concreto ha sido especificada por la relación agua-cemento, el procedimiento de mezcla de prueba consiste esencialmente en combinar una pasta (agua, cemento, y por lo general, un aditivo inclusor de aire), de proporciones correctas con las cantidades necesarias de agregados fino y grueso para producir el revenimiento y la trabajabilidad requeridos. Después se calculan las cantidades por metro cúbico.

Se deberá usar muestras representativas de cemento, agua, agregados, y aditivos. Para simplificar los cálculos y eliminar errores causados por las variaciones en los contenidos de humedad de los agregados, los agregados deberán ser humedecidos y luego secados hasta una condición saturada y superficialmente seca y colocados en recipientes cubiertos para conservarlos en esta condición hasta que sean usados. Se deberán determinar los contenidos de humedad de los agregados y conforme a éstos se corregirán los pesos de los materiales para la mezcla.

El tamaño de la mezcla de prueba dependerá del equipo disponible y del número y tamaño de los especímenes a fabricar. Si las mezclas se realizan en forma manual y no se necesitan especímenes de prueba, una mezcla hecha con 4.5 kg de cemento puede ser adecuada. Sin embargo, las mezclas de mayor tamaño producirán información más adecuada. Se recomienda el mezclado con máquina porque representa de manera más cercana a las condiciones de la obra; su uso es obligatorio si el concreto va a tener aire incluido. Se deberán usar los procedimientos de mezclado de la norma ASTM C 192.

## Mediciones y Cálculos

Las pruebas de revenimiento, contenido de aire y temperatura deberán efectuarse en la mezcla de prueba, y también deberán desarrollarse las siguientes mediciones y cálculos:

**Peso volumétrico y rendimiento.** El peso volumétrico del concreto fresco se expresa en kilogramos por metro cúbico. El rendimiento es el volumen de concreto fresco producido en una mezcla, y normalmente está expresado en metros cúbicos. El rendimiento se calcula dividiendo el peso total de los materiales dosificados entre el peso volumétrico del concreto fresco. El peso volumétrico y el rendimiento se determinan de acuerdo con la norma ASTM C 138.

**Volumen absoluto.** El volumen (rendimiento) del concreto fresco es igual a la suma de los volúmenes absolutos del cemento, agua (excluyendo a la del interior del agregado), agregados, aditivos cuando existen, y aire. El volumen ab-

solutivo se calcula a partir del peso y del peso específico del material como sigue:

$$\text{Volumen absoluto} = \frac{\text{Peso del material}}{\text{Peso específico del material}}$$

Se puede usar un valor de 3 150 kg/m<sup>3</sup> para el peso específico del cemento portland. El peso específico del agua es igual a 1 000 kg/m<sup>3</sup>. El peso específico de los agregados de peso normal usualmente varía entre 2 400 y 2 900 kg/m<sup>3</sup>. El peso específico del agregado que se emplea en los cálculos para el diseño de mezclas es el peso específico ya sea del material saturado y superficialmente seco o del material secado al horno. Los pesos específicos de los aditivos, tales como los reductores de agua o los materiales finamente divididos, también deberán considerarse. El volumen absoluto normalmente se expresa en metros cúbicos.

El volumen absoluto del aire dentro del concreto, expresado en metros cúbicos, es igual al porcentaje de contenido de aire dividido entre 100 (por ejemplo, 7 ÷ 100) y después multiplicado por el volumen (en metros cúbicos) de la mezcla de concreto.

Se puede determinar el volumen de concreto en la mezcla por alguno de los dos métodos siguientes: (1) Si se conocen los pesos específicos de los agregados y del cemento, se pueden usar para calcular el volumen del concreto; (2) Si se desconocen o varían los pesos específicos, se puede calcular el volumen dividiendo el peso total de los materiales en el mezclador entre el peso volumétrico del concreto (Consulte "Peso volumétrico y rendimiento"). En algunas ocasiones se efectúan ambas determinaciones, sirviendo la una para revisar a la otra.

## EJEMPLOS DE PROPORCIONAMIENTO DE MEZCLAS

### Ejemplo 1. Método de volúmenes absolutos

En la publicación ACI 211.1\* se ilustran los métodos para el proporcionamiento de mezclas de concreto por peso y por volumen. El método volumétrico es más exacto y es el método que se muestra en seguida.\*\*

**Condiciones y especificaciones.** El concreto se necesita para una losa de un muelle de carga que quedará expuesta a humedad en un clima que existen congelación severa y deshielo pero sin estar sujeta a productos descongelantes. Se requiere una resistencia especificada a la compresión, f'c, de 250 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días usando cemento Tipo I. El peralte del miembro es de 30 cm y el diseño pide un recubrimiento mínimo de 7.5 cm de concreto sobre el acero de refuerzo. La

† El volumen absoluto de un material granular (cemento, agregado) es el volumen de la materia sólida de las partículas; no incluye al volumen de los espacios que existen entre las partículas.

\* Referencia 7-6.

\*\* Otros ejemplos de diseño de mezclas se encuentran en la publicación de la PCA Concrete for Massive Structures, IS128T. Los ejemplos en Sistema Internacional se tienen en la publicación EB101T, edición métrica canadiense de Design and Control of Concrete Mixtures.

distancia mínima entre las barras de refuerzo es de 10 cm. El único aditivo que se permite usar es para la inclusión de aire. No se cuenta con datos estadísticos de mezclas previas. Los materiales con que se dispone son los siguientes:

**Cemento:** Tipo I, ASTM C 150.

**Agregado grueso:** Grava de 19 mm (3/4") de tamaño máximo que contiene algunas partículas trituradas (ASTM C 33), con un peso específico seco en el horno de  $2\,680\text{ kg/m}^3$ \*\*\*, con una absorción de 0.5% (contenido de humedad en condición SSS) y con un peso volumétrico varillado y seco al horno de  $1\,602\text{ kg/m}^3$ . La muestra de laboratorio para las mezclas de prueba tiene un contenido de humedad de 2%.

**Agregado fino:** Arena natural (ASTM C 33) con un peso específico seco al horno de  $2\,640\text{ kg/m}^3$  y una absorción de 0.7%. El contenido de humedad de la muestra de laboratorio es de 6%. El módulo de finura es igual a 2.80.

**Aditivo inclusor de aire:** Del tipo resina de madera, ASTM C 260.

A partir de esta información, la tarea consiste en elaborar el proporcionamiento de una mezcla de prueba que cubra las especificaciones anteriores y que sea apropiada para las condiciones de exposición.

**Resistencia.** Como no se dispone de datos estadísticos,  $f'_{cr}$  (la resistencia a la compresión requerida para efectuar el proporcionamiento) de la Tabla 7-11, resulta ser igual a  $f'_c + 85$ . Por lo tanto  $f'_{cr} = 250 + 85 = 335\text{ kg/cm}^2$ .

**Relación agua-cemento.** Según la Tabla 7-1, para un medio con humedad, congelación y deshielo, se requiere una relación agua-cemento máxima de 0.50. Interpolando de la Tabla 7-3, la relación agua-cemento recomendada para una  $f'_{cr}$  de  $335\text{ kg/cm}^2$  es de 0.42. † Como gobierna la menor relación agua-cemento, la mezcla deberá diseñarse para una relación de 0.42. Si hubiera existido una curva con resultados de mezclas de prueba o de pruebas de campo, se habría podido extraer la relación agua-cemento de esos datos (Fig. 7-1).

**Tamaño del agregado grueso.** Partiendo de la información especificada, el agregado de tamaño máximo de 19 mm (3/4") resulta ser adecuado puesto que es menor que 1/3 del espesor de la losa y menor que 3/4 de la distancia libre entre las barras de refuerzo.

**Contenido de aire.** Para una exposición severa a la congelación-deshielo, la Tabla 7-6 recomienda un contenido de aire esperado de 6.0%. Por lo tanto, diseñe la mezcla para  $6\% \pm 1.0\%$  de aire y use 7% (ó la cantidad máxima permitida), para las proporciones de la mezcla. El contenido de aire de la mezcla de prueba deberá quedar dentro de  $\pm 0.5\%$  del máximo contenido de aire permitido.

**Revenimiento.** Como no se especificó ningún valor, un revenimiento de 2.5 a 7.5 cm sería adecuado, como lo indica la Tabla 7-7. Use 7.5 cm, el valor máximo recomendado para losas, para propósitos de la elaboración del proporcionamiento.

**Contenido de agua.** La Tabla 7-6 recomienda que un concreto con aire incluido, con revenimiento de 7.5 cm, hecho con agregado de tamaño máximo de 19 mm (3/4") tenga un contenido de agua de aproximadamente 181 kg por metro

cúbico. Sin embargo, la grava con algunas partículas trituradas debe reducir el contenido de agua dado en la tabla en aproximadamente 21 kg. Por lo tanto se puede estimar que el contenido de agua sea de aproximadamente 181 kg menos 21 kg, lo que resulta en 160 kg.

**Contenido de cemento.** El contenido de cemento está basado en los valores de la relación agua-cemento máxima y en el del contenido de agua. Por lo tanto, 160 kg de agua divididos entre una relación agua-cemento de 0.42 precisan de un contenido de cemento de 381 kg, el cual resulta mayor que los 335 kg mínimos comúnmente especificados para climas con congelación y deshielo severos. Los 381 kg también satisfacen los requisitos mínimos de cemento de la Tabla 7-8.

**Contenido de agregado grueso.** La cantidad de agregado grueso de tamaño máximo de 19 mm (3/4") se puede estimar con la Tabla 7-5. El volumen de agregado grueso recomendado cuando se utiliza una arena con un módulo de finura de 2.80 es de 0.62. Como pesa  $1\,602\text{ kg/m}^3$ , el peso de agregado grueso seco en horno para un metro cúbico de concreto es:

$$1602 \times 0.62 = 993\text{ kg por metro cúbico de concreto}$$

**Contenido de aditivo.** Para un contenido de aire de 7%, el fabricante del aditivo inclusor de aire recomienda una dosis de 0.5868 centímetros cúbicos por kilogramo de cemento. A partir de esta información, la cantidad de aditivo inclusor de aire es de:

$$0.5868 \times 381 = 224\text{ centímetros cúbicos por metro cúbico}$$

**Contenido de agregado fino.** A este nivel, a excepción del agregado fino, ya se conocen las cantidades de todos los ingredientes del concreto. En el método de volúmenes absolutos, el volumen del agregado fino se determina sustrayendo el volumen absoluto de los ingredientes conocidos a un metro cúbico. El volumen absoluto del agua, cemento y agregado grueso se calcula dividiendo su peso conocido entre su peso específico. Los cálculos por volumen se realizan como sigue:

$$\text{Agua} = \frac{160\text{ kg}}{1000\text{ kg m}^3} = 0.160\text{ m}^3$$

$$\text{Cemento} = \frac{381\text{ kg}}{3150\text{ kg m}^3} = 0.121\text{ m}^3$$

$$\text{Aire} = \frac{7.0}{100} \times 1000 = 0.070\text{ m}^3$$

$$\text{Agregado grueso} = \frac{993\text{ kg}}{2680\text{ kg m}^3} = 0.371\text{ m}^3$$

$$\text{Volumen total de los ingredientes conocidos} = 0.722\text{ m}^3$$

El volumen del aditivo líquido generalmente es demasiado insignificante para ser incluido en estos cálculos. Sin embargo, algunos aditivos tales como algunos acelerantes, superplastificantes, e inhibidores de la corrosión son excepciones debido a sus altas dosificaciones, y sus volúmenes deberán ser incluidos.

El volumen absoluto calculado para el agregado fino vier siendo:

\*\*\* Se trabajó con pesos específicos reales y no densidades (N del T) relativas para evitar complicaciones y facilitar la comprensión del lector.

†  $W/C = \{ (350-335) (0.48-0.40) / (350-280) \} + 0.40 = 0.42$

$$1.000 - 0.722 = 0.278 \text{ m}^3$$

El peso del agregado fino seco es:

$$0.278 \text{ m}^3 \times 2640 \text{ kg/m}^3 = 734 \text{ kg}$$

La mezcla tiene entonces las siguientes proporciones para un metro cúbico de concreto antes de realizar la mezcla de prueba:\*

Agua	160 kg
Cemento	381 kg
Agregado grueso (seco)	993 kg
Agregado fino (seco)	734 kg
Peso total	<u>2268 kg</u>

Aditivo inclusor de aire\*\* 224 cc

Revenimiento 7.5 cm ( $\pm 2$  cm para la mezcla de prueba)

Contenido de aire 7 % ( $\pm 0.5$  % para la mezcla de prueba)

Peso volumétrico estimado (usando agregado SSS) =  $[160 + 381 + (993 \times 1.005\ddagger) + (734 \times 1.007\ddagger)] = 2278 \text{ kg por metro cúbico}$

**Humedad.** Se tienen que hacer correcciones para compensar el contenido de agua, debido a la humedad existente en los agregados. En la práctica, los agregados contendrán una cantidad mensurable de humedad. Los pesos de los agregados secos en la mezcla deberán ser aumentados para compensar la cantidad de agua que es absorbida y contenida en la superficie de cada partícula y la que existe entre las partículas. El agua de mezclado agregada a la mezcla deberá reducirse en la misma cantidad de agua libre contribuida por el agregado. Las pruebas para este ejemplo indican que el contenido de humedad del agregado grueso es de 2% y que el contenido de humedad del agregado fino es de 6%.

Con los contenidos de humedad de los agregados previamente indicados, las proporciones de agregado para la mezcla de prueba cambian a:

Agregado grueso (2% de humedad) =  $993 \times 1.02 = 1013 \text{ kg}$   
 Agregado fino (6% de humedad) =  $734 \times 1.06 = 778 \text{ kg}$

El agua absorbida no forma parte del agua de mezclado y deberá quedar excluida del ajuste por humedad. La humedad superficial con que contribuye el agregado grueso llega a 2%-0.5%=1.5%; la humedad superficial con que contribuye el agregado fino es de 6%-0.7%=5.3%. El requisito estimado para el agua que se va a agregar será de:

$$160 - (993 \times 0.015) - (734 \times 0.053) = 106 \text{ kg}$$

Los pesos estimados para una mezcla de concreto de un metro cúbico, se corrigen para incluir la humedad del agregado como sigue:

Agua	106 kg
Cemento	381 kg
Agregado grueso (húmedo, 2%)	1013 kg
Agregado fino (húmedo, 6%)	<u>778 kg</u>

Total	2278 kg
Aditivo inclusor de aire	224 cc

**Mezcla de prueba.** En esta etapa, se deben revisar los pesos estimados de las mezclas por medio de mezclas de prueba o por mezclas de campo de tamaño normal. Es necesario mezclar una cantidad suficiente de concreto para realizar adecuadamente las pruebas de contenido de aire y revenimiento y para los tres cilindros de 15 x 30 cm, requeridos para los ensayos de resistencia a compresión a los 28 días. Para una mezcla de prueba de laboratorio es conveniente, en este caso, reducir los pesos para producir 60 litros de concreto ó 0.060 m<sup>3</sup>.

#### Mezcla de prueba de laboratorio

Agua	106 x 0.060 = 6.36 kg
Cemento	381 x 0.060 = 22.86 kg
Agregado grueso (húmedo)	1013 x 0.060 = 60.78 kg
Agregado fino (húmedo)	778 x 0.060 = <u>46.68 kg</u>
Total	136.68 kg
Aditivo inclusor de aire	224 x 0.060 = 13.44 cc††

Cuando se mezcló el concreto anterior, tuvo un revenimiento de 10 cm, un contenido de aire de 8 %, y un peso volumétrico de 2266 kg/m<sup>3</sup>. Durante el mezclado, una cierta cantidad del agua estimada puede quedarse sin emplear, o se puede llegar a usar una cantidad adicional de agua para lograr el revenimiento requerido. En este ejemplo, aunque se calculó que se agregaran 6.36 kg de agua, en la mezcla de prueba únicamente se usaron 6.29 kg. Por lo tanto, excluyendo al aditivo, la mezcla queda:

Agua	6.29 kg
Cemento	22.86 kg
Agregado grueso (húmedo, 2%)	60.78 kg
Agregado fino (húmedo, 6%)	<u>46.68 kg</u>
Total	136.61 kg

El rendimiento de la mezcla de prueba es de:

$$\frac{136.61}{2266} = 0.0602 \text{ m}^3$$

El contenido de agua de mezclado se determina con el agua agregada mas el agua libre en los agregados y se calcula como sigue:

\* Si hubiera existido información adecuada sobre el concreto usando estos materiales y si la elección de la relación agua-cemento se hubiera basado en datos aceptables, estas proporciones se habrían presentado como mezcla de diseño al ingeniero proyectista sin elaborar mezclas de prueba. Una mezcla así presentada mostraría un revenimiento de 2.5 a 7.5 cm y un contenido de aire de 5 % a 7 %.

\*\* La cantidad de aditivo inclusor de aire se puede ajustar en campo para obtener el contenido adecuado de aire.

† (0.5% de absorción 100) + 1 = 1.005

(0.7% de absorción 100) + 1 = 1.007

†† Debido a la pequeña cantidad de aditivo, los laboratorios convierten frecuentemente las onzas líquidas a milímetros multiplicando la cantidad de onzas líquidas por 29.57353 para mejorar la exactitud de la medida. También la mayoría de las pipetas de laboratorio que se utilizan para medir líquidos están graduadas en milímetros. (N. del T.: Se puede prescindir de esta última nota, pues ya se han hecho las conversiones pertinentes del Sistema Inglés al Sistema Métrico Decimal.) Página 87.

Agua agregada = 6.29 kg

Agua libre en el agregado grueso =  $\frac{60.78}{1.02*} \times 0.015^{**} = 0.894$  kg

Agua libre en el agregado fino =  $\frac{46.68}{1.06*} \times 0.053^{**} = 2.334$  kg

Total 9.518 kg

La cantidad de agua de mezclado requerida para un metro cúbico de concreto que tenga el mismo revenimiento que la mezcla de prueba será de:

$$\frac{9.518 \text{ kg}}{0.0602 \text{ m}^3} = 158.106 \text{ kg/m}^3$$

**Ajustes a la mezcla.** El revenimiento de 10 cm es inaceptable (>2 cm por encima de 7.5 cm máx.), el rendimiento fue levemente alto, y el 8.0% de contenido de aire tal como se midió en este ejemplo también es demasiado alto (>0.5% por encima del 7% máx.). Ajuste el rendimiento y reestime la cantidad de aditivo inclusor de aire requerido, para tener un contenido de aire de 7% y ajuste la cantidad de agua para obtener un revenimiento de 7.5 cm. Aumente el contenido de agua de mezclado, 3 kg por cada 1% de reducción de contenido de aire a partir del contenido de agua de la mezcla de prueba y reduzca el contenido de agua 6 kg por cada reducción de 2.5 cm en el revenimiento.

La cantidad de agua ajustada para las reducciones en el valor del revenimiento y en el contenido de aire es:

$$(3 \times 1) - (6 \times 1) + 158.106 = 155.106 \text{ kg por metro cúbico}$$

Con la cantidad reducida de agua de mezclado para la mezcla de prueba, se necesita menos cemento para mantener la relación agua-cemento en 0.42. El nuevo contenido de cemento es:

$$\frac{155.106}{0.42} = 369 \text{ kg por metro cúbico}$$

La cantidad de agregado grueso permanece sin cambios porque la trabajabilidad es satisfactoria.

Ahora los pesos para la mezcla basados en los nuevos contenidos de cemento y de agua son los siguientes:

$$\text{Agua} = \frac{155 \text{ kg}}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0.155 \text{ m}^3$$

$$\text{Cemento} = \frac{369 \text{ kg}}{3150 \text{ kg/m}^3} = 0.117 \text{ m}^3$$

$$\text{Agregado grueso} = \frac{993 \text{ kg}}{2680 \text{ kg/m}^3} = 0.371 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire} = \frac{7.0}{100} \times 1000 = 0.070 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de agregado fino} = 1.000 - 0.713 = 0.287 \text{ m}^3$$

El peso requerido de agregado fino seco es:

$$0.287 \times 2640 = 758 \text{ kg}$$

$$\text{Aditivo inclusor de aire} \dagger = 0.5216 \times 369 = 192.5 \text{ cc}$$

Los pesos de mezcla ajustados por metro cúbico de concreto son:

Agua	155 kg
Cemento	369 kg
Agregado grueso (seco)	993 kg
Agregado fino (seco)	758 kg
Total	<u>2275 kg</u>
Aditivo inclusor de aire	192.5 cc

El peso volumétrico estimado del concreto (con los agregados en condición SSS) será de:

$$= 155 + 369 + (993 \times 1.005) + (758 \times 1.007) \\ = 2285 \text{ kg por metro cúbico}$$

Luego de haber terminado la revisión de estas proporciones por medio de una mezcla de prueba, se encontró que las proporciones resultaron adecuadas para el revenimiento, contenido de aire y rendimiento deseados. Los cilindros de prueba a la edad de 28 días, tuvieron una resistencia a la compresión promedio de 345 kg/cm<sup>2</sup>, la cual excede al f'cr que es igual a 335 kg/cm<sup>2</sup>. Debido a las variaciones en contenido de humedad, tasas de absorción, y peso específico del agregado, el peso unitario determinado según los cálculos por volumen no siempre puede ser igual al peso volumétrico determinado conforme a la norma ASTM C 138. Ocasionalmente la proporción de agregado fino a agregado grueso, se mantiene constante, ajustando los pesos de la mezcla para conservar la trabajabilidad u otras propiedades obtenidas en la primera mezcla de prueba. Cuando ya se hayan hecho los ajustes al cemento, agua y contenido de aire, el volumen restante para el agregado, se proporciona adecuadamente entre los agregados fino y grueso.

Las mezclas de concreto con relaciones agua-cemento superiores e inferiores a 0.42, también se deberán ensayar para poder desarrollar una curva de resistencia (Fig. 7-1). A partir de la curva, se puede proporcionar y probar una nueva mezcla con una resistencia a la compresión mas cercana a f'cr, aún con una relación agua-cemento menor que 0.50 por condiciones de exposición. La Fig. 7-4 ilustra el concepto general para el diseño de mezclas. La mezcla final probablemente lucirá similar a la mezcla anterior con un rango de revenimiento de 2.5 a 7.5 cm y un contenido de aire de 5 % a 7 %. La cantidad de aditivo inclusor de aire deberá ajustarse a las condiciones de campo para conservar el contenido especificado de aire.

**Reductores de agua.** Los aditivos reductores de agua se emplean en las mezclas de concreto para aumentar su

\*  $1 + (2\% \text{ de humedad } 100) = 1.02$

$1 + (6\% \text{ de humedad } 100) = 1.06$

\*\*  $(2\% \text{ de humedad} - 0.5\% \text{ de absorción}) / 100 = 0.015$

$(6\% \text{ de humedad} - 0.7\% \text{ de absorción}) / 100 = 0.053$

† Con una dosificación de agente inclusor de aire de 0.5216 centímetros cúbicos por kg de cemento se espera obtener el 7% de contenido de aire.

trabajabilidad, sin tener que agregar una cantidad adicional de agua o sin tener que reducir su relación agua-cemento con el propósito de mejorar su permeabilidad u otras propiedades.

Haciendo uso de la mezcla final desarrollada en el último ejemplo, suponga que el ingeniero proyectista aprueba el uso de un aditivo reductor de agua, para aumentar el revenimiento a 12.5 cm a fin de mejorar la trabajabilidad en una zona de difícil colado. Suponiendo que la dosificación recomendada por el fabricante para subir el revenimiento 5 cm, es de 2.5 gramos de aditivo reductor de agua por kilogramo de cemento, la cantidad de aditivo a usar se convierte en  $369 \times 2.5 = 922.5$  gramos por metro cúbico de concreto. También puede llegar a ser necesario reducir la cantidad de agente inductor de aire (hasta en un 50. %), puesto que muchos aditivos reductores de agua incluyen aire. Si se hubiera usado un aditivo reductor de agua para disminuir la relación agua-cemento, también habría sido necesario hacer ajustes en los contenidos de agua y de arena.

**Puzolanas.** Algunas veces se agregan puzolanas, además del cemento o como reemplazo parcial de éste para contribuir a mejorar la trabajabilidad y la resistencia contra el ataque de los sulfatos y a reducir la reactividad con los álcalis. Si una puzolana u otro aditivo mineral finamente dividido (Capítulo 6), hubiera sido requerido para la mezcla del ejemplo, habría entrado dentro del primer cálculo del volumen para determinar el contenido de agregado fino.

Suponiendo que además del contenido de cemento original se hubieran usado 44.5 kg de ceniza volante con un peso específico de  $2,500 \text{ kg/m}^3$ , el volumen de ceniza sería:

$$\frac{44.5}{2500} = 0.0178 \text{ m}^3$$

La relación agua-cemento más puzolana sería:

$$\frac{W}{C+P} = \frac{160}{381+44.5} = 0.38 \text{ en peso}$$

La relación agua-cemento seguiría siendo:

$$\frac{W}{C} = \frac{160}{381} = 0.42 \text{ en peso}$$

Se tendría que reducir el volumen de agregado fino, unos  $0.0178 \text{ m}^3$  para introducir el volumen de ceniza.

La cantidad de puzolana y el cálculo del volumen, también se pudieron haber derivado en conjunción con el primer cálculo del contenido de cemento utilizando una relación W/C+P de 0.42 (ó equivalente). Por ejemplo, suponga que se especifica que el 15 % de material cementante, sea una puzolana y que la relación  $W/(C+P) = 0.42$ . Entonces con  $W = 160 \text{ kg}$  y con  $C + P = 381 \text{ kg}$ ,  $P = 381 \times 15/100 = 57 \text{ kg}$  y  $C = 381 - 57 = 324 \text{ kg}$ . Seguirían los cálculos apropiados para éstos y para otros ingredientes de la mezcla.

## Ejemplo 2. Mezcla de prueba de laboratorio haciendo uso del Método de la Relación Agua-Cemento de la PCA

Aunque las especificaciones que siguen se pudieron haber obtenido utilizando los métodos del Ejemplo 1, el siguiente método

efectúa el desarrollo del proporcionamiento de la mezcla, partiendo directamente de proporcionamientos de prueba de laboratorio, mas que a través de desarrollar primero el diseño de un metro cúbico, tal como ocurre en el Ejemplo 1.

**Especificaciones.** Se requiere concreto con aire incluido para un muro de cimentación de concreto reforzado que estará en contacto con suelos con cantidades moderadas de sulfatos. Se especifica una resistencia a la compresión,  $f'c$ , de  $210 \text{ kg/cm}^2$  a los 28 días utilizando cemento Tipo II. El espesor mínimo del muro es de 25 cm y el recubrimiento de concreto es de 7.5 cm por encima del acero de refuerzo de diámetro No. 4 ( " ). La distancia libre entre barras de refuerzo es de

Datos y cálculos para mezclas de prueba (Agregados saturados y superficialmente secos)					
Peso de cemento por mezcla: 4.5 kg _____ 9.0 kg _____ 18.0 kg _____					
Nota: Complete las columnas 1-4, llene los puntos inferiores, y luego complete las columnas 5 y 6.					
1 Material	2 Peso inicial, kg	3 Peso final, kg	4 Peso empleado, Col. 2 menos Col. 3	5 Peso por metro cúbico (C) x Col. 4	6 Observaciones
Cemento	9.0	0.0	9.0	319	
Agua	4.5	0.0	4.5	159	
Agregado fino	30.0	12.7	17.3	613 (a)	Porcentaje de agregado fino $\frac{a}{a+b} \times 100$
Agregado grueso	40.7	6.3	34.4	1219 (b)	
Aditivo inductor de aire	8.5 g	Total = 65.2 (T)		2310	$\frac{a}{a+b} \times 100 = 33.5\%$
T x C = 65.2 x 35.429 = 2310					Revisión matemática
Revenimiento medido: _____ cm    Contenido de aire medido: _____ %					
Apariencia: Arenosa _____ Buena _____ Gravuda _____					
Trabajabilidad: Buena _____ Mediana _____ Pobre _____					
Peso del recipiente + concreto = _____ 42.4 _____ kg					
Peso del recipiente = _____ 9.7 _____ kg					
Peso del concreto(A) = _____ 32.7 _____ kg					
Volumen del recipiente (B) = _____ 14.158 _____ lt					
Peso volumétrico del concreto (W) = $\frac{32.7}{0.014158} = 2310 \text{ kg/m}^3$					
Rendimiento (volumen de concreto producido) = $\frac{\text{Peso total del material por mezcla}}{\text{Peso volumétrico del concreto}}$					
= $\frac{65.2}{2310.0} = 0.02823 \text{ m}^3$					
Número de mezclas de _____ 65.2 _____ kg por metro cúbico (C) =					
= $\frac{1.0}{0.02823} = 35.429$ mezclas					

Fig. 7-2. Hoja de datos para mezclas de prueba.

7.5 cm. Suponga que la relación, tomando como base datos de campo, que existe entre la relación agua-cemento y la resistencia a la compresión se ilustra en la Figura 7-1. Basándose en los registros de prueba de los materiales a emplear, la desviación estándar es de 21 kg/cm<sup>2</sup>. Realice el proporcionamiento de la mezcla que satisfaga las especificaciones anteriores, así como su revisión por medio de mezclas de prueba. Todos los datos se introducen en los espacios apropiados en la hoja de datos para mezclas de prueba (Fig. 7-2).

**Relación agua-cemento.** Para estas condiciones de exposición, la Tabla 7-2, indica que se debe usar un concreto que tenga una relación agua-cemento máxima de 0.50.

Para la resistencia, la relación agua-cemento se selecciona de una gráfica cuya curva muestra la relación que existe entre la relación agua-cemento y la resistencia a la compresión en base a datos provenientes de mezclas de prueba de laboratorio o, como ocurre en este caso, de experiencias de campo (Fig. 7-1).

Para una desviación estándar de 21 kg/cm<sup>2</sup>,  $f'_{cr}$  deberá ser el mayor de:

$$f'_{cr} = f'_c + 1.34 S = 210 + 1.34 (21) = 240 \text{ kg/cm}^2$$

6

$$f'_{cr} = f'_c + 2.33 S - 35 = 210 + 2.33 (21) - 35 = 225 \text{ kg/cm}^2$$

Por lo tanto,  $f'_{cr} = 240 \text{ kg/cm}^2$

De la Fig. 7-1, la relación agua-cemento para un concreto con aire incluido resulta ser de 0.53 para un  $f'_{cr}$  de 240 kg/cm<sup>2</sup>. Esta es mayor que 0.50, que es la cantidad permitida para las condiciones de exposición; por lo tanto, rigen los requisitos por exposición. Se deberá usar una relación agua-cemento de 0.50, a pesar que se produzcan resistencias mayores que las necesarias para satisfacer los requisitos estructurales.

**Tamaño de agregado.** Suponiendo que se pueda aprovechar de manera económica, el agregado de tamaño máximo de 38 mm (1") resulta satisfactorio; es menor que 1/5 del espesor del muro y menor que 3/4, de la distancia libre entre barras de refuerzo y entre barras de refuerzo y cimbra. Si no se pudiera conseguir este tamaño, se usaría el tamaño inmediato inferior disponible. Para estas mezclas de prueba los agregados habrán de estar en condición saturado y superficialmente seco.

**Contenido de aire.** Se ha especificado un nivel moderado de contenido de aire debido a las condiciones de exposición y también para mejorar la trabajabilidad. De la Tabla 7-6, el contenido de aire deseado para un concreto sujeto a condiciones moderadas de exposición cuyo tamaño máximo de agregado sea de 38 mm (1") es de 4.5 %. Por consiguiente, efectúe el proporcionamiento de la mezcla con un rango de contenido de aire de 4.5 % a 1 % y espere lograr 5.5 % a 0.5 % en la mezcla de prueba.

**Revenimiento.** El rango de revenimientos recomendado para colar un muro de cimentación de concreto reforzado es de 2.5 a 7.5 cm, bajo el supuesto que el concreto se consolide mediante vibración (Tabla 7-7). Dosifique para 7.5 cm  $\pm$  2 cm.

**Cantidades a dosificar.** Por conveniencia, se hará una mezcla que contenga 9 kg de cemento. La cantidad de agua de mezclado requerida es de  $9 \times 0.50 = 4.5 \text{ kg}$ . Las muestras representativas de agregado fino y grueso se pesan en recipientes adecuados. Los valores se indican como pesos iniciales en la Columna 2 de la hoja de datos para mezclas de prueba (Fig. 7-2).

Todas las cantidades medidas de cemento, agua, y aditivo incluso de aire se utilizan y se agregan a la mezcladora. Los agregados fino y grueso, previamente llevados a una condición saturado y superficialmente seco, se agregan, en proporciones similares a las mezclas de las cuales se desarrolló la Fig. 7-1, hasta que una mezcla trabajable de concreto con un revenimiento considerado adecuado para el colado se produzca. Las proporciones relativas para la trabajabilidad pueden ser fácilmente juzgadas por un ingeniero o un técnico experimentado en concreto.

**Trabajabilidad.** Los resultados de las pruebas de revenimiento, contenido de aire, peso volumétrico, así como una descripción de la apariencia y de la trabajabilidad ("Buena" para este ejemplo), se anotan en la hoja de datos.

Los pesos de los agregados fino y grueso no utilizados se registran en la hoja de datos en la Columna 3, y los pesos de los agregados usados (Columna 2 menos Columna 3) se anotan en la Columna 4. Si al efectuar el ensaye, el revenimiento hubiera sido mayor que el requerido, se habría añadido una cantidad adicional de agregado fino o grueso (o de ambos). Si el revenimiento hubiera sido menor que el requerido, se habría agregado agua y cemento en la relación apropiada (0.50), para producir el revenimiento deseado. Es importante que cualquier cantidad adicional sea medida con precisión y registrada en la hoja de datos.

**Proporciones de la mezcla.** Las proporciones de la mezcla para un metro cúbico de concreto se calculan en la Columna 5 de la Fig. 7-2, utilizando el rendimiento de la mezcla y el peso volumétrico. Por ejemplo, el número de kilogramos de cemento por metro cúbico, se determina, dividiendo un metro cúbico entre el volumen de concreto en la mezcla y multiplicando el resultado por el número de kilogramos de cemento en la mezcla. Del mismo modo se calcula el porcentaje en peso de agregado fino respecto de la cantidad total de agregado. En esta mezcla de prueba, el contenido de cemento fue de 319 kg/m<sup>3</sup>, y el agregado fino constituyó el 33.5% del agregado total en peso. El contenido de aire y el revenimiento fueron aceptables. La resistencia a 28 días fue de 271 kg/cm<sup>2</sup> ( $f'_{cr}$ ). La mezcla en la Columna 5, junto con los límites en revenimiento y contenido de aire de 2.5 a 7.5 cm y de 3.5 % a 5.5 %, respectivamente, está lista para ser sometida a la opinión del ingeniero proyectista.

**Ajustes a la mezcla.** Para determinar las proporciones más trabajables y económicas, se pueden realizar mezclas de prueba adicionales haciendo variar el porcentaje de agregado fino. En cada mezcla la relación agua-cemento, la granulometría del agregado, el contenido de aire y el revenimiento deberán mantenerse aproximadamente constantes. En la Tabla 7-12 se resumen los resultados de cuatro mezclas de prueba.

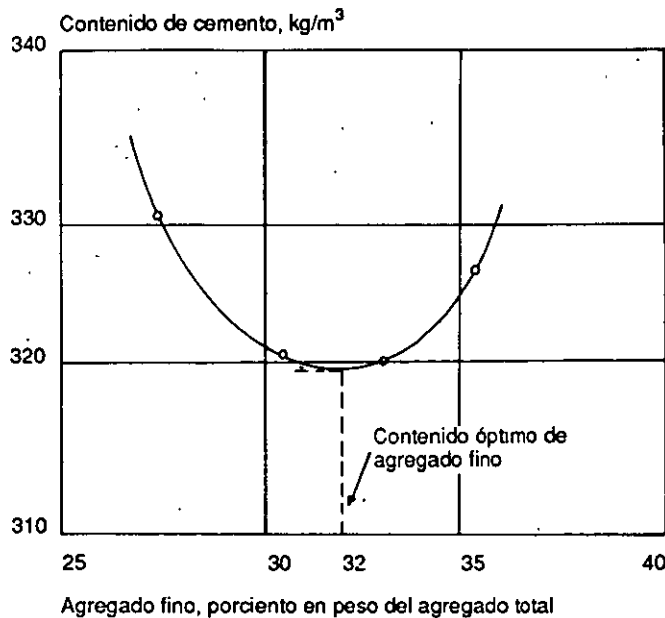
A partir de los datos resumidos en la Tabla 7-12, se grafica el porcentaje de agregado fino contra el contenido de cemento, tal como se muestra en la Fig. 7-3. Observe que para la combinación de materiales empleada, el contenido mínimo de cemento (319 kg por metro cúbico) ocurre cuando



**Tabla 7-12. Ejemplo de resultados de mezclas de prueba de laboratorio\*.**

Mezcla número	Revenimiento, cm	Contenido de aire, en por ciento	Peso volumétrico, kg/m <sup>3</sup>	Contenido de cemento, kg/m <sup>3</sup>	Agregado fino, porcentaje respecto de la cantidad total de agregado	Trabajabilidad
1	7.5	5.4	2307	320	33.5	Buena
2	7.0	4.9	2307	329	27.4	Aspera
3	6.5	5.1	2307	326	35.5	Excelente
4	7.5	4.7	2323	320	30.5	Buenas

\* La relación agua-cemento fue igual a 0.50.



**Figura 7-3. Ejemplo de la relación entre el porcentaje de agregado fino y el contenido de cemento para una relación agua-cemento y un revenimiento dados.**

agregado fino es de aproximadamente 32 % del agregado total. Como la relación agua-cemento es de 0.50 y el peso volumétrico del concreto para un contenido de aire de 5%, es de aproximadamente 2310 kg por metro cúbico, se pueden calcular las cantidades de material requeridas por metro cúbico:

Cemento	319.0 kg
Agua	159.5 kg
Total	478.5 kg
Concreto	2 310.0 kg
Agregados	$2\ 310.0 - 478.5 = 1\ 831.5$ kg
Agregado fino (SSS)	$\frac{32}{100} \times 1\ 831.5 = 586.0$ kg
Agregado grueso (SSS)	$1\ 831.5 - 586.0 = 1\ 245.5$ kg

A no ser que se tenga cuidado en controlar el revenimiento y el contenido de aire y si no se determinan los pesos con precisión, obtener los datos necesarios para graficar una curva como la de la Fig. 7-3 puede llegar a ser una tarea difícil. Con agregados redondeados y de buena granulometría la curva podría ser casi plana.

Si existiera una gran diferencia en el costo de los agregados fino y grueso, el porcentaje óptimo de agregado fino por economía, podría ser diferente de aquel en el que ocurre el contenido mínimo de cemento. Por ejemplo, si el

**Tabla 7-13. Ejemplo de mezclas de prueba para concreto sin aire incluido de consistencia media, revenimiento de 7.5 a 10.0cm**

Relación agua-cemento, kg/kg	Tamaño máximo de agregado, cm (pulg)	Contenido de aire (aire atrapado), por ciento	Agua, kg por metro cúbico de concreto	Cemento, kg por metro cúbico de concreto	Con arena fina, módulo de finura = 2.50			Con arena gruesa, módulo de finura = 2.90		
					Agregado fino, porcentaje del agregado total	Agregado fino, kg por metro cúbico de concreto	Agregado grueso, kg por metro cúbico de concreto	Agregado fino, porcentaje del agregado total	Agregado fino, kg por metro cúbico de concreto	Agregado grueso, kg por metro cúbico de concreto
0.40	9.5 (3/8")	3	228	572	50	736	748	54	801	682
	12.7 (1/2")	2.5	217	543	42	653	902	47	724	831
	19.0 (3/4")	2	202	504	35	570	1068	39	641	997
	25.4 (1")	1.5	193	484	32	540	1151	36	605	1086
	38.1 (1 1/2")	1	178	445	29	522	1252	33	593	1181
0.45	9.5 (3/8")	3	228	507	51	789	748	56	854	682
	12.7 (1/2")	2.5	217	481	44	700	902	48	771	831
	19.0 (3/4")	2	202	448	37	617	1068	41	688	997
	25.4 (1")	1.5	193	427	34	587	1151	38	653	1086
	38.1 (1 1/2")	1	178	394	31	570	1252	35	641	1181

**Tabla 7-13. Ejemplo de mezclas de prueba para concreto sin aire incluido de consistencia media, revenimiento de 7.5 a 10.0cm (Continuación)**

Relación agua-cemento, kg/kg	Tamaño máximo de agregado, cm (pulg)	Contenido de aire (aire atrapado), porcentaje	Agua, kg por metro cúbico de concreto	Cemento, kg por metro cúbico de concreto	Con arena fina, módulo de finura = 2.50			Con arena gruesa, módulo de finura = 2.90		
					Agregado fino, porcentaje del agregado total	Agregado fino, kg por metro cúbico de concreto	Agregado grueso, kg por metro cúbico de concreto	Agregado fino, porcentaje del agregado total	Agregado fino, kg por metro cúbico de concreto	Agregado grueso, kg por metro cúbico de concreto
0.50	9.5 (3/8")	3	228	457	53	831	748	57	896	682
	12.7 (1/2")	2.5	217	433	45	742	902	49	813	831
	19.0 (3/4")	2	202	403	38	653	1068	42	724	997
	25.4 (1")	1.5	193	386	35	623	1151	39	688	1086
	38.1 (1 1/2")	1	178	356	32	599	1252	36	670	1181
0.55	9.5 (3/8")	3	228	415	54	866	748	56	931	682
	12.7 (1/2")	2.5	217	394	46	777	902	51	848	831
	19.0 (3/4")	2	202	368	39	682	1068	43	754	997
	25.4 (1")	1.5	193	350	36	653	1151	40	718	1086
	38.1 (1 1/2")	1	178	323	33	629	1252	37	700	1181
0.60	9.5 (3/8")	3	228	380	55	896	748	58	961	682
	12.7 (1/2")	2.5	217	362	47	801	902	51	872	831
	19.0 (3/4")	2	202	335	40	712	1068	44	783	997
	25.4 (1")	1.5	193	320	37	676	1151	41	742	1086
	38.1 (1 1/2")	1	178	297	34	647	1252	38	718	1181
0.65	9.5 (3/8")	3	228	350	55	920	748	59	985	682
	12.7 (1/2")	2.5	217	332	48	825	902	52	896	831
	19.0 (3/4")	2	202	311	41	730	1068	45	801	997
	25.4 (1")	1.5	193	297	38	700	1151	41	765	1086
	38.1 (1 1/2")	1	178	273	35	670	1252	39	742	1181
0.70	9.5 (3/8")	3	228	326	56	943	748	60	1009	682
	12.7 (1/2")	2.5	217	308	48	848	902	53	920	831
	19.0 (3/4")	2	202	288	41	754	1068	45	825	997
	25.4 (1")	1.5	193	276	38	718	1151	42	783	1086
	38.1 (1 1/2")	1	178	255	35	682	1252	39	754	1181

**Tabla 7-14. Ejemplo de mezclas de prueba para concreto con aire incluido de consistencia media, revenimiento de 7.5 a 10.0cm.**

Relación agua-cemento, kg/kg	Tamaño máximo de agregado, cm (pulg)	Contenido de aire, porcentaje	Agua, kg por metro cúbico de concreto	Cemento, kg por metro cúbico de concreto	Con arena fina, módulo de finura = 2.50			Con arena gruesa, módulo de finura = 2.90		
					Agregado fino, porcentaje del agregado total	Agregado fino, kg por metro cúbico de concreto	Agregado grueso, kg por metro cúbico de concreto	Agregado fino, porcentaje del agregado total	Agregado fino, kg por metro cúbico de concreto	Agregado grueso, kg por metro cúbico de concreto
0.40	9.5 (3/8")	7.5	202	504	50	742	748	54	807	682
	12.7 (1/2")	7.5	193	484	41	629	902	46	700	831
	19.0 (3/4")	6	178	445	35	576	1068	39	647	997
	25.4 (1")	6	169	424	32	534	1151	36	599	1086
	38.1 (1 1/2")	5	157	395	29	516	1252	33	587	1181
0.45	9.5 (3/8")	7.5	202	448	51	789	748	56	854	682
	12.7 (1/2")	7.5	193	427	43	676	902	47	747	831
	19.0 (3/4")	6	178	395	37	617	1068	41	688	997
	25.4 (1")	6	169	378	33	576	1151	37	641	1086
	38.1 (1 1/2")	5	157	350	31	552	1252	35	623	1181
0.50	9.5 (3/8")	7.5	202	403	53	831	748	57	896	682
	12.7 (1/2")	7.5	193	386	44	712	902	49	783	831
	19.0 (3/4")	6	178	356	38	653	1068	42	724	997
	25.4 (1")	6	169	338	34	605	1151	38	670	1086
	38.1 (1 1/2")	5	157	314	32	581	1252	36	653	1181
0.55	9.5 (3/8")	7.5	202	368	54	861	748	58	926	682
	12.7 (1/2")	7.5	193	350	45	741	902	49	813	831
	19.0 (3/4")	6	178	323	39	676	1068	43	748	997
	25.4 (1")	6	169	309	36	629	1151	39	694	1086
	38.1 (1 1/2")	5	157	285	33	611	1252	37	682	1181

**Tabla 7-14. Ejemplo de mezclas de prueba para concreto con aire incluido de consistencia media, revenimiento de 7.5 a 10.0 cm. (Continuación)**

Relación agua-cemento, kg/kg	Tamaño máximo de agregado, cm (pulg)	Contenido de aire, por ciento	Agua, kg por metro cúbico de concreto	Cemento, kg por metro cúbico de concreto	Con arena fina, módulo de finura = 2.50			Con arena gruesa, módulo de finura = 2.90		
					Agregado fino, porcentaje del agregado total	Agregado fino, kg por metro cúbico de concreto	Agregado grueso, kg por metro cúbico de concreto	Agregado fino, porcentaje del agregado total	Agregado fino, kg por metro cúbico de concreto	Agregado grueso, kg por metro cúbico de concreto
0.60	9.5 (3/8")	7.5	202	335	54	884	748	58	949	682
	12.7 (1/2")	7.5	193	320	46	765	902	50	837	831
	19.0 (3/4")	6	178	297	40	700	1068	44	771	997
	25.4 (1")	6	169	282	36	653	1151	40	718	1086
	38.1 (1 1/2")	5	157	261	33	629	1252	37	700	1181
0.65	9.5 (3/8")	7.5	202	311	55	908	748	59	973	682
	12.7 (1/2")	7.5	193	297	47	789	902	51	860	831
	19.0 (3/4")	6	178	273	40	718	1068	44	789	997
	25.4 (1")	6	169	261	37	670	1151	40	736	1086
	38.1 (1 1/2")	5	157	243	34	647	1252	38	718	1181
0.70	9.5 (3/8")	7.5	202	288	55	926	748	59	991	682
	12.7 (1/2")	7.5	193	276	47	807	902	51	878	831
	19.0 (3/4")	6	178	255	41	736	1068	45	807	997
	25.4 (1")	6	169	240	37	688	1151	41	754	1086
	38.1 (1 1/2")	5	157	225	34	658	1252	38	730	1181

**Tabla 7-15. Proporciones en peso para producir un metro cúbico de concreto para trabajos pequeños.**

Tamaño máximo de agregado grueso, cm	Concreto con aire incluido				Concreto sin aire incluido			
	Cemento, kg	Agregado fino húmedo, kg	Agregado grueso húmedo, kg*	Agua, kg	Cemento, kg	Agregado fino húmedo, kg	Agregado grueso húmedo, kg*	Agua, kg
9.5 (3/8")	465	850	735	160	465	945	735	175
12.7 (1/2")	430	735	880	160	430	850	880	175
19.0 (3/4")	400	675	1040	160	400	755	1040	160
25.4 (1")	385	625	1120	145	385	720	1120	160
38.1 (1 1/2")	370	610	1200	145	370	690	1200	145

\* Si se emplea piedra triturada, disminuya la cantidad de agregado grueso 50 kg y aumente la cantidad de agregado fino 50 kg. Referencia 7-1.

**Tabla 7-16. Proporciones en volumen\* para producir un metro cúbico de concreto para trabajos pequeños.**

Tamaño máximo de agregado grueso, cm	Concreto con aire incluido				Concreto sin aire incluido			
	Cemento	Agregado fino húmedo	Agregado grueso húmedo	Agua	Cemento	Agregado fino húmedo*	Agregado grueso húmedo	Agua
9.5 (3/8")	1	2 1/4	1 1/2	1/2	1	2 1/2	1 1/2	1/2
12.7 (1/2")	1	2 1/4	2	1/2	1	2 1/2	2	1/2
19.0 (3/4")	1	2 1/4	2 1/2	1/2	1	2 1/2	2 1/2	1/2
25.4 (1")	1	2 1/4	2 3/4	1/2	1	2 1/2	2 3/4	1/2
38.1 (1 1/2")	1	2 1/4	3	1/2	1	2 1/2	3	1/2

\* El volumen combinado resulta ser aproximadamente 2/3 de la suma de los volúmenes sueltos originales. Referencia 7-1.

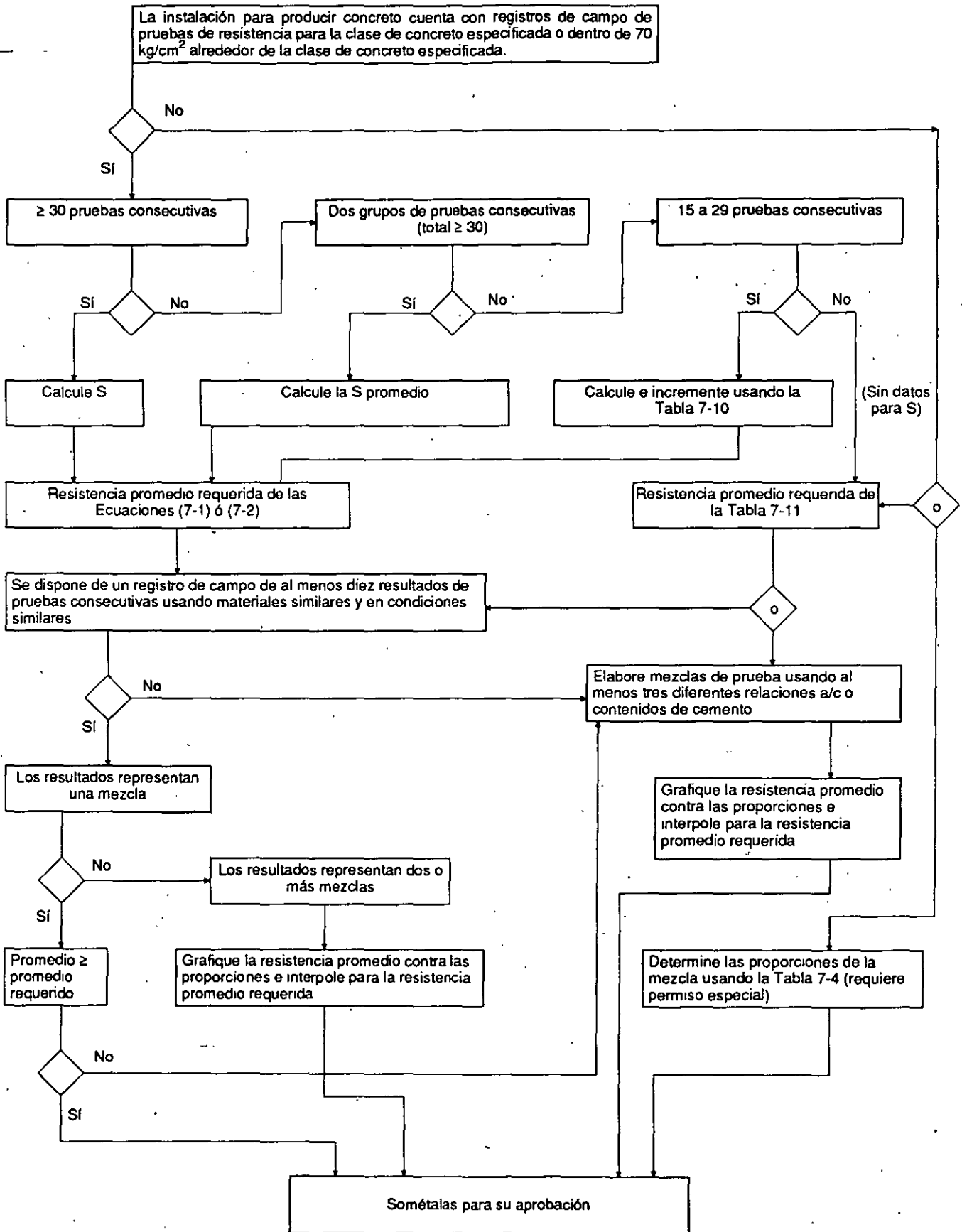


Figura 7-4. Diagrama de flujo para la selección y documentación de las proporciones del concreto. Referencia 7-4.

agregado grueso es más costoso que el agregado fino, podría resultar más económico usar más agregado fino aún con el consecuente incremento en contenido de cemento. Las Tablas 7-13 y 7-14 se han preparado para ilustrar el cambio en las proporciones de las mezclas para varios tipos de mezclas de concreto que utilizan fuentes de agregado particulares.

## CONCRETO PARA TRABAJOS PEQUEÑOS

Aunque en la mayoría de construcciones generalmente se utilizan mezclas de concreto premezclado bien definidas, el concreto premezclado no siempre resulta práctico para los trabajos pequeños, especialmente aquellos en que se requiere de un metro cúbico o menos. Para tales trabajos se necesitan cantidades pequeñas de concreto mezclado en el lugar.

Si no se cuenta con proporcionamientos o especificaciones para la mezcla, se puede hacer uso de las Tablas 7-15 y 7-16 para elegir las proporciones para el concreto. Se deberá atender las recomendaciones expuestas previamente, con respecto a las condiciones de exposición.

Los proporcionamientos de las Tablas 7-15 y 7-16 sólo son guías y podrían requerir de ajustes para obtener una mezcla trabajable con los agregados localmente disponibles. En algunos países se pueden adquirir empacados y mezclados los ingredientes para el concreto en estado seco (ASTM C 387). Si desea obtener una información más amplia, consulte la Referencia 7-1.

## CONCLUSIONES SOBRE EL DISEÑO

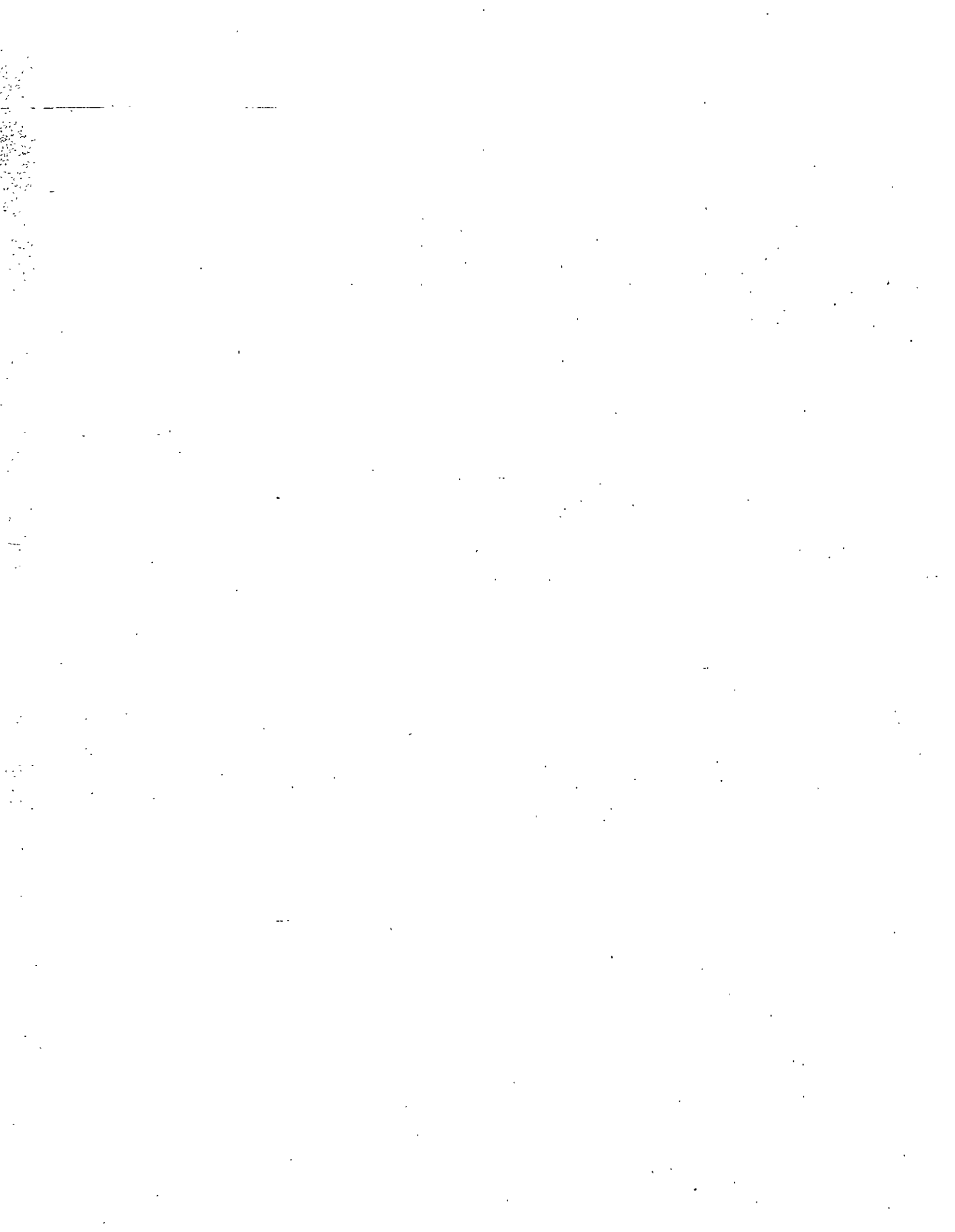
En la práctica, las proporciones de las mezclas de concreto serán gobernadas por los límites de datos disponibles sobre propiedades de los materiales, el grado de control ejercido durante la producción de concreto en la planta, y la supervisión en la obra. No debe esperarse que los resultados de campo sean un duplicado exacto de las mezclas de prueba de laboratorio. En la obra usualmente es necesario hacer un ajuste a la mezcla de prueba elegida.

Los procedimientos para el proporcionamiento de mezclas aquí presentados, son aplicables a concretos de peso normal. Para los concretos que requieran alguna propiedad en especial, haciendo uso de materiales o aditivos especiales - por ejemplo, agregados de peso ligero - se pueden ver involucrados diferentes principios de proporcionamiento. En el Capítulo 15 se menciona un cierto número de concretos especiales.

El diagrama de flujo de la Fig. 7-4 resume los procedimientos para el diseño de mezclas.

## REFERENCIAS

- 7-1. *Concrete for Small Jobs*, IS174T, Portland Cement Association, 1980.
- 7-2. *Guide for Concrete Floor and Slab Construction* ACI 302.1R-80, ACI Committee 302 Report American Concrete Institute, Detroit, 1980.
- 7-3. *ACI Standard Recommended Practice for Evaluation of Strength Test Results of Concrete*, ACI 214-77, reaffirmed 1983, ACI Committee 214 Report, American Concrete Institute.
- 7-4. *Commentary on Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318)*, ACI 318R-83, ACI, Committee 318 Report, American Concrete Institute, 1983.
- 7-5. *Guide for the Design and Construction of Fixed Off-shore Concrete Structures*, ACI 357R-84, ACI Committee 357 Report, American Concrete Institute, 1984.
- 7-6. *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete*, ACI 211.1-81, revised 1985, ACI Committee 211 Report, American Concrete Institute.
- 7-7. Seghal, J. Paul, "Concrete Mix Design and Development," *Concrete*, Pit and Quarry Publications, Inc., Cleveland, February 1985.
- 7-8. *Specifications for Structural Concrete for Buildings*, ACI 301-84, revised 1985, ACI Committee 301 Report, American Concrete Institute.
- 7-9. *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*, ACI 318-83, revised 1986, ACI Committee Report, American Concrete Institute.



## CAPITULO 8

# Dosificación, Mezclado, Transporte, y Manejo del Concreto

La producción y entrega del concreto se lleva a cabo de diferentes maneras. En este capítulo se presentan los pasos básicos así como las técnicas más comunes.

### DOSIFICACION

La dosificación es el proceso de pesar o medir volumétricamente e introducir al mezclador los ingredientes para una mezcla de concreto. Para producir concretos de calidad uniforme, los ingredientes deberán medirse con precisión en cada mezcla. La mayoría de especificaciones requiere que la dosificación se efectúe por peso en vez de hacerlo por volumen debido a las imprecisiones al medir por volumen al agregado (especialmente la arena húmeda). El empleo de un sistema de dosificación por peso suministra una mayor exactitud y simplicidad y evita el problema creado por el abundamiento de las arenas húmedas. El agua y los aditivos líquidos se pueden medir correctamente ya sea por volumen o por peso. La dosificación volumétrica se usa para concretos mezclados en una mezcladora continúa y para ciertas obras en lugares donde no se cuente con instalaciones para pesaje.\*

Las especificaciones generalmente exigen que los materiales se midan en revolturas individuales con los siguientes porcentajes de precisión: cemento 1%, agregados 2%, agua 1%, aditivos 3%.

El equipo deberá ser capaz de medir las cantidades dentro de estas tolerancias para la mezcla pequeña regularmente empleada así como para las mezclas de mayor cantidad (Fig. 8-1). Periódicamente se deberá revisar la exactitud del equipo de dosificación, mismo que deberá ser ajustado cuando sea necesario.

Los aditivos inclusores de aire, el cloruro de calcio, así como otros aditivos químicos deberán ir cargados en la mezcla como soluciones y la cantidad de líquido deberá ser considerada parte del agua de mezclado. Los aditivos que no puedan ser agregados en solución podrán ser pesados o medidos por volumen, según las instrucciones del fabricante. Los surtidores de aditivo se deberán revisar diariamente, pues los errores al dosificar los aditivos, particularmente las sobredosificaciones, pueden llegar a provocar problemas



Figura 8-1. Tablero de control para el equipo de dosificación por peso en una planta típica de concreto premezclado.

muy serios en el concreto, ya sea en estado fresco o en estado endurecido.

### MEZCLADO DEL CONCRETO

Todo concreto se debe mezclar completamente hasta que sea uniforme en apariencia, con todos sus ingredientes distribuidos equitativamente. Los mezcladores no deben ser cargados por encima de sus capacidades evaluadas y deberán ser operados aproximadamente a la misma velocidad para la cual fueron diseñados. Se podrá aumentar la salida con el uso de un mezclador mayor o con mezcladores adicionales en lugar de acelerar o sobrecargar el equipo con que se cuente. Si las aspas del mezclador se han desgastado o se han recubierto de concreto endurecido, la acción de mezclado

\* En la Referencia 8-2 se describe el procedimiento.

será menos eficiente. Se deben reemplazar las espas muy desgastadas y el concreto endurecido deberá ser removido periódicamente, de preferencia después de cada día de producción de concreto.

Si el concreto ha sido mezclado adecuadamente, las muestras que se tomen de distintas porciones de una mezcla tendrán los mismos pesos volumétricos, contenidos de aire, revenimientos, y contenidos de agregado grueso. Las máximas diferencias permisibles en resultados de pruebas dentro de una mezcla de concreto premezclado están en la norma ASTM C 94.

Los concretos ligeros estructurales se pueden mezclar de la misma manera que los concretos de peso normal, cuando los agregados tengan menos de 10% de absorción total en peso o cuando la absorción en peso sea menor de 2% durante la primera hora después de ser sumergidos en agua.\*

## Mezclado estacionario

En ocasiones el concreto se mezcla en el lugar de la obra en un mezclador estacionario o una mezcladora pavimentadora (Fig. 8-2). Dentro de los mezcladores estacionarios se incluyen los mezcladores en el lugar y los mezcladores centrales de las plantas de concreto premezclado. Se encuentran disponibles en tamaños desde 56 litros hasta 9.2 m<sup>3</sup> y pueden ser del tipo basculante o fijo o del tipo de paleta o de aspa rotatoria con abertura superior. Todos los tipos pueden estar equipados con botes (skips) de carga y algunos están equipados con un canalón oscilante de descarga. Muchos mezcladores estacionarios cuentan con dispositivos para medir el tiempo, algunos de los cuales pueden ser regulados para un cierto tiempo de mezclado y asegurados

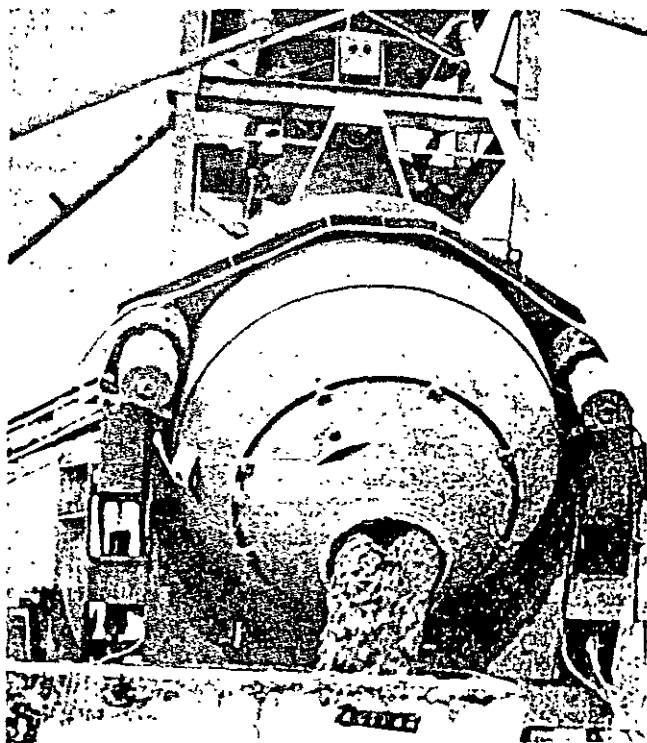


Figura 8-2. El concreto se puede mezclar en el sitio de la obra con un mezclador estacionario.

para que la mezcla no se pueda descargar sino hasta que haya transcurrido el tiempo designado.

Las especificaciones comúnmente requieren de un minuto como tiempo de mezclado mínimo para mezcladores estacionarios de hasta 765 litros de capacidad con un aumento de 15 segundos por cada 765 litros de capacidad, adicionales, o fracción de esta cantidad. Las especificaciones para carreteras normalmente permiten un período de mezclado más corto para las pavimentadoras o para los mezcladores centrales.

El período de mezclado debe medirse desde el momento en que todo el cemento y agregado se encuentren en el tambor mezclador, a condición que toda el agua se agregue antes que transcurra un cuarto del tiempo de mezclado. Algunas especificaciones, incluyendo la ASTM C 94, permiten que se reduzca el tiempo de mezclado si se demuestra por medio de pruebas de desempeño del mezclador que el concreto es adecuadamente uniforme al ser descargado.

Bajo condiciones normales, hasta aproximadamente un 10% del agua de mezclado se debe colocar en el tambor antes que se agreguen los materiales sólidos. Entonces el agua se debe vaciar uniformemente con los materiales sólidos, dejando aproximadamente un 10% para agregarla después que todos los demás materiales se encuentren dentro del tambor. Cuando se use agua caliente en climas fríos, puede ser necesario modificar este orden de carga para evitar algún posible endurecimiento acelerado. En este caso, la adición del cemento deberá retrasarse hasta que la mayoría de los agregados y del agua se hayan entremezclado en el tambor. Cuando se cargue directamente el mezclador desde los dosificadores, los materiales deberán agregarse simultáneamente a velocidades tales que el tiempo de carga sea aproximadamente el mismo para todos los materiales.

Si se utilizan aditivos retardantes o reductores de agua deberán agregarse en la misma secuencia en el ciclo de carga. De otra manera podrían presentarse variaciones de importancia en el tiempo de fraguado inicial y en el porcentaje de aire incluido. La adición del aditivo deberá completarse dentro del primer minuto después que se haya completado la adición del agua al cemento o con anterioridad al inicio de los últimos tres cuartos del ciclo de mezclado, cualquiera que ocurra primero. Si en la misma mezcla de concreto se usan dos o más aditivos, deberán ser agregados por separado para evitar cualquier posible interacción que interfiera con la eficiencia de cualquiera de los aditivos y afecte de manera adversa al concreto.

## Concreto premezclado

El concreto premezclado se dosifica y se mezcla fuera del sitio del proyecto y se entrega en el área de construcción en estado fresco y sin endurecer. Se puede manufacturar por cualquiera de los métodos siguientes:

1. El concreto de mezclado central se mezcla completamente en un mezclador estacionario (Fig. 8-3) y se entrega ya sea con un camión agitador, con un camión mezclador operando a velocidad de agitación, o con un camión especial no agitador.

\* Para los agregados que no satisfacen estos límites, en la Referencia 8- describen los procedimientos de mezclado.





Figura 8-3. Mezclado central en mezcladores estacionarios del tipo de tambor basculante.

2. El concreto de mezcla iniciada en planta fija y terminada en tránsito se mezcla parcialmente en un mezclador estacionario y se acaba de mezclar en un camión mezclador.
3. El concreto mezclado-en-camión se mezcla totalmente en el camión mezclador (Fig. 8-4).

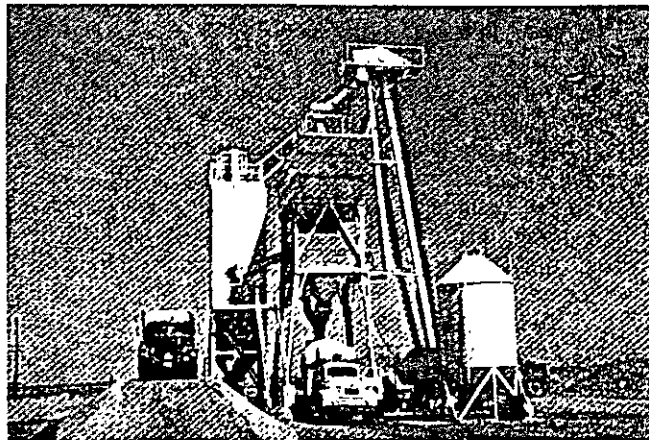


Figura 8-4. El concreto mezclado-en-camión se mezcla totalmente en el camión mezclador, el cual normalmente puede contener de 5.5 a 7.5 m<sup>3</sup> de concreto.

La norma ASTM C 94 señala que cuando se utiliza un camión mezclador para llevar a cabo todo el mezclado, normalmente se requieren de 70 a 100 revoluciones del tambor o de las aspas a la velocidad de rotación designada por el fabricante como velocidad de mezclado para producir la uniformidad especificada en el concreto. No se debe recurrir a más de 100 revoluciones a la velocidad de mezclado. Todas las revoluciones después de la número 100 deberán ser a la velocidad de rotación designada por el fabricante como velocidad de agitación. La velocidad de agitación normalmente es de aproximadamente 2 a 6 rpm., y la velocidad de mezclado generalmente es de aproximadamente 6 a 18 rpm. El mezclado a altas velocidades durante periodos prolongados, de aproximadamente una o mas horas, puede producir pérdidas de resistencia en el concreto, aumentos de

temperatura, pérdidas excesivas de aire incluido, y pérdidas aceleradas de revenimiento.

La norma ASTM C 94 también exige que el concreto sea entregado y descargado en el transcurso de 1 1/2 horas o antes de que el tambor haya girado 300 veces después de introducir el agua al cemento y a los agregados o de introducir el cemento a los agregados. Siempre se deberán operar los mezcladores y agitadores dentro de los límites de volumen y de velocidad de rotación designados por el fabricante del equipo.

### Concreto mezclado en dosificadora móvil (Mezclador continuo)

Los mezcladores dosificadores móviles son camiones especiales (Fig. 8-5) que dosifican por volumen y mezclan continuamente el concreto a medida que los materiales secos, agua, y aditivos se van alimentando de manera continua dentro del mezclador. El concreto deberá satisfacer las especificaciones de la norma ASTM C 685 y se dosifica y mezcla en la obra conforme se va necesitando. La mezcla de concreto también se ajusta fácilmente para las condiciones de colocación del proyecto y para las condiciones climatológicas.

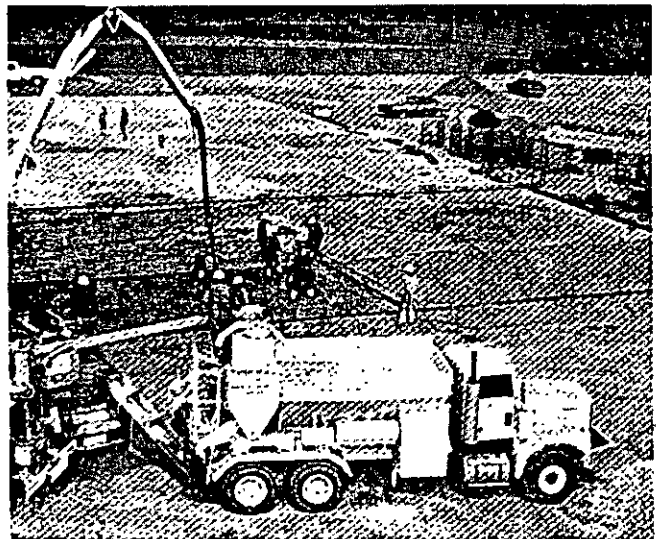


Figura 8-5. La dosificadora móvil mide los materiales por volumen y mezcla continuamente el concreto conforme se van alimentando los ingredientes secos, el agua y los aditivos dentro del mezclador.

### Mezcladores de alta energía

Los mezcladores de alta energía, a diferencia de los mezcladores de concreto convencionales, primero mezclan el cemento y el agua para formar una lechada por medio de aspas rotatorias de alta velocidad. En seguida se agrega la lechada a los agregados y se mezclan con un equipo convencional para producir una mezcla de concreto uniforme. El mezclado de alta energía provoca que el agua se integre completamente con las partículas de cemento, dando como resultado una hidratación mas completa. Con esto se logra un uso mas

eficiente del cemento, mayores resistencias, y mejoras en algunas otras propiedades del concreto en comparación con las obtenidas por el sólo mezclado convencional. Los mezcladores de alta energía se usaron inicialmente en la producción de concreto premezclado en los Estados Unidos de Norteamérica en 1987.

## Remezclado de concreto

El concreto fresco que se deja agitar en el tambor mezclador tiende a rigidizarse antes que se desarrolle el fraguado inicial. Tal concreto se puede usar si al remezclarlo se vuelve lo suficientemente plástico para ser compactado en las cimbras. Bajo una supervisión cuidadosa, se puede agregar una pequeña cantidad de agua siempre y cuando se cumpla con las especificaciones siguientes: (1) no se exceda la relación agua-cemento máxima permisible; (2) no se rebase el revenimiento máximo permisible; (3) no se sobrepase el tiempo máximo permisible de mezclado y de agitación (o revoluciones del tambor); y (4) se remezcle el concreto por al menos la mitad del tiempo de mezclado mínimo requerido o número de revoluciones.

No se debe permitir la adición indiscriminada de agua para hacer más fluido al concreto porque esto disminuye su calidad. Se puede esperar que el concreto remezclado endurezca rápidamente. Eventualmente se podría desarrollar una junta fría al colocar concreto de manera adyacente o por encima del concreto remezclado.

## TRANSPORTE Y MANEJO DEL CONCRETO

Aunque no existe una forma perfecta para transportar y manejar al concreto, una planeación anticipada puede ayudar en la elección del método más adecuado evitando así la ocurrencia de problemas. La planeación deberá tener en consideración tres eventos que, en caso que sucedan durante el manejo y la colocación, podrían afectar seriamente la calidad del trabajo terminado:

1. **Retrasos.** El objetivo que se persigue al planear cualquier calendario de trabajo, es producir el trabajo con la mayor rapidez contando con la mejor fuerza laboral y con el equipo adecuado para realizarlo. Las máquinas para transportar y para manejar al concreto se han ido modernizando continuamente. Se logrará una productividad máxima si se planea el trabajo para aprovechar al máximo al personal y al equipo y si se elige el equipo de manera que se reduzca el tiempo de retraso durante la colocación del concreto.

2. **Endurecimiento temprano y secado.** El concreto comienza a endurecer en el momento en que se mezclan el cemento con el agua, pero el grado de endurecimiento que ocurre durante los primeros 30 minutos normalmente no presenta problemas; por lo general, el concreto que se haya mantenido en agitación se puede colocar y compactar dentro de la primera hora y media posterior al mezclado. La planeación deberá eliminar o minimizar cualquier variable que permita que el concreto endurezca hasta el grado en que no se pueda lograr una completa consolidación y se dificulte efectuar el acabado. Se dispone de menos tiempo cuando existen condiciones que aceleran el proceso de endurecimien-

to, como ocurre en los climas cálidos y secos; con el uso de aditivos acelerantes; y con el uso de concreto calentado.

3. **Segregación.** La segregación es la tendencia que presenta el agregado grueso a separarse del mortero cemento-arena. Esto tiene como consecuencia que parte de la mezcla tenga una cantidad demasiado pequeña de agregado grueso y que el resto tenga agregado grueso en cantidades excesivas. Probablemente la primera parte se contraerá más y se agrietará y tendrá una baja resistencia a la abrasión. La segunda será demasiado áspera para lograr una consolidación y acabado totales y será causa frecuente de apanalamientos. Los métodos y equipos que lleguen a usarse para transportar y manejar concreto no deberán ser causa de segregación.

## Equipo para transporte y manejo del concreto

La Tabla 8-1 resume los métodos y equipos más comunes para mover el concreto hasta el punto donde se requiera.

En los últimos 50 años han habido pocos cambios importantes, si acaso, en los principios para transportar al concreto. Lo que ha cambiado es la tecnología que ha llevado al desarrollo de una mejor maquinaria para ejecutar el trabajo con mayor eficiencia. La carretilla y el carretón Georgia, aunque aún se emplean, han evolucionado para llegar a la carretilla motorizada (Fig. 8-6); la tolva arrastrada por una rueda de polea se ha convertido en cucharón y grúa (Fig. 8-7); y el vagón tirado por caballos ahora es el camión de concreto premezclado (Figs. 8-8 y 8-9).

Hace años el concreto se colocaba en los edificios de concreto reforzado por medio de una torre y largos canalones. Era una torre contraventeada colocada en el centro del sitio con un embudo en su parte superior al cual se llevaba el concreto mediante un malacate. Una serie de canalones suspendidos desde la torre permitían que el concreto fluyera



Figura 8-6. La versátil carretilla motorizada puede mover todo tipo de concreto a lo largo de distancias cortas.

**Tabla 8-1. Métodos y equipo para transportar y manejar concreto.**

Equipo	Tipo y rango de trabajo para el cual el equipo es más adecuado	Ventajas	Puntos a vigilar
Bandas transportadoras	Para transportar horizontalmente concreto o a un nivel mayor o menor. Normalmente se emplean entre un punto de descarga principal y un punto de descarga secundario.	Las bandas transportadoras tienen alcance ajustable, desviador viajero, y velocidad variable ya sea hacia adelante o en reversa. Pueden colocar grandes volúmenes de concreto de manera rápida cuando el acceso está limitado.	Se requieren arreglos en el extremo de descarga para evitar segregación, y no dejar mortero sobre la banda de regreso. En climas adversos (cálido o expuesto al viento) los tendidos de bandas largas necesitan ser cubiertos.
Bandas transportadoras montadas sobre camiones mezcladores	Para transportar concreto a un nivel inferior, al mismo nivel o a un nivel más elevado	El equipo de transporte llega junto con el concreto. Se cuenta con alcance ajustable y con velocidad variable.	Se requieren arreglos en el extremo de la descarga a fin de evitar segregación, y para no dejar mortero en la banda de retorno.
Cucharones	Empleados junto con grúas, cablevías, y helicópteros para la construcción de edificios y de presas. Transportan concreto directamente desde el punto central de descarga hasta la cimbra o a un punto de descarga secundario.	Permiten explotar totalmente la versatilidad de grúas, cablevías y helicópteros. Tienen una descarga limpia. Amplio rango de capacidades.	Seleccionar la capacidad del cucharón para que concuerde con el tamaño de la mezcla de concreto y con la capacidad de equipo de colocación. La descarga deberá ser controlable.
Canalones	Para transportar concreto a niveles inferiores, normalmente a niveles bajo el terreno, en todos los tipos de construcción de concreto.	Bajo costo y facilidad de maniobra. No se necesita fuerza motriz, pues la gravedad efectúa la mayor parte del trabajo.	Las pendientes deben variar entre 1 a 2 y 1 a 3 y los canalones deberán estar soportados adecuadamente en todas las posiciones. Efectúe arreglos en el extremo de descarga (en la bajada) para evitar segregación en el concreto
Grúas	La herramienta adecuada para trabajar sobre el nivel del terreno.	Puede manejar concreto, acero de refuerzo, cimbras, y muchos artículos diversos en edificios elevados, a base de marcos de concreto.	Solamente cuenta con un gancho. Se necesita una programación cuidadosa de las operaciones para mantenerla ocupada
Canalones de desnivel	Utilizados para colar concreto en cimbras verticales de todo tipo. Algunos canalones son de una pieza, otros se arman con segmentos sueltos conectados entre sí.	Los canalones de desnivel dirigen al concreto dentro de la cimbra y lo conducen hasta el fondo sin segregarse. Su uso evita el derrame de lechada y de cemento en los lados de las cimbras, lo cual resulta ser dañino cuando se especifican superficies aparentes. También evitan la segregación de las partículas gruesas.	Los canalones de desnivel deben contar con aberturas abocinadas suficientemente grandes en las que el concreto se pueda descargar sin ser derramado. La sección transversal del canalón de desnivel deberá ser escogida cuidadosamente para que se pueda insertar dentro de la cimbra sin que interfiera con el acero de refuerzo.
Mezcladoras de dosificación móviles	Empleadas para la producción intermitente de concreto en obra.	Un sistema combinado de transporte, dosificación y mezclador móvil para efectuar el proporcionamiento del concreto especificado de manera precisa y rápida. Su operación se lleva a cabo con un hombre.	Para tener una operación libre de problemas se necesita un buen programa de mantenimiento preventivo en el equipo. Los materiales deberán ser idénticos a los empleados en el diseño original de la mezcla.
Camiones no agitadores	Empleados para transportar concreto en trayectos cortos y en caminos en buen estado	El costo del equipo no agitador es inferior al de los camiones agitadores o mezcladores	Se deberá limitar el revenimiento del concreto. Posibilidad de segregación. Se necesita una altura libre para levantar la caja del camión para la descarga.
Pistolas neumáticas (concreto lanzado)	Empleadas en lugares difíciles de colar y donde se necesitan secciones delgadas y áreas extensas	Ideales para colar el concreto en formas libres de cimbras, para reparar y reforzar edificios, para recubrimientos protectores y para cubiertas delgadas.	La calidad del trabajo depende de la habilidad de quienes hagan uso del equipo. Solo se deberán emplear operarios experimentados en boquillas.
Bombas	Empleadas para transportar directamente concreto desde el punto central de descarga hasta la cimbra o hasta el punto de descarga secundario	Las tuberías ocupan poco espacio y se pueden tender fácilmente. Entregan concreto en un flujo continuo. Las bombas pueden mover al concreto ya sea de manera vertical u horizontal. Se pueden remitir bombas móviles cuando sean necesarias para proyectos grandes o pequeños. Las plumas de bombas estacionarias suministran concreto de manera continua para la construcción de edificios de gran altura.	Se requiere un suministro constante de concreto fresco con una consistencia promedio y sin ninguna tendencia a segregarse. Se debe tener cuidado al operar la línea de bombeo para asegurar un flujo uniforme y limpiarla una vez que se haya terminado la operación de colado. El bombeo vertical, con curvaturas y a través de mangueras flexibles reducirá considerablemente la distancia máxima de bombeo.

**Tabla 8-1. Métodos y equipo para transportar y manejar concreto. (Continuación)**

Equipo	Tipo y rango de trabajo para el cual el equipo es más adecuado	Ventajas	Puntos a vigilar
Extendedores de tornillos	Usados para extender concreto en áreas planas, como en los pavimentos.	Con un extendedor de tornillos se puede tener rápidamente una mezcla de concreto descargada de un cucharón o un camión sobre un área grande con un espesor uniforme. El concreto tendido tiene buena uniformidad de compactación antes de que se use vibración para la compactación final.	Los extendedores de tornillos se utilizan comúnmente como parte de un tren de pavimentación. Se les deberá emplear para extender concreto antes de aplicar el vibrado.
Tubo embudo (Tubo tremie)	Para colocar concreto bajo el agua.	Se pueden usar para verter el concreto por medio de un embudo a través del agua dentro de la cimentación u otra parte de la estructura por colar.	Se necesitan precauciones para asegurarse que el extremo de descarga del tubo siempre se encuentre enterrado en concreto fresco, de modo que se tenga un sello entre el agua y la masa de concreto. A menos que se cuente con presión, el diámetro deberá ser de 25 a 30 cm. La mezcla de concreto requiere de una mayor cantidad de cemento, de 390 a 450 kg por metro cúbico, y un revenimiento mayor, de 15 a 22.5 cm, pues el concreto deberá fluir y consolidarse sin ninguna vibración.
Camiones agitadores	Empleados para transportar concreto para todo uso en pavimentos, estructuras y edificios. Las distancias de acarreo deben permitir la descarga del concreto dentro de la primera hora y media, aunque ese límite se puede ignorar bajo ciertas circunstancias.	No se necesitan plantas de mezclado central, solamente una planta dosificadora, porque el concreto se mezcla completamente en el camión mezclador. La descarga es igual que en los camiones agitadores.	El tiempo de entrega deberá adecuarse a la organización del trabajo. El personal y el equipo para el colado deberán estar listos en el sitio para manejar el concreto. El control de la calidad del concreto no es tan bueno como con el mezclado central.
Carretillas manuales y motorizadas	Para acarreos planos y cortos en todos los tipos de construcción de concreto, en especial donde el acceso al área de trabajo esté restringido.	Muy versátiles e ideales por lo tanto en interiores y en sitios donde las condiciones de colado se encuentren cambiando constantemente.	Lentas y de trabajo intenso.

por gravedad directamente al punto requerido. Conforme los edificios a base de marcos de concreto fueron haciéndose mas altos, la necesidad de levantar tanto el refuerzo y la cimbra como el concreto a niveles superiores condujo al desarrollo de la torre grúa - escena familiar en el horizonte de construcción en la actualidad (Fig. 8-10). Es rápida y versátil, aunque al planear cualquier trabajo se debe tener en cuenta el hecho de que solamente posee un gancho.

A pesar de ser vieja en concepto, la banda transportadora ha cambiado poco con el paso de los años (Fig. 8-11). Las bandas transportadoras montadas sobre camiones mezcladores (Fig. 8-12) han entrado en uso recientemente. El proceso neumático para el concreto lanzado fue patentado en 1911 y ha permanecido literalmente sin cambio (consulte el Capítulo 15). La primera bomba mecánica para concreto fue desarrollada y empleada en la década de los treinta y la bomba hidráulica fue desarrollada en los cincuenta. La avanzada bomba móvil con pluma colocadora hidráulica (Fig. 8-13) ha sido probablemente la innovación sencilla mas importante en lo que se refiere al equipo para el manejo de concreto. Es económica tanto en colados grandes como en colados pequeños, según sean las condiciones de la obra. Los extendedores de tornillos (Fig. 8-14) han resultado muy efec-

tivos para colar y distribuir concreto para los pavimentos. Los extendedores de tornillos pueden colocar un espesor uniforme de concreto de manera rápida y eficiente.\*

### Elección del mejor método

La primera cuestión por analizar es el tipo de trabajo: su tamaño físico, la cantidad total de concreto por colar, y el programa a cumplir. El estudio de los detalles de la obra determina además la cantidad de trabajo que queda debajo del nivel del terreno, por encima de éste o en el nivel del terreno. Esto ayuda a escoger el equipo de manejo de concreto necesario para colar el concreto en los niveles que se requieran.

Se debe mover el concreto desde el mezclador hasta el sitio a colar lo más rápidamente posible sin segregación o pérdida de ingredientes. El equipo de transporte y de manejo deberá

\* La Referencia 8-8 presenta una amplia información acerca de los métodos para el transporte y el manejo del concreto.

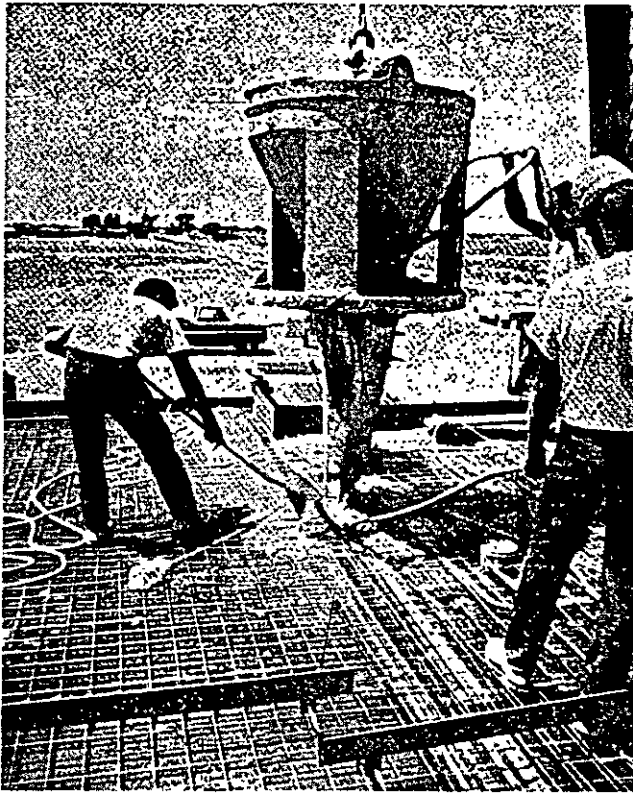


Figura 8-7. El concreto se puede elevar fácilmente hasta su sitio final por medio del cucharón y la grúa. Los tamaños de cucharón varían desde 400 litros hasta 9 m<sup>3</sup>.



Figura 8-9. En comparación con los camiones convencionales de descarga trasera, los camiones mezcladores de descarga frontal le proporcionan al conductor una mayor movilidad y control en la descarga directa del concreto en las cimbras.



Figura 8-8. Por medio de la descarga directa desde el canalón del camión mezclador, frecuentemente se puede colocar en su sitio final al concreto premezclado.

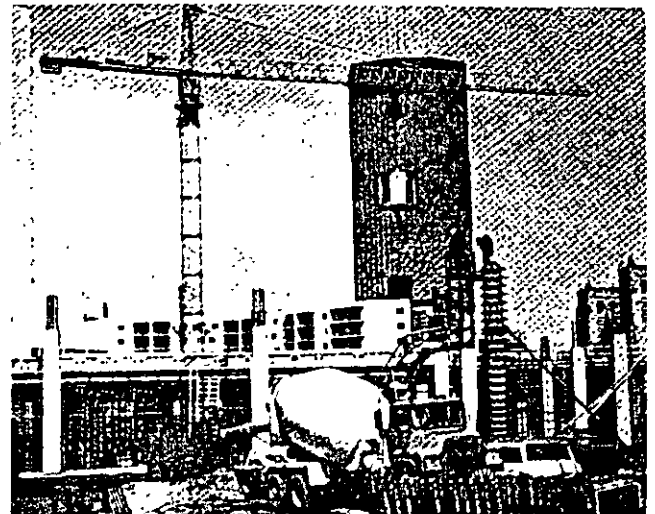
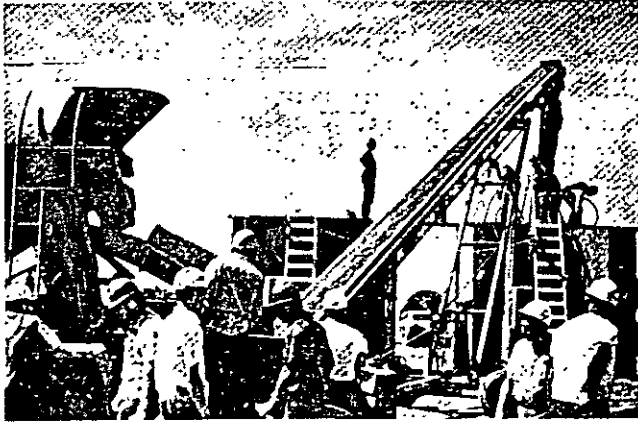


Figura 8-10. Para la construcción de edificios de altura la torre grúa y el cucharón pueden manejar fácilmente al concreto desde el camión mezclador.

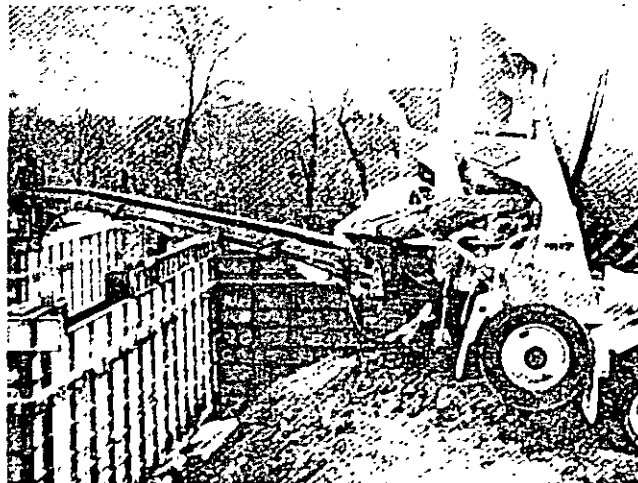


**Figura 8-11.** La banda transportadora es un método portátil y eficiente para manejar al concreto. Un canalón de descarga evita que el concreto se segregue al abandonar la banda; las paletas evitan la pérdida de mortero. Las bandas transportadoras se pueden operar en serie y montadas sobre plumas telescópicas de grúas hidráulicas.

tener la capacidad necesaria para mover el concreto en cantidades suficientes a fin de eliminar las juntas frías.

### Trabajo a nivel del terreno y por debajo del mismo

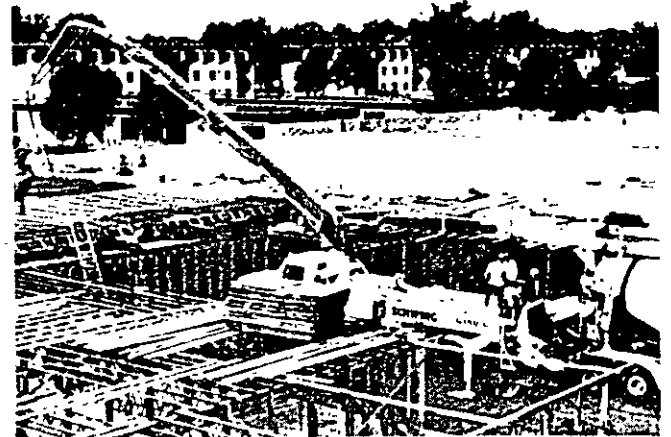
En cualquier obra normalmente se encuentran los mayores volúmenes de concreto por debajo o a nivel del terreno y por consiguiente pueden ser colados por medio de métodos distintos a los empleados para la superestructura. El trabajo con el concreto por debajo del nivel del terreno puede variar enormemente - desde el colado de pilas perforadas de gran diámetro o de losas masivas de cimentación hasta el intrincado trabajo que se involucra en los muros de cimentación. Se puede usar una grúa para manejar la cimbra, el acero de refuerzo, y el concreto. Sin embargo, la grúa puede ser empleada totalmente para levantar la cimbra y el acero de



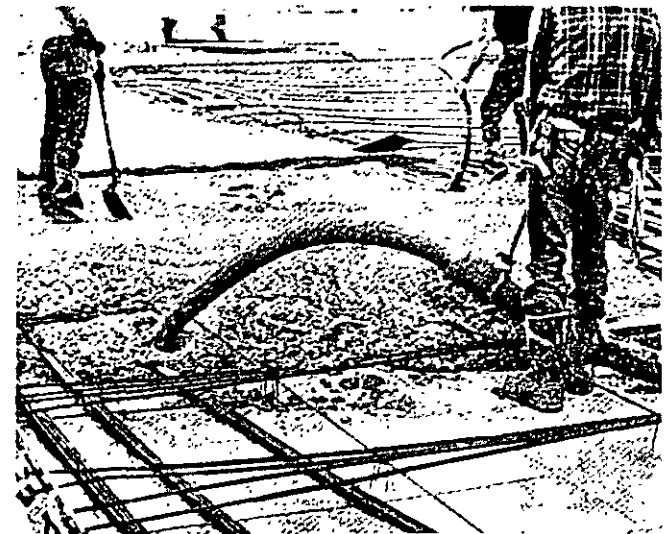
**Figura 8-12.** Una banda transportadora montada en un camión mezclador coloca al concreto hasta aproximadamente 12 m sin necesidad de equipo adicional de manejo.

refuerzo antes del concreto, y para el manejo del concreto tal vez se tengan que usar otros métodos para colar el mayor volumen en la menor cantidad de tiempo.

Posiblemente se pueda conducir el concreto por medio de canalones directamente desde el camión hasta el punto en que se necesite. Los canalones deben ser metálicos o recubiertos de metal. No deben tener una pendiente mayor de 1 vertical a 2 horizontal, ni menor de 1 vertical a 3 horizontal. Los canalones de gran longitud, mayores de 6 metros, o aquellos que no satisfacen las condiciones de pendiente deberán descargar en una tolva antes de distribuir el concreto al punto en que se necesite.



**Figura 8-13(a).** Una bomba y pluma montadas en un camión pueden mover convenientemente al concreto de manera vertical u horizontal hasta el sitio deseado.



**Figura 8-13(b).** Vista de una manguera flexible descargando concreto conectada a la tubería rígida que deriva de la bomba. La tubería rígida se emplea para la conducción de concreto bombeado en las plumas y sin necesidad de estructuras especiales a través de distancias relativamente largas. Hasta 7.5 m de manguera flexible se conectan para aumentar la movilidad durante el colado.





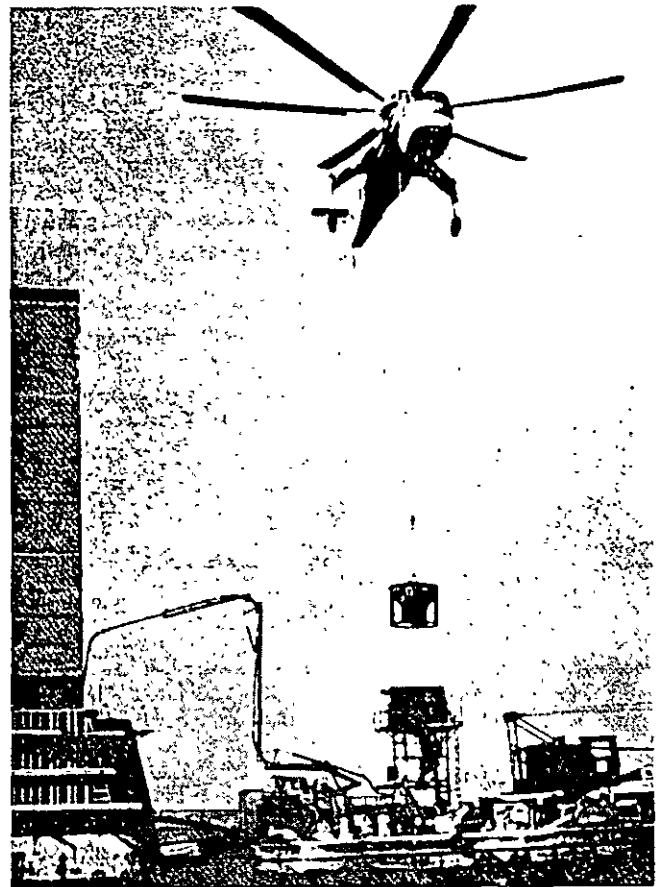
**Figura 8-14.** El extendedor de tornillos tiende rápidamente al concreto en un área amplia con un espesor uniforme. Los extendedores de tornillos se emplean principalmente en la construcción de pavimentos.

Como alternativa, una bomba de concreto puede mover al concreto hasta su posición final (Fig. 8-13). Las bombas deben ser de capacidad adecuada y capaces de mover al concreto sin producir segregación. La pérdida de revenimiento desde la tolva de la bomba hasta la descarga al final de la tubería deberá ser mínima - no mayor de 5 cm. Por lo general, el contenido de aire no deberá reducirse en más de 2 puntos porcentuales. Las tuberías no deberán ser de aluminio ni de aleaciones de aluminio para evitar una inclusión excesiva de aire por la reacción del aluminio con los hidróxidos de los álcalis del cemento que provocan una seria reducción de la resistencia del concreto.

Las bandas transportadoras son muy útiles en los trabajos cerca del nivel del terreno. Como la colocación del concreto bajo el nivel del terreno frecuentemente es un asunto de movimiento horizontal auxiliado por la gravedad, se pueden usar transportadores portátiles ligeros para lograr capacidades altas a un costo relativamente bajo.

### Trabajo por encima del nivel del terreno

En los trabajos por encima del nivel del terreno, el concreto se puede elevar por medio de bandas transportadoras, cucharones y grúas, malacates, bombas, o con el mas reciente gancho aéreo, el helicóptero (Fig. 8-15). La torre grúa (Fig. 8-10) y la pluma de bombeo (Fig. 8-16) son las herramientas adecuadas para los edificios elevados; se puede disponer de grúas de alta velocidad que operan a 245 metros por minuto o mas. Se puede reducir el tiempo del ciclo de la grúa utilizando un malacate de concreto para la elevación y la grúa para la distribución lateral. En el uso de las bombas influye el volumen de concreto que se necesite



**Figura 8-15.** Para trabajos sobre el terreno o en lugares inaccesibles, se puede levantar un cucharón para concreto por helicóptero.



**Figura 8-16.** Una pluma de bomba montada sobre un mástil y ubicada cerca del centro de la estructura puede alcanzar frecuentemente todos los puntos de colado. Se aplica especialmente en los edificios altos donde las torres grúa no pueden ocuparse en la colocación del concreto. El concreto se suministra a la pluma a través de una tubería proveniente de una bomba ubicada a nivel del terreno. Con estos métodos de bombeo se puede bombear verticalmente al concreto cientos de metros.

en cada nivel; los volúmenes grandes minimizan los movimientos de la tubería con relación a su capacidad.

Continuamente se van mejorando las especificaciones y el comportamiento del equipo de transporte y de manejo. Se obtendrán los mejores resultados y los menores costos si el trabajo se planea para sacar el máximo del equipo y si el equipo se emplea de manera flexible para reducir el costo total del trabajo. Cualquier método resultará costoso si no conduce a la terminación del trabajo.\*

## REFERENCIAS

- 8-1. *Structural Lightweight Concrete*, IS032T, Portland Cement Association, 1972, revised 1986.
- 8-2. *Concrete for Small Jobs*, IS174T, Portland Cement Association, 1980.
- 8-3. *Placing Concrete by Pumping Methods*, ACI 304.2R71, revised 1982, ACI Committee 304 Report, American Concrete Institute, Detroit.
- 8-4. *Placing Concrete with Belt Conveyors*, ACI 304.4R-75, revised 1985, ACI Committee 304 Report, American Concrete Institute.
- 8-5. *Specification for Structural Concrete for Buildings*, ACI 301-84, revised 1985, ACI Committee 301 Report, American Concrete Institute.
- 8-6. *Guide for Measuring, Mixing, Transporting and Placing Concrete*, ACI 304R-85, ACI Committee 304 Report, American Concrete Institute, 1985.
- 8-7. Haney, James T., and Meyers, Rodney A., *Ready Mixed Concrete—Plant and Truck Mixer Operations and Quality Control*, NRMCA Publication No. 172, National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, May 1985.
- 8-8. Panarese, William C., *Transporting and Handling Concrete* IS178T, Portland Cement Association, 1974, revised 1987.

---

\* La Referencia 8-8 es muy útil para ayudar a decidir sobre el método que se puede emplear, pues proporciona información sobre capacidades y alcances de varios métodos y equipos.



## CAPITULO 9

# Colado y Acabado del Concreto

### PREPARACION ANTERIOR AL COLADO

La preparación previa al colado del concreto incluye diversas actividades, como la compactación, la formación de guarniciones, y el humedecimiento de la subrasante; el montaje de las cimbras; y la fijación segura en el concreto del acero de refuerzo y de los demás accesorios que vayan a quedar insertos. El humedecimiento de la subrasante es muy importante, especialmente en los climas cálidos y secos para que la subrasante seca no absorba demasiada agua del concreto y también para incrementar el nivel de humedad del aire logrando con eso disminuir la evaporación de la superficie del concreto.

En los climas fríos la subrasante no debe estar congelada. La nieve, el hielo, y otros desechos se deberán retirar del interior de las cimbras antes de realizar el colado del concreto. Cuando se vaya a depositar concreto sobre roca o sobre concreto endurecido, se deberá retirar todo el material suelto, y las caras de corte deberán ser casi verticales u horizontales en vez de inclinadas.

El concreto recién colado usualmente se pica poco después de haber endurecido para producir una mejor liga con el siguiente colado. Mientras no exista lechada, polvo o partículas sueltas, el concreto nuevo ya endurecido necesita poca preparación antes de colar concreto fresco sobre él. El concreto viejo normalmente requiere de limpieza mecánica y de picado antes de colar encima algún concreto nuevo. En las secciones tituladas "Colado sobre concreto endurecido" y "Juntas de construcción" se expone con mayor detalle el tema del colado de concreto fresco sobre concreto endurecido.

Las cimbras deberán quedar fijadas de manera exacta, limpias, firmes, adecuadamente apuntaladas, y/o construídas forradas con materiales que brinden el acabado deseado al concreto endurecido cuando vayan a ser retiradas.\* Las cimbras de madera, a menos que hayan sido aceitadas o tratadas con algún agente que permita su remoción, deberán humedecerse antes del colado del concreto, ya que de otra manera absorberían agua del concreto y se hincharían. Las cimbras deberán estar hechas para que al ser removidas,

causen un daño mínimo al concreto. Se deberá evitar el uso de demasiados clavos, o de clavos muy largos para facilitar la remoción y reducir los daños. En los concretos arquitectónicos, el agente que se utilice para remover la cimbra deberá ser un material que no produzca manchas.

El acero de refuerzo deberá estar limpio y libre de herrumbre o de costras de laminado al colar el concreto. Asimismo, el mortero que salpica en el acero de refuerzo de los colados previos no necesita ser removido del acero ni de otros artículos insertos si la siguiente entrega se va a completar en unas cuantas horas; sin embargo, el mortero seco y suelto deberá ser removido de los elementos que vayan a quedar insertos en las entregas de concreto posteriores.

Todo el equipo que se utilice para colar concreto deberá estar limpio y en buenas condiciones para trabajar, también se deberá contar con equipo de reserva para utilizarlo en caso de que ocurra alguna falla.

### FORMA DE DEPOSITAR AL CONCRETO

El concreto deberá depositarse sin interrupciones lo más cerca posible de su posición final (Fig. 9-1). En la construcción de losas, el colado deberá comenzar a lo largo del perímetro en un extremo del trabajo descargando cada



Figura 9-1. El concreto se deberá ir colocando lo más cerca posible de su posición final.

\* Consulte las Referencias 9-9 y 9-26 para mayor información referente a las cimbras.

mezcla contra el concreto previamente colado. No se deberá voltear el concreto en pilas separadas para luego nivelarlo y trabajarlo simultáneamente; tampoco deberá colocarse en pilas corridas para moverlo horizontalmente a su posición final. Tales prácticas constructivas producen segregación porque el mortero tiende a fluir antes que el material más grueso.

En general, el concreto deberá colarse en capas horizontales de espesor uniforme, consolidando adecuadamente cada capa antes de colar la siguiente. La velocidad de colocación deberá ser lo suficientemente rápida para que la capa de concreto no haya fraguado cuando se le coloque encima la nueva capa. Esto evitará recorridos de filtración, fisuras, y planos de debilidad (juntas frías) que se producen cuando el concreto fresco se cuela sobre el concreto endurecido; las capas deberán ser de 15 a 50 cm de espesor para los elementos reforzados y de 38 a 50 cm de espesor para trabajos masivos; el espesor dependerá del ancho entre las cimbras y también de la cantidad de refuerzo.

A fin de evitar su segregación, el concreto no deberá moverse horizontalmente a través de una distancia demasiado larga mientras se esté colando en cimbras o en losas. En ciertos trabajos, como en los colados de concreto en muros guardatierra inclinados o debajo de las aberturas en los muros, será necesario mover al concreto horizontalmente dentro de las cimbras, aunque esta distancia horizontal se deberá mantener dentro de un valor mínimo.

En muros, cadenas, y trabes, las primeras cargas de cada entrega se deberán colar en los extremos, con los colados subsecuentes avanzando hacia el centro; en todos los casos, se deberá impedir que el agua se almacene en los extremos, en las esquinas, y a lo largo de las caras de las cimbras.

El agua tiende a recolectarse en un área sumamente vulnerable al intemperismo en los muros guardatierras inclinados, como lo es el área comprendida a lo largo de la superficie superior con pendiente. Para controlar esto, los tableros de las cimbras superiores de la cara del lado de la pendiente se podrán omitir al principio y el concreto se colará directamente en esta sección del muro. Los tableros se podrán colocar, si llegarán a ser necesarios, a medida que el colado vaya avanzando.

Los canalones evitarán la segregación y el salpicamiento de mortero sobre el refuerzo y las cimbras; tal vez los canalones no sean necesarios si el colado se completa antes de que el mortero se seque. La altura de caída libre del concreto no necesita ser fijada hasta un cierto límite a no ser que ocurra una separación de partículas gruesas, produciendo apanalamientos, en cuyo caso probablemente será adecuado marcar un límite de 0.90 a 1.20 m. Se ha permitido la caída libre de concretos diseñados adecuadamente hasta de varias decenas de metros dentro de cajones. Los resultados de una prueba de campo para determinar si el concreto se puede dejar caer verticalmente 15 metros en un cajón sin que se presenten segregaciones demostraron que no había una diferencia significativa en cuanto a las granulometrías del agregado entre muestras de control tal como se entregan y las muestras de la caída libre tomadas del fondo del cajón.\*

\* Referencia 9-4

A veces se cuela concreto a través de aberturas, denominadas ventanas, a los lados de cimbras altas y estrechas. Cuando un canalón descarga directamente a través de la abertura, existe el peligro de que se presente segregación. Se deberá usar un embudo recolector afuera de la abertura para permitir el flujo más suave del concreto a través de la abertura, disminuyendo la tendencia a segregarse.

Cuando el concreto se va a colar en cimbras altas a una velocidad relativamente rápida, se puede llegar a recolectar cierta agua de sangrado en la superficie superior, especialmente si el concreto no contiene aire incluido. El sangrado se puede reducir haciendo un colado más lento y empleando un concreto con una consistencia más seca. Cuando sea práctico, el concreto se deberá colar en un nivel de aproximadamente 30 cm debajo de la parte superior de las cimbras altas, y se deberá dejar pasar aproximadamente una hora para que el concreto fragüe parcialmente. El colado deberá recomenzar antes de que la superficie endurezca para evitar la formación de una junta fría. Es buen hábito sobrellenar la cimbra unos 2 ó 3 cm y retirar el exceso de concreto luego que ha endurecido y que el sangrado ha cesado.

Para evitar agrietamientos se deberá permitir que el concreto en columnas y muros permanezca dos horas como mínimo, y de preferencia toda la noche, antes de continuar con el colado de cualquier losa, cerramiento, o trabe que los enmarque. Las ménsulas y los capiteles de las columnas se consideran parte del piso, o de la losa de techo y deberán colarse íntegramente con las losas.

## CONSOLIDACION DEL CONCRETO

La consolidación es el proceso que consiste en compactar el concreto fresco para amoldarlo dentro de las cimbras y alrededor de los artículos insertos y del refuerzo a fin de eliminar los depósitos de piedras, los apanalamientos y las cavidades de aire atrapado (Figura 9-2). En los concretos con aire incluido, la consolidación no deberá retirar cantidades importantes de aire intencionalmente incluido; pues la

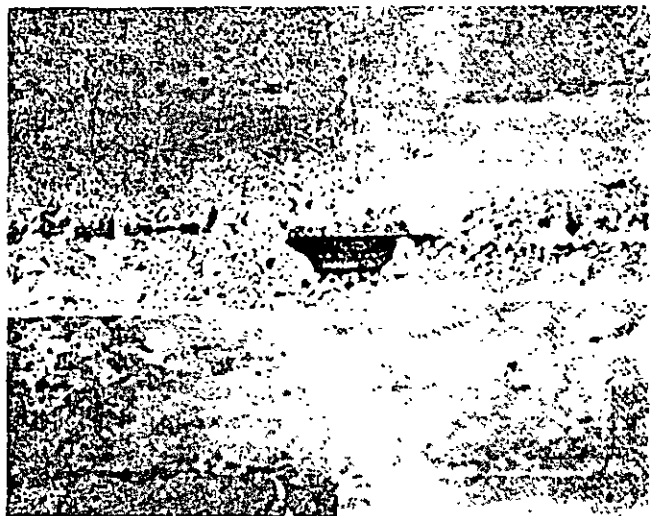


Figura 9-2. Los apanalamientos y los depósitos de piedras son el resultado de una consolidación adecuada.

consolidación se obtiene por medio de métodos manuales o mecánicos. El método elegido dependerá de la consistencia de la mezcla y de las condiciones de colado, como lo son la complejidad de la cimbra y la cantidad y el espaciamiento del refuerzo.

Las mezclas fluidas y trabajables se pueden consolidar por varillado manual, es decir, introduciendo repetidamente una varilla pisonadora u otra herramienta adecuada dentro del concreto. La varilla deberá ser lo suficientemente larga para llegar hasta el fondo de la cimbra y lo suficientemente delgada para pasar entre el acero de refuerzo y la cimbra. Los concretos de bajo revenimiento se pueden transformar en concretos más fluidos que faciliten su consolidación con el uso de aditivos superplastificantes (Capítulo 6) sin que se tenga que agregar agua a la mezcla de concreto.

Para mejorar la apariencia de las superficies cimbradas, se puede usar la consolidación con azadón. Una herramienta plana, similar a un azadón se inserta repetidamente y se retira dejándolo junto a la cimbra. Esto aleja de las cimbras a los agregados gruesos de mayor tamaño y ayuda a que el aire atrapado se desplace hacia la superficie superior para que pueda escapar. Una mezcla que se pueda consolidar adecuadamente con herramientas manuales no deberá consolidarse por métodos mecánicos porque existiría la tendencia a segregarse bajo una acción mecánica intensa.

Una consolidación mecánica apropiada posibilita la colocación de mezclas rígidas con relaciones agua-cemento bajas y con contenidos elevados de agregado grueso, características que normalmente se asocian con concretos de

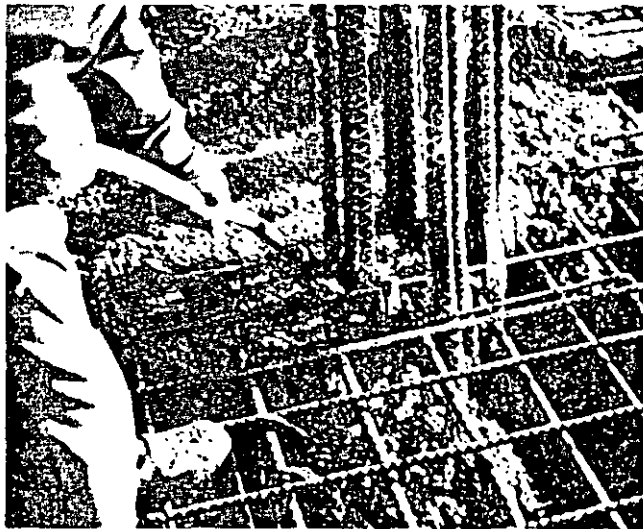


Figura 9-3. Un vibrado adecuado posibilita el colado del concreto aún en los elementos de concreto densamente reforzados.

alta calidad, incluso en los elementos altamente reforzados (Figura 9-3). Algunos de los métodos mecánicos son la centrifugación, usada para consolidar concretos de revenimiento moderado a alto que se emplean para fabricar tubos, postes y pilotes; las mesas de golpeo o de caída, empleadas para compactar concretos muy rígidos de bajo revenimiento utilizados en la manufactura de unidades

precoladas arquitectónicas; y por último la vibración interna o externa.

## Vibración

La vibración, ya sea interna o externa, es el método comúnmente más usado para consolidar concreto. Al vibrar al concreto, la fricción interna entre las partículas de agregado se destruye temporalmente y el concreto se comporta como un líquido; se asienta en las cimbras por acción de la gravedad y los vacíos grandes de aire atrapado suben más fácilmente a la superficie. La fricción interna se restablece en el momento en que la vibración se detiene.

Los vibradores, ya se trate de vibradores externos o internos, se caracterizan normalmente por la frecuencia de vibración, expresada como el número de vibraciones por minuto, vpm, y por la amplitud de la vibración, que es la desviación en centímetros desde el punto de apoyo.



Figura 9-4. Los vibradores internos se utilizan comúnmente para consolidar al concreto en muros, columnas, vigas y losas.

Siempre que se consolide el concreto por vibración, se deberá contar con un vibrador de repuesto para usarlo en caso de que se presente alguna falla mecánica.

**Vibración interna.** Los vibradores internos o de inmersión, llamados a menudo vibradores machos (Figura 9-4), se utilizan normalmente para consolidar concreto en muros, columnas, vigas y losas. Los vibradores de flecha flexible consisten de una cabeza vibratoria conectada a un motor por medio de una flecha flexible. Dentro de la cabeza se encuentra un peso desbalanceado conectado a la flecha, el cual gira a alta velocidad, provocando que la cabeza gire en una órbita circular. El motor puede ser accionado con electricidad, gasolina o aire. Las cabezas vibratorias normalmente son cilíndricas y sus diámetros pueden variar de 2 a 18 cm. Algunos vibradores tienen un motor eléctrico construido

dentro de la cabeza, mismo que en general tiene 5 cm de diámetro. El comportamiento del vibrador se ve afectado por las dimensiones de la cabeza del vibrador así como por su frecuencia y amplitud.

Los vibradores de diámetro pequeño tienen frecuencias elevadas, variando de 10,000 a 15,000 vpm, y amplitudes bajas, que varían entre 0.38 y 0.76 mm. A medida que el diámetro del vibrador aumenta, la frecuencia disminuye y la amplitud aumenta. El radio de acción efectivo del vibrador aumenta conforme aumenta el diámetro. Los vibradores con diámetros de 2 a 4 cm tienen un radio de acción en el concreto fresco que varía entre 7.5 y 15 cm, mientras que los radios de acción de los vibradores con diámetros de 5 a 9 cm varían entre 18 y 36 cm.

Para obtener los mejores resultados, es importante darle un uso adecuado a los vibradores. Los vibradores no se deben utilizar para mover horizontalmente al concreto, ya que esto provoca segregación. Siempre que sea posible, el vibrador se deberá introducir verticalmente en el concreto a intervalos regulares y se le permitirá descender por gravedad. Deberá penetrar rápidamente hasta el fondo de la capa que se esté colando y por lo menos 15 cm dentro de cualquier capa colocada previamente. Cada capa o colada deberá ser de aproximadamente la misma longitud de la cabeza del vibrador o en cimbras comunes normalmente de 30 cm como máximo.

En las losas delgadas, el vibrador se deberá insertar con un cierto ángulo casi horizontalmente de modo que se mantenga completamente sumergida la cabeza del vibrador. En las losas sobre suelos, el vibrador no deberá entrar en contacto con la subrasante. La distancia entre inserciones deberá ser de aproximadamente 1 1/2 veces el radio de acción de manera que el área afectada visiblemente por el vibrador traslape con el área adyacente previamente vibrada varios centímetros.

El vibrador deberá mantenerse estacionario hasta lograr una consolidación adecuada y luego se deberá retirar lentamente. Un tiempo de inserción de 5 a 15 segundos proveerá normalmente de una consolidación adecuada. El concreto se deberá mover para rellenar los huecos dejados al retirar el vibrador. Si un agujero no se ha rellenado, el problema se resolverá reinsertando el vibrador en algún punto cercano.

La adecuación de la vibración interna se juzga por la experiencia y por los cambios en la apariencia de la superficie del concreto. Los cambios a cuidar son la inserción de partículas grandes de agregado, la nivelación de la superficie del concreto, la aparición de una película delgada de pasta brillante alrededor de la cabeza del vibrador, y que cese el escape de burbujas grandes de aire atrapado en la superficie.

El permitir que un vibrador permanezca sumergido luego de que se acumule pasta en la cabeza es una práctica poco recomendada y puede acarrear falta de uniformidad. El período en que se deberá dejar al vibrador dentro del concreto dependerá del revenimiento del concreto, de la potencia del vibrador, y de la naturaleza de la sección por compactar.

La revibración de concretos previamente compactados se puede efectuar de manera intencional o también puede ocurrir sin darse cuenta cuando la capa inferior haya endurecido parcialmente. La revibración se utiliza para mejorar la adherencia entre el concreto y el acero de refuerzo, para liberar el agua atrapada debajo de barras horizontales de refuerzo, y para remover vacíos adicionales de aire atrapado. Por lo

general, si el concreto se vuelve trabajable durante el revibrado, este no es perjudicial y puede resultar benéfico.

**Vibración externa.** Los vibradores externos pueden ser para cimbra, mesas vibratorias, o vibradores de superficie como lo son las plantillas vibratorias, las placas vibratorias, las plantillas de rodillos vibratorias, o las llanas manuales vibratorias. Los vibradores para cimbra, diseñados para quedar asegurados en la parte exterior de las cimbras, son útiles especialmente para: (1) consolidar el concreto en elementos que sean muy delgados o que estén muy congestionados de refuerzo, (2) complementar la vibración interna, y (3) mezclas rígidas en las que no se puedan usar vibradores internos.

Por lo general no se recomienda fijar directamente a la cimbra un vibrador para cimbra. Es mejor fijar el vibrador a una placa de metal la cual a su vez quede fijada a vigas I de metal o a canales que pasen a través de los atiesadores de la cimbra en tramos continuos. Las fijaciones que queden sueltas producirán pérdidas importantes de energía de vibración y en consecuencia, consolidaciones inadecuadas.

Los vibradores para cimbra pueden ser operados eléctrica o neumáticamente. Deberán estar espaciados de manera que distribuyan uniformemente la intensidad de vibrado en toda la cimbra; el espaciamiento óptimo se obtiene por experimentación. En ocasiones puede ser necesario operar algunos vibradores para cimbra a diferentes frecuencias para lograr mejores resultados; por lo tanto, se recomienda que los vibradores para cimbra estén equipados con controles que regulen su amplitud y frecuencia. La duración de la vibración externa es considerablemente mayor que para la vibración interna, por lo general, entre uno y dos minutos.

Los vibradores para cimbra no deberán aplicarse en los 5 cm superiores de las cimbras verticales. La vibración en la parte superior de las cimbras, particularmente si la cimbra es delgada o si ha quedado atiesada de manera inadecuada, producirá un movimiento hacia adentro y hacia afuera que puede crear un vacío entre el concreto y la cimbra. Para esta parte de las cimbras verticales se recomienda el uso de vibradores internos.

En las secciones densamente reforzadas donde no se pueda insertar un vibrador interno, a veces es útil vibrar las varillas de refuerzo fijando un vibrador para cimbra a las partes expuestas de las varillas. Esta práctica elimina el aire y el agua atrapados bajo las barras de refuerzo y mejora la adherencia entre las varillas y el concreto que las rodea, siempre y cuando el concreto se mantenga aún trabajable bajo la acción del vibrado. Los vibradores internos no se deberán fijar a las varillas de refuerzo para lograr el mismo propósito porque los vibradores se pueden dañar. Las mesas vibratorias se emplean en las plantas de elementos precolados. Deberán estar equipadas con controles tales que permitan variar la frecuencia y la amplitud de acuerdo con el tamaño del elemento a colar y con la consistencia del concreto. Las mezclas trabajables generalmente requieren de mayores frecuencias que las mezclas rígidas. La consolidación mejorará si se va aumentando la frecuencia y se va disminuyendo la amplitud conforme el vibrado vaya progresando.

Los vibradores de superficie tales como las plantillas vibratorias (Figura 9-5) se emplean para consolidar al concreto en los pisos y en otros trabajos en plano. Las plantillas vibratorias proporcionan un control efectivo a las operaciones de nivelación y ahorran una gran cantidad de trabajo;

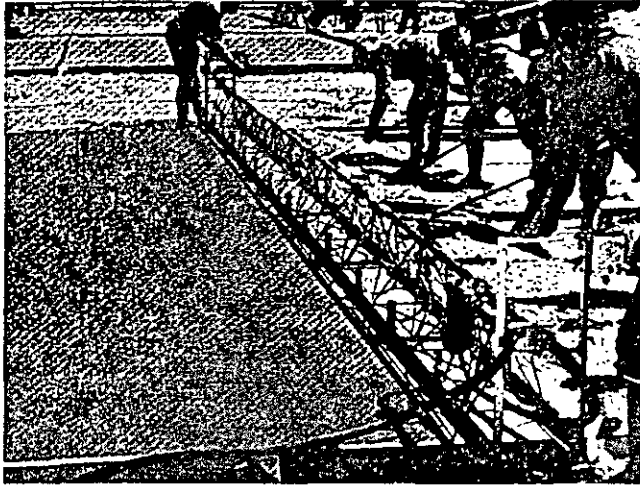


Figura 9-5. Las plantillas vibratorias tales como esta unidad de armadura reducen el trabajo de nivelación al mismo tiempo que consolidan al concreto.

embargo, este equipo no se debe usar para concretos con revenimientos mayores de 7.5 cm. La vibración superficial de tales concretos tendrá como resultado la acumulación excesiva de mortero y de material fino en la superficie, y con ello se reducirá la resistencia al desgaste. Por la misma razón, los vibradores de superficie no se deberán operar después de que el concreto haya sido consolidado adecuadamente. Los pisos, las calzadas, y las banquetas se cuelean a menudo con concretos de 7.5 a 12.5 cm de revenimiento, consistencia en la cual las operaciones normales de acabado proporcionan una consolidación adecuada. Cuando se requieren superficies más durables, resistentes a la abrasión, se emplean mezclas más ásperas que necesitan ser vibradas.

Como la vibración superficial de las losas de concreto es menos efectiva a lo largo de sus bordes, se podrá usar un vibrador de inmersión a lo largo de tales bordes inmediatamente antes de que la plantilla vibratoria entre en operación.

Las plantillas vibratorias se utilizan para consolidar losas hasta de 25 cm de espesor, siempre y cuando esas losas no estén reforzadas o sólo tengan refuerzo muy sencillo (malla de alambre soldado). Para las losas reforzadas se recomienda el vibrado interno o una combinación de vibrado interno con vibrado superficial.

## LOSAS DE CONCRETO

A las losas de concreto se les puede dar acabado de distintas maneras, dependiendo del uso que vayan a brindar.\* Se pueden solicitar diferentes colores y texturas, con agregado expuesto o con alguna superficie estampada según un cierto patrón. Para tener un perfil y una elevación apropiados, algunas superficies pueden requerir solamente nivelación y enrasado, mientras que para otras superficies se pueden llegar a especificar acabados de emparejado, alisado o escobillado.

Se debe coordinar cuidadosamente el mezclado, el transporte y el manejo del concreto para las losas junto con las operaciones de acabado. El concreto no se debe colocar sobre la subrasante o dentro de las cimbras a una velocidad

mayor de la que pueda ser extendido, nivelado, consolidado, y aplanado. En efecto, el concreto no deberá tenderse en un área demasiado grande antes de ser nivelado, ni deberá nivelarse un área extensa y permitirse que se acumule el agua de sangrado antes de aplanarlo.

Las cuadrillas de acabado deberán ser lo suficientemente grandes para colar, darle acabado, y curar correctamente las losas de concreto, con las debidas consideraciones a los efectos de la temperatura del concreto y a las condiciones atmosféricas en cuanto al tiempo de fraguado del concreto y al tamaño del colado por completar.

## Preparación de la subrasante

Las grietas, los asentamientos de las losas, e incluso la falla estructural a menudo se pueden ir rastreando hasta descubrir una subrasante preparada de manera inadecuada y pobremente compactada. La subrasante sobre la cual se vaya a colar una losa deberá estar bien drenada, con una capacidad de soporte uniforme, a nivel o con una pendiente apropiada, y libre de césped, materia orgánica y hielo. Las tres principales causas de soportes no uniformes son: (1) la presencia de puntos suaves y duros, (2) el relleno sin la compactación adecuada, y (3) los suelos expansivos. El soporte uniforme no se puede lograr con el puro volteo de material granular sobre un área suave. Para evitar los agrietamientos por falta de soporte y por asentamiento, las áreas suaves o con turba y los puntos duros (rocas) deberán ser excavados y rellenos con un suelo similar al resto de la subrasante o con material granular tal como la arena, la grava, o la piedra triturada, si no se llegara a conseguir el suelo. Todos los materiales de relleno deberán compactarse para suministrar uniformemente el mismo soporte que el resto de la subrasante.

Durante la preparación de la subrasante se deberá recordar que un suelo sin alterarse generalmente es superior que el material compactado para soportar losas de concreto. Los suelos expansivos, compresibles y potencialmente problemáticos deberán ser evaluados por un ingeniero geotécnico; también podría requerirse un diseño especial de las losas.

Se deberá humedecer la subrasante con agua antes del colado del concreto, pero no deberá tener charcos o sitios húmedos, suaves y fangosos cuando se cuele el concreto.

## Sub-base

Una losa sobre el piso satisfactoria puede ser construída sin una sub-base, no obstante, la sub-base se coloca frecuentemente sobre la subrasante como capa niveladora para igualar las pequeñas irregularidades superficiales, para mejorar la uniformidad de soporte, para llevar la ubicación al nivel deseado, y para servir como freno capilar entre la losa y la subrasante.

Cuando se emplee una sub-base, el contratista deberá colocar y compactar a casi la densidad máxima una capa de 10 cm de espesor de material granular como la arena, la grava, la piedra triturada o la escoria. Si se requiere de una sub-base

\* Se proporcionan detalles en las Referencias 9-10, 9-14, 9-22 y 9-32.

o de una subrasante de mayor espesor para alcanzar el nivel deseado, se deberá compactar el material en capas de 10 cm de profundidad. Las subrasantes y las sub-bases se podrán compactar con vibradores portátiles pequeños, rodillos, y pisonos de mano. A no ser que la sub-base quede bien compactada, es mejor dejar la subrasante sin cubrir y sin alterar.

## Barreras de vapor y prevención de problemas de humedad

Muchos de los problemas de humedad asociados con las losas sobre el terreno o pisos en espacios cerrados, se pueden minimizar o eliminar de varias maneras (1) alejando de los edificios la pendiente del paisaje que le rodea, (2) utilizando una sub-base granular de 10 cm para formar un freno capilar entre el suelo y la losa, (3) proporcionando un drenaje adecuado a la sub-base granular para evitar que el agua se acumule bajo la losa, (4) instalando desagües interiores de tubos de arcilla cocida en la cimentación, (5) instalando una barrera de vapor, que consiste, a menudo, de una lámina de polietileno.

Se deberá colocar una barrera de vapor debajo de todos los pisos de concreto sobre el terreno que aparentemente vaya a recibir un acabado de piso impermeable o que vaya a ser usados para cualquier proyecto en que resulte indeseable el paso del vapor de agua a través del piso.

Un concreto de buena calidad, bien consolidado con al menos 10 cm de espesor es prácticamente impermeable al paso de agua en estado líquido a menos que el agua se encuentre bajo una presión considerable; sin embargo, tal concreto - aún los concretos con varias veces ese espesor - no es impermeable al paso del vapor de agua.

El vapor de agua que pasa a través de las losas de concreto se evapora en la superficie si no está sellada. Las cubiertas de los pisos, como el linóleo, las losetas de vinil, las alfombras, la madera, y las superficies sintéticas sellan la humedad dentro de la losa de manera efectiva, pudiéndose eventualmente aflojar o encorvar la cubierta del piso o también formarse burbujas en la cubierta del mismo.

Además, para prevenir problemas con los materiales de cubierta de piso causados por la humedad del mismo concreto, las siguientes medidas deberán ser adoptadas: (1) utilizar un concreto con una relación agua-cemento baja, (2) aplicar un curado húmedo a la losa que dure de 5 a 7 días, (3) permitir a la losa un período de secado de 2 meses como mínimo, y (4) probar la condición de humedad de la losa antes de instalar la cubierta del piso. En una prueba comúnmente utilizada, se pega en el piso con cinta una hoja cuadrada de polietileno de 1.20 m de lado; Si después de 24 horas o antes de que el material del piso o su adhesivo cure, no se acumula la humedad en la parte inferior de la hoja de plástico, la losa se considerará lo suficientemente seca para colocar el material de piso. Los fabricantes de materiales para pisos a menudo recomiendan aplicar alguna prueba antes de instalar su producto.\*

A veces se instala un aislante sobre la barrera de vapor para ayudar a mantener la temperatura de un piso de concreto por encima del punto de condensación; esto ayuda a evitar que la humedad en el aire se condense en la superficie de la losa. Esta práctica también crea un piso cálido para obtener un cierto confort térmico. Los reglamentos y especificaciones

exigen a menudo que se aisle el perímetro de una losa de piso. Usualmente no se puede justificar la colocación de aislantes bajo toda la losa sobre el terreno teniendo como único fin la conservación de energía.

Las barreras de vapor colocadas directamente bajo concreto pueden aumentar el tiempo de retraso antes de aplicar el acabado final debido a la lenta evaporación del agua, particularmente en los climas fríos. También pueden aumentar las combaduras o alabeos y agravar el desarrollo de agrietamientos por contracción en la superficie de la losa. Con la finalidad de minimizar estos efectos, se puede colocar una capa de arena de 7.5 cm sobre la barrera de vapor, o sobre el aislamiento si existe,\*\* Si el concreto se coloca directamente sobre alguna barrera de vapor, la relación agua-cemento deberá ser baja, es decir, menor o igual a 0.45.

## Cimbras

Las cimbras de los bordes o franjas laterales y las maestras intermedias deberán fijarse firmemente y con exactitud a la elevación y perfil especificados para la superficie acabada. Las cimbras para losas comúnmente son de metal o de madera apuntaladas firmemente con estacas de madera o de metal para que conserven su alineamiento vertical y horizontal. Las cimbras deberán estar derechas y no tener combaduras y tener además la suficiente resistencia para soportar la presión del concreto sin pandearse. También deberán ser lo suficientemente fuertes para sostener cualquier equipo mecánico de colocación y de acabado que se llegue a emplear.

## Colado y tendido

El colado deberá comenzar en el punto más lejano e ir avanzando hacia la fuente de suministro del concreto; este deberá vaciarse lo más cerca posible de su posición final, rebasar ligeramente las cimbras y ser nivelado de manera aproximada con palas cuadradas o con rastrillos para concreto. Los vacíos grandes de aire atrapados en el concreto durante la colocación deberán removerse por medio de la consolidación.

## Nivelación (Enrasado)

La nivelación o enrasado es el proceso que consiste en retirar el exceso de concreto de la superficie superior de una losa para dejarla en el nivel apropiado. La plantilla que se utiliza en el método manual es una regla que puede tener el borde inferior recto o ligeramente curvo, dependiendo de los requisitos que deba satisfacer la superficie. Se deberá mover sobre el concreto con un movimiento de vaivén o de aserrado avanzando una pequeña distancia en cada movimiento. Deberá existir un exceso o sobrecarga de concreto contra la cara frontal de la regla para ir rellenando las partes bajas a medida que la regla pase sobre la losa. Una losa de 15 cm necesita una sobrecarga de

\* En la Referencia 9-29 se discuten ensayos adicionales de humedad.  
\*\* Referencia 9-14, páginas 10-11.

aproximadamente 2.5 cm. Algunas veces las reglas están equipadas con vibradores que consolidan el concreto y ayudan a reducir el trabajo de enrasado, esas combinaciones se denominan plantillas vibratorias (Figura 9-5). Se presenta una exposición sobre las plantillas vibratorias en la sección de "Consolidación del concreto". La nivelación y la consolidación deberán haber sido terminadas antes de que el agua de sangrado se acumule sobre la superficie.

## Aplanado

Inmediatamente después del enrasado se deberá usar una alizadora con el propósito de eliminar los puntos altos o bajos de las losas e incrustar las partículas grandes de agregado. La alizadora de mango largo (Figura 9-6) se utiliza en áreas demasiado extensas que no se

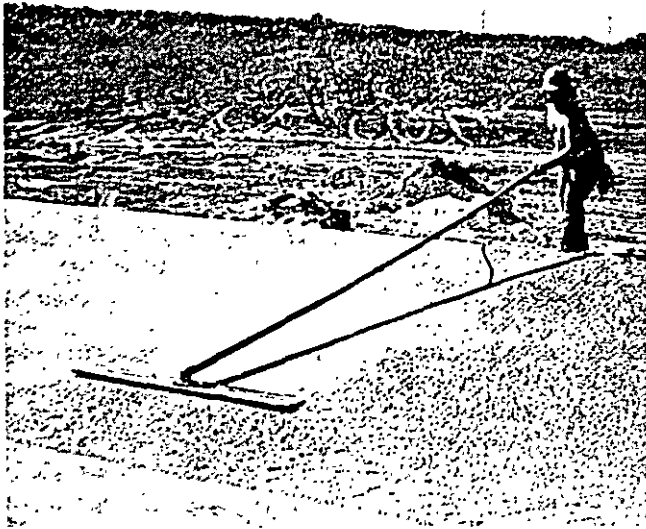


Figura 9-6. El aplanado debe completarse antes de que se acumule sobre la superficie cualquier cantidad de agua de sangrado.

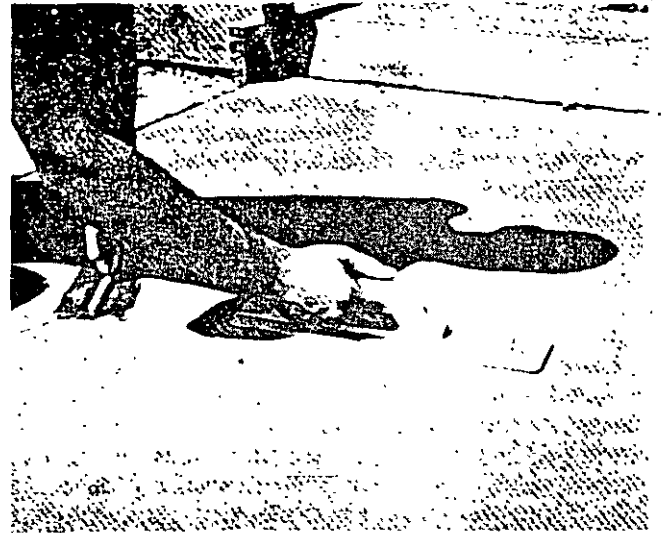
pueda tener acceso con alguna alizadora de mango corto. Para los concretos sin aire incluido estas herramientas deberán ser preferentemente de madera; para concretos con aire incluido deberán ser de aluminio o de aleación de magnesio.

El aplanado se deberá completar antes de que el agua de sangrado se acumule sobre la superficie; también se deberá tener la precaución de no sobretrabajar al concreto porque con eso se obtendría una superficie menos durable.

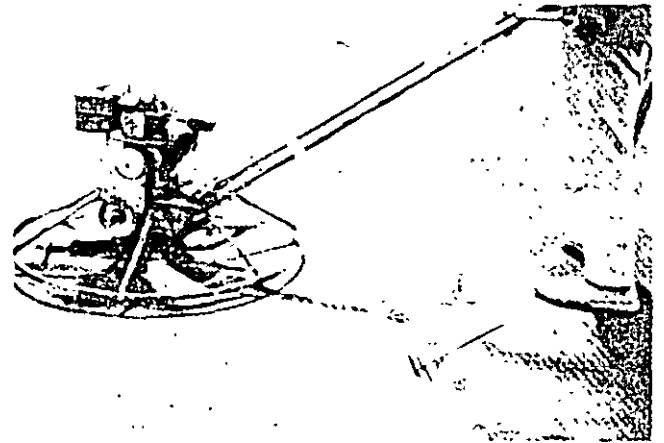
Las operaciones precedentes deberán nivelar, amoldar y alisar la superficie, también pueden llegar a consumir una pequeña cantidad de pasta de cemento. Aunque a veces no se necesita un acabado posterior, en la mayoría de las losas el aplanado se complementa con alguna de las siguientes operaciones de acabado: bordeado, junteado, emparejado, alisado y escobillado. Se necesita contar con un ligero endurecimiento en el concreto antes de poder iniciar cualquiera de estas operaciones. Cuando el brillo del agua de sangrado haya desaparecido y el concreto sostenga la presión provocada por los pies de una persona hundiéndose solamente

medio centímetro, se considerará que la superficie está lista para proseguir las operaciones de acabado (Figura 9-7).

*Precaución:* Una de las principales causas de la existencia de defectos en la superficie de las losas de concreto, se debe a la aplicación del acabado mientras existe agua de sangrado en la superficie; ya que cualquier operación de acabado realizada en la superficie de cualquier losa de concreto mientras esté presente el agua de sangrado causará graves agrietamientos, levantamientos de polvos, y descascamientos (Consulte el Capítulo 5). Emparejar y alisar el concreto temas se describen a continuación, antes de que el proceso de sangrado se haya completado podría también atrapar



a. Emparejado de la superficie con una llana de mano manteniéndola horizontalmente sobre la superficie de concreto y desplazándola formando un arco con ligeros movimientos de vaivén.



b. Emparejado mecánico. Las huellas indican que es el momento adecuado.

Figura 9-7. Cuando el agua de sangrado se haya evaporado y el concreto soporte la presión del pie de una persona con un leve hundimiento, entonces la superficie estará lista para practicarle el emparejado y las operaciones finales de acabado.

al agua de sangrado bajo la superficie terminada produciéndose zonas debilitadas o vacíos, que ocasionalmente acabarán en forma de desprendimientos de láminas. El



uso de concretos con aire incluido y bajos revenimientos, con un contenido de cemento adecuado y con una granulometría correcta de su agregado fino minimizará el sangrado y contribuirá a asegurar la construcción de losas libres de mantenimiento.\*

## Bordeado y junteado

El bordeado se debe efectuar a lo largo de todos los bordes de las cimbras y de las juntas de aislamiento y construcción en los pisos y en las losas exteriores, como lo son las losas de banquetas, calzadas y patios. El bordeado densifica y compacta al concreto cercano a la cimbra; en esos lugares el alisado y el emparejado son menos efectivos, por lo que con el bordeado se proporciona una mayor durabilidad y una menor vulnerabilidad al descascaramiento y a la fragmentación.

En la operación de bordeado, el concreto se debe quitar de las cimbras hasta una profundidad de 2.5 cm haciendo uso de una cuchara de albañilería puntiaguda. Después se deberá mantener un rebordeador casi plano sobre la superficie y correrse con el frente ligeramente levantado para evitar que el mismo rebordeador deje una impresión demasiado profunda, se puede necesitar bordear después de cada operación de acabado subsecuente.

Las prácticas adecuadas de junteado pueden eliminar agrietamientos aleatorios de mal aspecto. Las juntas de contracción se hacen con un ranurador manual o insertando dentro del concreto aún sin endurecer tiras de plástico, madera, metal, o algún material preformado para juntas. Cuando se utilizan métodos manuales para formar juntas de control, la losa deberá juntarse durante la operación de bordeado o justo después de ella. Las juntas de contracción también se pueden hacer en el concreto endurecido utilizando una sierra. El junteado se examina más adelante bajo el encabezado de "Elaboración de juntas en pisos y muros".

## Emparejado

Luego de haber sido bordeado y junteado manualmente, el concreto se podrá emparejar con una llana de madera o de metal o con una máquina para acabado que esté equipada con cuchillas de emparejar (Figura 9-7).

El propósito del emparejado se debe a tres razones: 1) para insertar las partículas del agregado justo debajo de la superficie; 2) para eliminar pequeñas imperfecciones, salientes y vacíos; y 3) para compactar el mortero en la superficie como preparación de otras operaciones adicionales de acabado. No se deberá trabajar en exceso al concreto, porque con eso se acarrearía un exceso de agua y de material fino a la superficie, produciendo defectos posteriores en la superficie.

Las llanas de mano normalmente son de madera o de metal. Las llanas de metal abrevian el trabajo porque el rastreado se reduce y la llana se puede deslizar más fácilmente sobre la superficie de concreto. Para emparejar manualmente concretos con aire incluido es esencial contar con una llana de aluminio o de magnesio porque una llana de madera tiende

a adherirse a la superficie y a rasgarla. Las llanas de metal ligero también conforman superficies más lisas que las llanas de madera.

La llana de mano deberá mantenerse plana sobre la superficie de concreto y se moverá con un ligero movimiento de vaivén en un arco tendido para rellenar vacíos, abatir protuberancias, y alisar abultamientos. Cuando se practique el acabado en áreas extensas, se pueden emplear llanas mecánicas para reducir el tiempo de acabado.

El emparejado produce una textura relativamente pareja aunque no lisa, que posee una buena resistencia contra resbalones y patinamientos y por eso se usa a menudo como acabado final, especialmente en las losas exteriores. Cuando el acabado final que se desee obtener sea un acabado como éste, puede llegar a hacerse necesario emparejar una segunda vez la superficie después de que haya endurecido parcialmente.

Las marcas dejadas por los rebordeadores y ranuradores manuales comúnmente se eliminan durante el emparejado, a menos que se desee que su permanencia con propósitos decorativos, en cuyo caso deberán volverse a usar estas herramientas luego del emparejado final.

## Alisado

Cuando se desea obtener una superficie densa, dura y lisa, al emparejado deberá proseguir el alisado metálico. El alisado no se deberá ejecutar en una superficie que no haya sido emparejada previamente: alisar después de sólo haber aplanado no es un procedimiento adecuado de acabado.

Al darle acabado a las losas grandes a mano, se acostumbra emparejar y alisar inmediatamente una zona antes de mover las tablas donde se hinca el trabajador. Estas operaciones deben retrasar hasta después de que el concreto haya endurecido lo suficiente de tal suerte que el agua y el material fino no se desplacen hasta la superficie. Por supuesto que con retraso demasiado prolongado se encontrará una superficie extremadamente dura para emparejar y alisar. La tendencia existente, sin embargo, es la de emparejar y alisar demasiado pronto la superficie. El emparejado y el alisado prematuros pueden ser causa de descascaramientos, agrietamientos irregulares o levantamiento de polvos produciéndose a final de cuentas una superficie con una resistencia a la abrasión reducida.

El esparcir cemento seco sobre una superficie húmeda para absorber el exceso de agua no es una práctica recomendada y puede provocar agrietamientos irregulares. Se deberá evitar la aparición de tales manchas de humedad dentro de lo posible, por medio de la adopción de ajustes en la granulometría del agregado, en las proporciones de las mezclas, y en la consistencia. Cuando estas manchas lleguen a ocurrir, se deberán retrasar las operaciones de acabado hasta que el agua se evapore o se remueva con una barredora de goma para pisos. Si esta barredora de goma para pisos se llega a emplear, se deberá tener el cuidado de no remover cemento junto con el agua.

El primer alisado puede producir la superficie deseada libre de defectos. No obstante, la resistencia al desgaste, la densidad y la tersura de la superficie se pueden mejorar con alisados adicionales. Deberá transcurrir un cierto tiempo entre los alisados sucesivos para permitir que el concreto vaya endureciendo. A medida que la superficie se endurece cada alisado sucesivo deberá efectuarse con llanas de meno-

\* Las Referencias 9-14 y 9-32 presentan a detalle las técnicas de colado y de acabado. La Referencia 9-31 examina los defectos.



tamaño, usando progresivamente una mayor inclinación y presión sobre la hoja de la llana. En la pasada final se deberá producir un sonido metálico cuando la llana se pase por la superficie.

Una llana mecánica para alisar es similar a una llana mecánica normal, salvo que va equipada con hojas de acero individuales de menor tamaño en las que se pueden ajustar la inclinación y la presión sobre la superficie de concreto. Cuando la primera alisada se reduce a máquina, se deberá efectuar al menos una alisada a mano adicional para eliminar las pequeñas irregularidades. Después del alisado, si llegara a hacerse necesario, los bordes labrados y las juntas deberán recorrerse para conservar la uniformidad y las líneas genuinas.

## Escobillado

Se puede producir una superficie resistente contra patinamientos por medio del escobillado antes de que el concreto haya endurecido completamente, aunque debe estar lo suficientemente dura para retener la impresión del rayado. Un rayado tosco se puede obtener con un rastrillo, con un cepillo de cerdas de acero, o con un cepillo de cerdas de fibra gruesa y rígida: tal texturizado normalmente sigue al emparejado. Si se desea obtener una textura más fina, el concreto se deberá emparejar y alisar hasta lograr una superficie tersa, y ya entonces se deberá cepillar con una escoba de cerdas suaves. Se obtienen mejores resultados con escobas fabricadas especialmente para texturizar concreto. Las losas de pisos comúnmente se rayan en dirección transversal a la dirección principal del tránsito.

## Patrones y texturas

Se pueden usar una gran variedad de patrones y texturas para producir acabados decorativos. Los patrones se pueden formar con tiras divisorias o rayando o estampando la superficie justamente antes de que el concreto endurezca. Las texturas se pueden producir con poco esfuerzo y de manera económica con talochas, llanas y escobas; también es posible lograr texturas más elaboradas mediante técnicas especiales.\*

Un acabado con el agregado expuesto muestra una atractiva superficie rugosa. Los agregados escogidos, normalmente de tamaño uniforme, de 9.5 mm (3/8") a 12.5 mm (1/2") ó mayores, deberán estar distribuidos uniformemente en la superficie inmediatamente después que ésta haya sido aplanada. No deberán usarse partículas de agregado elongadas o planas porque son desalojadas fácilmente al quedar expuesto el agregado.

Los agregados que vayan a quedar expuestos deberán ser lavados perfectamente antes de usarlos para asegurar una adherencia satisfactoria. Las partículas de agregado deberán quedar incrustadas totalmente en el concreto. Esto se puede hacer golpeándolas ligeramente con una llana de mano de madera, con una aplanadora de mango corto, o con el lado ancho de una pieza de madera de 5 cm x 10 cm posteriormente, cuando el concreto pueda soportar un cierto peso sobre las tablas donde se hinca el trabajador, se deberá emparejar a mano la superficie con una llana de magnesio o con una aplanadora de mango corto hasta que el mortero rodee completamente y cubra ligeramente todas las partículas del

agregado. Cuando el concreto haya endurecido lo suficiente, se deberá exponer el agregado restregando el concreto y lavándolo con agua.

Como el tiempo de ejecución de esta operación es importante, se deberán hacer paneles de prueba para determinar el tiempo adecuado en que se pueda exponer al agregado sin desalojar las partículas. En las obras muy grandes se puede aplicar un retardante confiable rociándolo o cepillándolo sobre la superficie inmediatamente después del emparejado; en las obras pequeñas esto puede no ser necesario.



Figura 9-8. Un método de curado excelente consiste en cubrir completamente la superficie con cubiertas o lonas húmedas y mantenerla continuamente húmeda durante el periodo de curado.

## Curado y protección

Todas las losas de concreto recién coladas y acabadas deberán curarse y protegerse contra un secado rápido, contra cambios violentos de temperatura, y contra daños provocados por el tránsito y las construcciones subsecuentes.

El curado deberá comenzar lo más pronto posible después del acabado (Figura 9-8). El curado es necesario para asegurar la continua hidratación del cemento y el desarrollo de resistencia del concreto.

Cuando el trabajo con el concreto continúa durante períodos en condiciones ambientales adversas, se hace necesario tomar precauciones especiales, por ejemplo a) En los climas fríos, se deberán hacer arreglos anticipados para calentar, cubrir, aislar o encerrar al concreto. b) El trabajo en climas cálidos podría requerir precauciones especiales contra secados y evaporaciones rápidas y contra temperaturas excesivamente altas.\*\*

\* Consulte la Referencia 9-10.

\*\* Consulte también el Capítulo 10, "Curado del concreto"; el Capítulo 11, "Concreto en clima cálido"; y el Capítulo 12, "Concreto en clima frío".

## COLADOS SOBRE CONCRETO ENDURECIDO

### Juntas de construcción de liga en concreto estructural

Las juntas de construcción de liga son necesarias entre dos colados de concreto estructural cuando un concreto fresco se va a poner en contacto con algún concreto endurecido ya existente y se necesita contar con una adherencia y hermeticidad de alta calidad. Las juntas de construcción pobremente ligadas normalmente son resultado de: 1) la falta de enlace entre un concreto viejo y uno nuevo ó 2) una capa débil porosa en la junta del concreto endurecido. La calidad de la junta de liga va a depender por un lado de la calidad del concreto endurecido y por el otro de la preparación de la superficie.

En las columnas y en los muros el concreto cercano a la superficie superior de una colada a menudo presenta una calidad menor que la del concreto subyacente. Eso se puede deber a una pobre consolidación o al empleo de mezclas con proporcionamientos inadecuados o con revenimientos muy altos que pueden causar lechadas, segregación, y sangrado excesivos. Aún en las mezclas bien proporcionadas y cuidadosamente consolidadas es inevitable la ocurrencia de un cierto asentamiento de partículas de agregado y de acumulación de agua (sangrado) en la superficie superior, especialmente si las velocidades de colado son altas. Además la cimbra circundante evita el escape de humedad del concreto fresco. A pesar de considerar que la cimbra suministra un curado adecuado en tanto permanece en su lugar, en la superficie superior donde no existe cimbra que proteja, el concreto se puede secar demasiado rápidamente; esto ocasiona una capa débil y porosa a menos que el concreto se proteja y se cure.

### Preparación de concreto endurecido

Cuando el concreto fresco se cuele sobre un concreto recién endurecido, se deberán tener en consideración ciertas precauciones para asegurar la obtención de una junta bien enlazada y hermética. El concreto endurecido deberá estar limpio y sano, bien nivelado y razonablemente áspero con algunas partículas expuestas de agregado grueso. Cualquier lechada, mortero suave, polvo, astillas de madera, aceite proveniente de la cimbra, o cualquier otro material extraño interferirá con el enlace adecuado del colado subsecuente.

La superficie del concreto viejo sobre la que se va a colar deberá rasparse y limpiarse perfectamente de cualquier partícula de polvo, películas superficiales, depósitos, partículas sueltas, grasa, aceite y cualquier otro material. En la mayoría de los casos es necesario retirar toda la superficie hasta encontrar concreto sano. El labrado y limpieza con martillos cinceladores o rebabeadoras, con chorro de agua, con escarificadores, con chorro de arena, o con cualquier otro equipo mecánico, constituyen métodos satisfactorios para dejar expuesto al concreto sano (Figura 9-9). También se pueden usar métodos químicos. Se debe tener cuidado de evitar que la superficie limpia se contamine antes de colar el mortero de adherencia y la capa suprayacente de concreto.

Un concreto parcialmente fraguado o endurecido sólo puede requerir de un cepillado con cerdas de metal. En algunos tipos de construcción como en las presas, la superficie de cada colada de concreto se labra con un chorro de aire y agua a alta velocidad para dejar expuesto el concreto limpio y sano antes del fraguado final. Esto se efectúa de 4 a 12 horas después del colado. La superficie deberá protegerse entonces y curarse continuamente hasta proseguir con la próxima colada.

Para los pisos de capa doble, la superficie superior de la losa base se puede labrar justo antes de que fragüe con un cepillo de acero o de fibra dura. La superficie deberá estar nivelada, rayada considerablemente y libre de lechada. Deberá quedar protegida a partir de ese momento hasta que se limpie perfectamente justo antes de la aplicación del mortero y de colar la capa superior.

El concreto endurecido puede quedar seco o se puede humedecer antes de colar encima el concreto nuevo; en estas condiciones, la superficie no deberá contener agua libre. Los estudios de laboratorio indican que se obtiene una liga ligeramente húmeda; sin embargo, un mayor nivel de humedad en el ambiente alrededor del concreto reduce la pérdida de agua procedente de la mezcla, especialmente si el colado se lleva a cabo en un día cálido y seco.

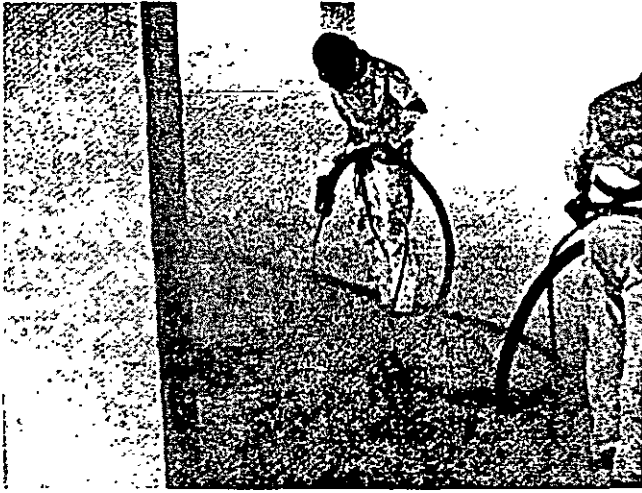
Para una junta de construcción horizontal en la edificación de muros de concreto reforzado, se obtienen resultados satisfactorios montando las cimbras hasta el nivel de la junta, sobrepasando las cimbras de 2 a 5 cm, y removiendo el exceso de concreto justo antes de que ocurra el fraguado. La superficie superior se podrá entonces labrar manualmente con cepillos duros. El procedimiento se ilustra en la Figura 9-10.

En el caso de juntas constructivas verticales coladas contra un muro ribereño de contención, la superficie del concreto generalmente está demasiado lisa como para permitir una liga apropiada. Se deberá tener un cuidado especial para la remoción del acabado liso de la superficie antes de volver a colocar las cimbras para colar el concreto fresco contra la junta. Puede bastar con un cepillado con cerdas metálicas duras si el concreto tiene menos de tres días de edad; de otra manera, podría ser necesario aplicar un martelinado o una limpieza con chorro de arena, siguiendo con un lavado con agua limpia para retirar todo el polvo y partículas sueltas.\*

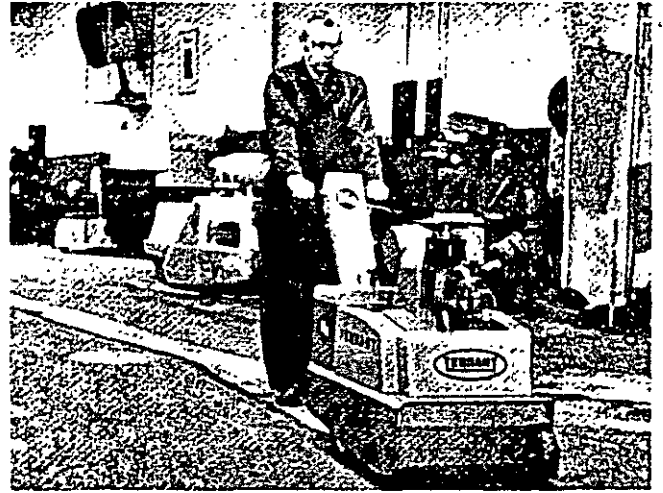
### Unión de concreto nuevo a concreto previamente endurecido

Para las juntas constructivas horizontales en secciones de muros en las que se vaya a colar concreto fresco sobre concreto endurecido, la experiencia de campo indica que se puede obtener una buena liga colocando una mezcla rica de concreto con contenidos de cemento y arena mayores de lo normal, en la parte inferior de la nueva colada y vibrándola perfectamente en la interfase con la junta. A menudo las mezclas regulares de concreto usadas en la estructura son lo suficientemente ricas y con un vibrado adecuado se puede

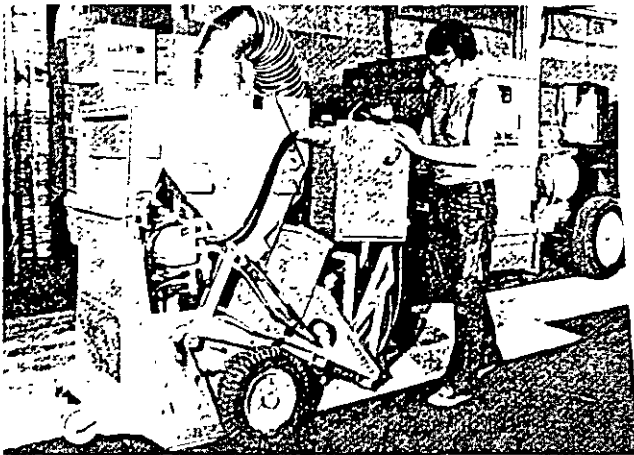
\* Para tener información adicional, consulte la Referencia 9-18.



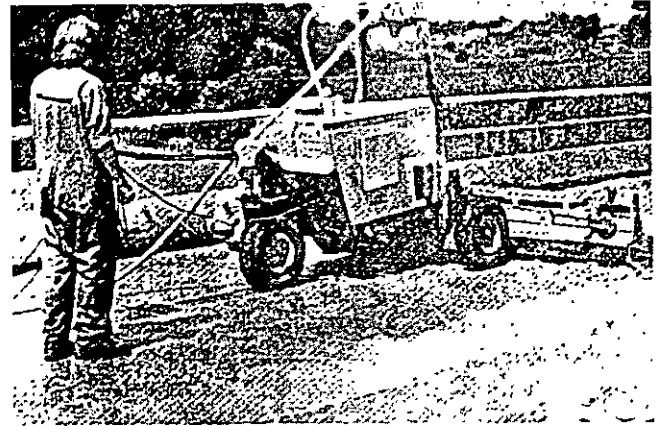
a. La limpieza con chorro de arena se puede aplicar en superficies de cualquier tamaño o forma - horizontales, verticales, o elevadas.



c. Los escarificadores utilizan cortadores de acero para retirar superficies de concreto.



b. El equipo autocontenedor de chorro de perdigones sin aire puede preparar las superficies horizontales sin contaminar las áreas de trabajo con polvo o con desechos.



d. El equipo de limpieza con chorro de agua ("hidrojet") mostrado retira la superficie del concreto por medio de chorros finos de agua a presiones de entre 420 kg/cm<sup>2</sup> y 1200 kg/cm<sup>2</sup>. Algunos equipos de agua de presión-ultra-elevada pueden lograr presiones de hasta 3850 kg/cm<sup>2</sup>.

Figura 9-9. Métodos comúnmente usados para remover concreto defectuoso, lechada, descascamientos, y polvo para dejar expuesto al concreto firme, sano y limpio.

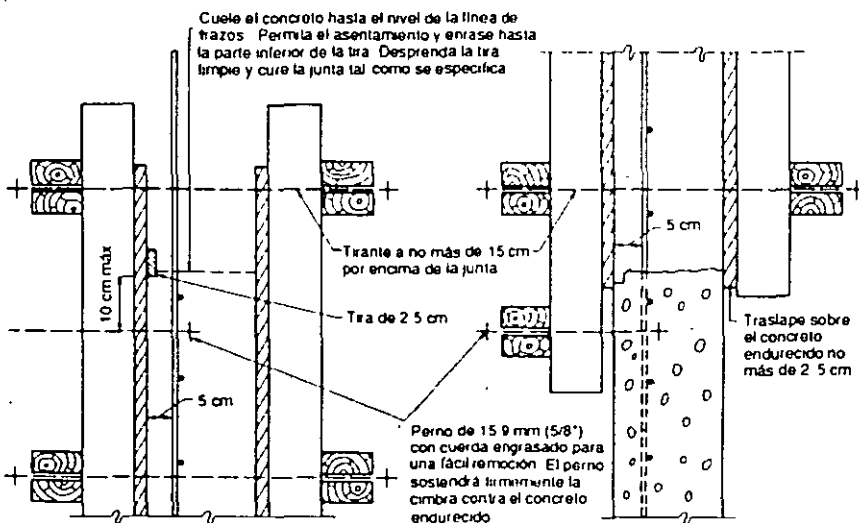
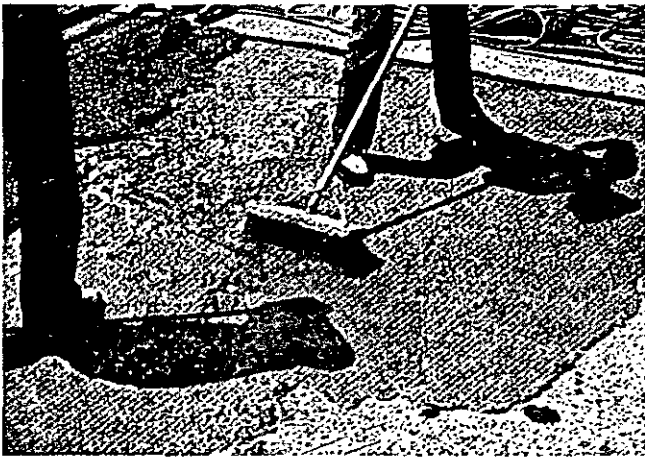


Figura 9-10. En este detalle se muestra una junta de construcción horizontal recta.



**Figura 9-11.** Aplicación de un mortero de adherencia un par de metros adelante de la capa superior de concreto. El mortero no deberá secarse antes de colar el concreto nuevo.

formar una buena liga con un concreto endurecido limpio y preparado.\*

Para las capas superiores de las losas y de los pisos de doble capa, se cepilla sobre la superficie limpia y seca o húmeda pero sin la presencia de agua libre, una capa de 1.5 mm a 3 mm de espesor de mortero consistente de una parte de cemento, una parte de arena y la cantidad suficiente de agua para lograr una consistencia espesa, cremosa y similar a una pintura. El mortero se coloca a una corta distancia delante de la capa superior de concreto (Figura 9-11).\*\* No se debe dejar que el mortero seque antes de colar la capa superior, pues el mortero seco actuaría como si fuera una superficie débil. La superficie del concreto viejo deberá estar limpia y sana. La limpieza se ejecuta de modo adecuado con chorro de arena, chorro de agua, escarificación, chorro de perdigones y con otros métodos. La exposición referente a las capas superiores se presenta más adelante, en la sección de "Resanado, limpieza y acabado".

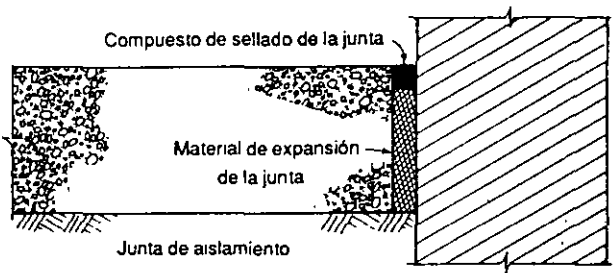
## ELABORACION DE JUNTAS EN PISOS Y EN MUROS

Los tres tipos de juntas que a continuación se presentan son comunes en las construcciones de concreto.

### Juntas de aislamiento

A las juntas de aislamiento (Figura 9-12) también se les llama a veces juntas de expansión. Permiten movimientos diferenciales horizontales y verticales en las partes adyacentes a la estructura, por ejemplo, alrededor del perímetro de un piso colado sobre el terreno, alrededor de las columnas, y al-

rededor de las cimentaciones de maquinaria para separar a la losa de las partes de mayor rigidez de la estructura.



**Figura 9-12.** Las juntas de aislamiento permiten movimientos horizontales y verticales entre las caras colindantes de la losa y las partes fijas de una estructura.

El material de la junta de aislamiento (también llamado material de la junta de expansión) puede ser tan delgado como 6 mm o menos, aunque el material que se usa más comúnmente es el de 12 mm. Se debe tener la precaución de asegurarse de que todos los bordes de la losa estén aislados de las construcciones adyacentes en todo su espesor; de otra manera, podrían ocurrir agrietamientos como consecuencia de los movimientos diferenciales.

Las columnas montadas en zapatas aisladas se pueden separar de las losas sobre el terreno con una junta de aislamiento que puede ser circular o cuadrada. La de forma cuadrada se debe girar para que sus esquinas queden alineadas con las juntas de control y de construcción (vea la Figura 9-17).

### Juntas de contracción

Las juntas de contracción (Fig. 9-13) permiten el movimiento en el mismo plano de la losa o del muro e inducen el agrietamiento causado por la contracción por secado y térmica en los sitios preseleccionados. Las juntas de contracción (en ocasiones también llamadas juntas de control) deberán ser construídas para permitir la transferencia de cargas perpendiculares al plano de la losa o del muro. Si no se utilizan juntas de contracción o si quedan espaciadas demasiado alejadas en las losas sobre el terreno o en muros con muy ligero refuerzo, ocurrirán agrietamientos aleatorios cuando la contracción por secado y la contracción por temperatura produzcan esfuerzos de tensión mayores que la resistencia a tensión del concreto.

Las juntas de contracción en las losas sobre el terreno pueden hacerse de diversas maneras. Uno de los métodos más comunes consiste en aserrar una ranura recta continúa en la parte superior de la losa (Fig. 9-14). Esto forma un plano de debilidad en el cual se va a formar una grieta. Las cargas verticales se transmiten a través de la junta por la trabazón de agregados entre las caras opuestas de la grieta siempre y cuando la grieta no sea demasiado ancha y que el espaciamiento entre juntas no sea demasiado grande. Se

\* Para contar con información adicional consulte la Referencia 9-7.

\*\* Este método también puede aplicarse a las juntas horizontales en los muros.

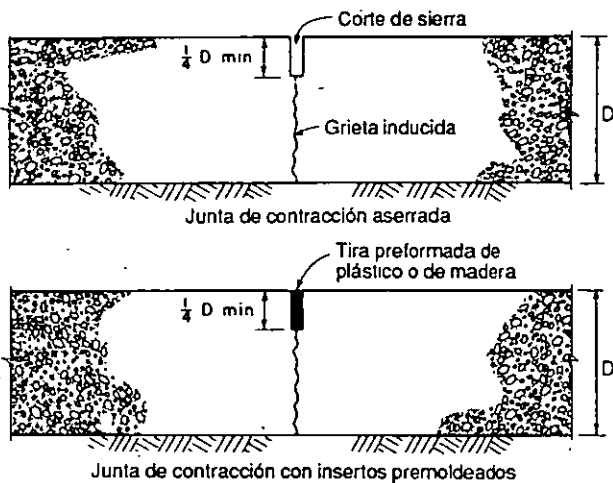


Figura 9-13. Las juntas de contracción aseguran el movimiento horizontal en el plano de una losa o de un muro e inducen el control de los agrietamientos provocados por la contracción por secado.

puede hacer uso de barras pasajuntas de acero (Fig. 9-15 c) para aumentar la transferencia de carga en las juntas de contracción. Los tamaños y espaciamentos de las barras pasajuntas, las cuales van colocadas a la mitad del espesor de la losa, se muestran en la Tabla 9-1.\*

El aserrado debe sincronizarse con el tiempo de fraguado del concreto. Deberá comenzarse tan pronto como el concreto haya endurecido lo suficiente para evitar que los agregados sean desalojados por la sierra (usualmente dentro de las 4 a 12 horas posteriores al endurecimiento del concreto) y completarse antes de que los esfuerzos provocados por la contracción por secado sean tan grandes que lleguen a producir agrietamientos.

También se pueden formar juntas de contracción en el concreto fresco mediante ranuradores de mano o colocando tiras de madera, metal, o de algún material preformado en los

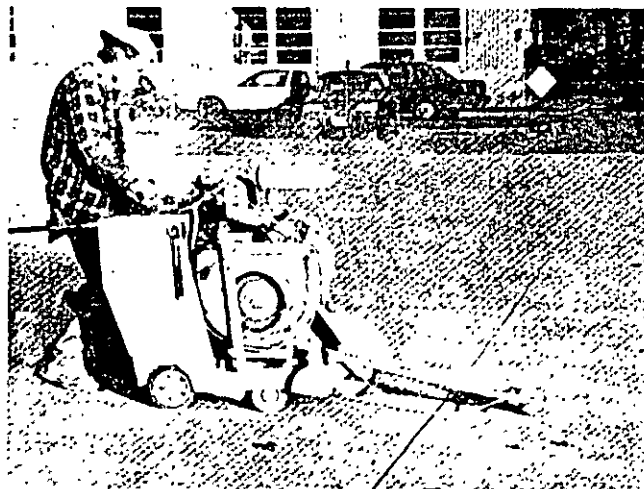


Figura 9-14. El aserrado de un corte continuo en la parte superior de la losa constituye uno de los métodos más económicos para producir una junta de contracción.

Tabla 9-1. Tamaños y espaciamentos de las barras pasajuntas y de las barras de anclaje

Peralte de la losa, en cm	Diámetro, cm (pulg) o número de barra	Longitud total, en cm	Espaciamiento de centro a centro, en cm
<b>Barras pasajuntas</b>			
12.5	1.59 (5/8)	30	30
15.0	1.90 (3/4)	35	30
17.5	2.22 (7/8)	35	30
20.0	2.54 (1)	35	30
22.5	2.86 (1 1/8)	40	30
25.0	3.17 (1 1/4)	40	30
<b>Barras de anclaje</b>			
12.5	# 4	75	75
15.0	# 4	75	75
17.5	# 4	75	75
20.0	# 4	75	75
22.5	# 5	75	75
25.0	# 5	75	75

Referencia 9-22.

Tabla 9-2. Espaciamiento máximo de las juntas de contracción en metros.

Espesor de la losa, en cm	Revenimiento de 10 a 15 cm		Revenimiento menor que 10 cm*
	Agregado de tamaño máx. menor que 19 mm (3/4")	Agregado de tamaño máx. igual que 19 mm (3/4") y mayor	
10.0	2.40	3.00	3.60
12.5	3.00	4.00	4.50
15.0	3.60	4.50	5.50
17.5	4.20	5.50	6.40
20.0	4.80	6.00	7.30
22.5	5.50	7.00	8.20
25.0	6.00	7.60	9.10

Adaptada de la Tabla 8, Concrete Floors on Ground, EB075D, 2a. ed., Portland Cement Association, 1983

Nota: Los espaciamentos también se utilizan para las distancias desde las juntas de contracción hasta las juntas paralelas de aislamiento o hasta las juntas paralelas de construcción del tipo contracción. Los espaciamentos mayores que 4.50 m pueden indicar una marcada pérdida de efectividad de la trabazón de los agregados para proporcionar la transferencia de cargas a través de la junta.

\* Agregado de 19 mm (3/4") de tamaño máximo y de tamaños mayores.

sitios de las juntas. La parte superior de las tiras deberá ir a ras de la superficie de concreto. Las juntas de contracción, ya sean aserradas, ranuradas, o preformadas, deberán desarrollarse a una profundidad de un cuarto del espesor de la losa.

Las juntas de contracción en los muros son también planos de debilidad que permiten movimientos diferenciales en el plano del muro. El espesor del muro de una junta de

\* Las Referencias 9-18 y 9-22 discuten más ampliamente el uso de las juntas con barras pasajuntas. Página 116.

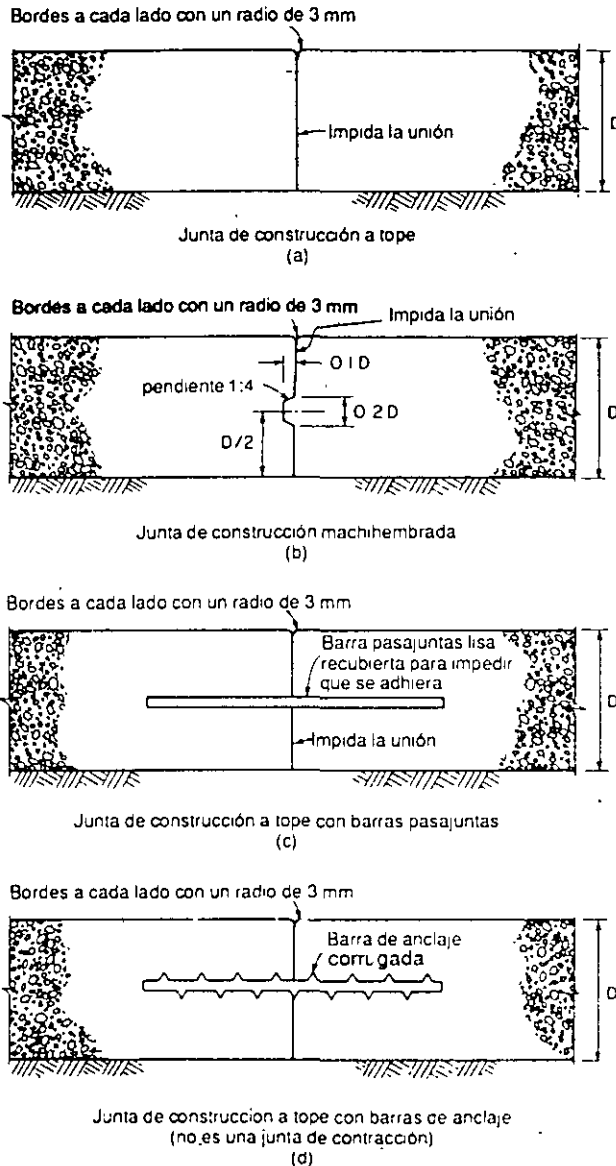


Figura 9-15. Las juntas de construcción son los lugares en que se detiene el proceso de construcción. Las juntas de construcción a, b, y c también se pueden usar como juntas de contracción.

contracción deberá reducirse en al menos un 20 %, o de preferencia un 25 %. En los muros reforzados ligeramente, la mitad de las barras de acero se deberán cortar en la junta. Se debe tener el cuidado de cortar las barras alternas precisamente en la junta. En las aristas de las aberturas en los muros donde se localicen las juntas de contracción, se deberá suministrar un refuerzo adicional diagonal o vertical y horizontal para controlar los agrietamientos. Las juntas de expansión en los muros deberán quedar espaciadas a no más de aproximadamente 6 m. Además, las juntas de contracción deberán ir colocadas donde ocurran cambios abruptos de espesor o de altura, cerca de las esquinas si es posible, dentro de 3.00 a 4.50 m. Dependiendo de la estructura, estas juntas podrían requerir ser calafateadas para evitar el paso de agua a través del muro. En lugar del calafateo, se puede usar un

contenedor de agua para evitar que esta se derrame a través de la grieta que ocurre en la junta.

El espaciamiento de las juntas de contracción en los pisos sobre el terreno dependerá de: 1) el espesor de la losa, 2) el potencial de contracción del concreto, 3) la fricción con la subrasante, 4) el medio ambiente, y 5) la ausencia o presencia de acero de refuerzo. A no ser que se cuente con datos confiables que indiquen la factibilidad de juntas con un mayor espaciamiento, los intervalos sugeridos por la Tabla 9-2 deberán emplearse para un concreto bien proporcionado con agregados que tengan características normales de contracción. Se deberá disminuir el espaciamiento entre juntas en los concretos sospechosos de poseer características de contracción elevada. Los tableros que resulten deberán ser aproximadamente cuadrados. Los tableros que tienen relaciones largo-ancho excesivas (mayores que 1 1/2 a 1), muy probablemente se agrietarán en un sitio intermedio.

### Juntas de construcción

Las juntas de construcción (Fig. 9-15) son lugares de paro durante el proceso de construcción. Una verdadera junta de construcción deberá unir al concreto nuevo con el concreto existente y no deberá permitir ningún movimiento. Las barras de anclaje deformadas (tamaños y espaciamientos mostrados en la Tabla 9-1) se emplean a menudo en las juntas de construcción para restringir los movimientos. Como se requiere de cuidados adicionales para formar una junta de construcción verdadera, usualmente se les diseña y construye para que funcionen como juntas de contracción o de aislamiento y se les alínea con ellas, y por lo tanto pueden hacerse desligadas a propósito. Como materiales desligantes se pueden utilizar aceites, pinturas y agentes para separar cimbras. En los pisos de gran espesor, para cargas grandes, se utilizan comúnmente juntas de construcción con barras pasajuntas sin ligar; de otra manera las juntas machihembradas resultan satisfactorias. Para las losas delgadas, bastará con una junta a tope de cara plana.

En la mayoría de estructuras es deseable tener juntas en los muros que no afecten la apariencia. Cuando se les construye adecuadamente, las juntas pueden ser insignificantes, o quedar escondidas por tiras rústicas. Por lo tanto se les

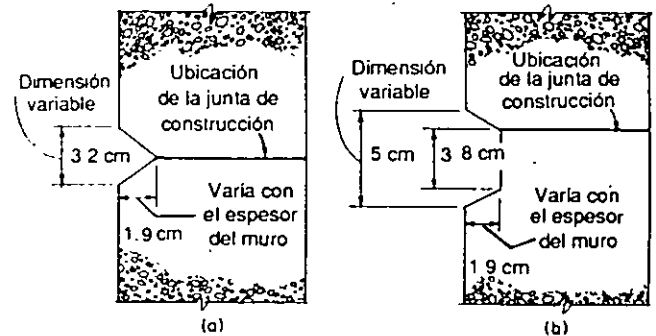


Figura 9-16. Juntas horizontales de construcción en muros con tiras rústicas en V, (a); y biseladas, (b).

puede considerar una característica arquitectónica y funcional de la estructura. Sin embargo, si se usan tiras rústicas en estructuras que puedan entrar en contacto con sales descongelantes, como las columnas y estribos de puentes, se deberá tener cuidado asegurar que el acero de refuerzo tenga el recubrimiento de concreto requerido para evitar la corrosión.

Las juntas horizontales en los muros deberán hacerse rectas, exactamente horizontales, y colocarse en lugares adecuados. Una junta de construcción horizontal recta se puede hacer clavando una tira de madera de 2.5 cm a la cara interior de la cimbra cerca de la parte superior (vea la Fig. 9-10). El concreto deberá entonces colarse a un nivel ligeramente superior al fondo de la tira. Después de que el concreto se haya asentado y antes de que endurezca, deberá removerse cualquier lechada que se haya formado sobre la superficie superior. Entonces podrá removerse la tira y emparejar las irregularidades en la junta. Después se retiran las cimbras y se pueden recolocar sobre la junta de construcción para el siguiente colado de concreto. Para evitar fugas de concreto, se deberán usar empaques donde las cimbras queden en contacto con el concreto endurecido previamente colado.

Una variación de este procedimiento hace uso de una tira rústica en vez de la tira de madera de 2.5 cm para formar una ranura en el concreto y así obtener un efecto arquitectónico (Fig. 9-16). Las tiras rústicas pueden ser de forma en V, rectangulares, o ligeramente biseladas. Si tienen forma en V, la junta deberá hacerse en el punto de la V. Si son rectangulares o biseladas, la junta deberá hacerse en el borde superior de la cara interior de la tira.

## RELLENO DE JUNTAS DE PISOS

El movimiento en las juntas de contracción de un piso generalmente es muy pequeño. Para ciertos usos industriales y comerciales, estas juntas pueden quedar sin rellenar. Donde existan condiciones de humedad, requisitos de higiene y de control de polvo, o tránsito considerable de vehículos pequeños con ruedas duras tales como las carretillas elevadoras de horquilla, el relleno de las juntas se vuelve necesario.

En muchos lugares resulta satisfactorio un material elástico como lo son los selladores elastoméricos, pero para dar soporte a los bordes y para prevenir descantilladuras en las juntas aserradas, se deberá usar un relleno epóxico semi-rígido de buena calidad con una dureza Shore A-80 ó D-50 (ASTM D 2240). El material deberá instalarse en todo el espesor a lo largo del corte aserrado, sin una varilla sostenedora, y al nivel de la superficie del piso.

Las tiras extruídas de plomo insertadas en las juntas de contracción dan un buen soporte a los bordes y con ello reducen las descantilladuras. Las tiras de plomo, en los lugares donde son permitidas, han tenido gran éxito para rellenar juntas en pisos de concreto expuestos a trabajo pesado donde el tránsito de vehículos es severo, especialmente de vehículos de ruedas pequeñas.

Se intenta lograr que las juntas de aislamiento acomoden los movimientos; por lo tanto deberá usarse un sellador elastomérico flexible.

## DISPOSICION DE JUNTAS PARA PISOS

En la Fig. 9-17 se ilustra una disposición típica de juntas para pisos industriales. Las juntas de aislamiento se habilitan alrededor del perímetro del piso donde colinda con los muros y alrededor de todos los elementos fijos que puedan restringir el movimiento de la losa. Esto incluye las columnas y las bases de maquinaria que penetran la losa del piso. Con la losa aislada de los demás elementos del edificio, la tarea restante consiste en localizar y espaciar correctamente las juntas de contracción para eliminar los agrietamientos aleatorios. Los lugares de las juntas de construcción se coordinarán con el contratista para convenir con los calendarios de trabajo y con el tamaño de la cuadrilla. Deberán coincidir con el patrón de las juntas de contracción y actuar como juntas de contracción.\*

## PISOS SIN JUNTAS

Un piso sin juntas o un piso con un número limitado de juntas se puede construir cuando las juntas no sean aceptables. Se sugieren tres métodos:

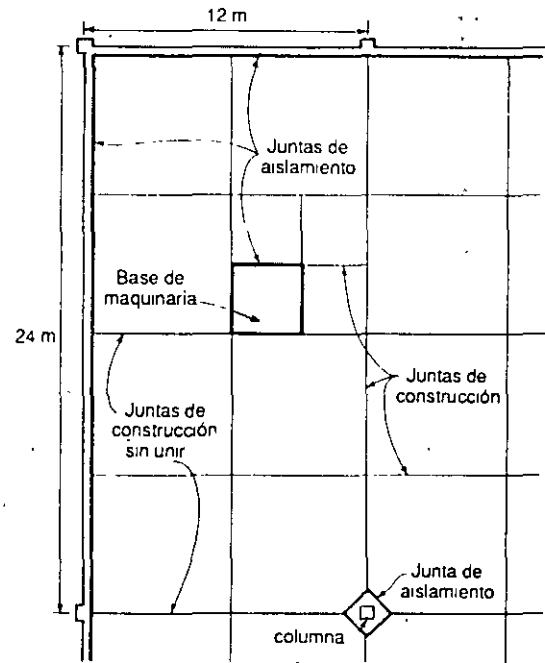


Figura 9-17. Disposición típica de las juntas en un piso de concreto de 20 cm de espesor.

\* Para mayor información referente a las juntas de pisos consulte las Referencias 9-14, 9-18 y 9-22. Para las juntas en los muros consulte las Referencias 9-18, 9-21, 9-23, 9-24 y 9-25.



1. Un piso presforzado se puede construir haciendo uso del postensado. Con este método, se tensionan torones de acero dentro de ductos después de que el concreto ha endurecido para producir esfuerzos de compresión en el concreto durante la transferencia de los esfuerzos. Esto neutraliza el desarrollo de los esfuerzos de tensión en el concreto y proporciona un piso libre de juntas. De esta manera se pueden construir áreas extensas, de 1000 m<sup>2</sup> y más, sin necesidad de juntas intermedias.
2. Se puede usar concreto fabricado con cemento expansivo para compensar anticipadamente la contracción por secado posterior al curado. Las juntas de contracción no son necesarias cuando se usan juntas constructivas a intervalos de 12 a 36 m. De esta manera se han colado áreas extensas, hasta de 2000 m<sup>2</sup>, sin juntas. Se necesita acero de refuerzo para esfuerzos de compresión producidos durante y después del período de expansión, siendo esto una forma de presforzado.
3. Las áreas extensas - un sólo día de colado de losas, normalmente de 750 a 1000 m<sup>2</sup> - se pueden colar sin juntas de contracción cuando la cantidad de acero distribuido es de aproximadamente la mitad de uno por ciento del área transversal de la losa. Se debe realizar un esfuerzo especial para reducir la fricción de la subrasante en los pisos sin juntas de contracción.\*

## DESCIMBRADO

Es conveniente dejar las cimbras en su lugar el mayor tiempo posible para continuar con el período de curado. Sin embargo, hay ocasiones en que es preciso retirarlas lo más pronto posible. Por ejemplo, cuando se especifica un acabado por medio abrasivo, se deben retirar pronto las cimbras para permitir la primera pasada antes de que el concreto endurezca demasiado. Además, a menudo es necesario descimbrar rápidamente para permitir el reuso inmediato de las cimbras.

En cualquier caso, las cimbras no se deben retirar hasta que el concreto tenga la suficiente resistencia para soportar de manera satisfactoria los esfuerzos provocados tanto por la carga muerta de la estructura como por cualquier carga impuesta durante la construcción. El concreto deberá tener la dureza suficiente que garantice que las superficies no serán dañadas de ninguna manera teniendo un cuidado razonable al descimbrar. En general, para temperaturas del concreto por encima de 10°C, se pueden retirar las cimbras laterales de espesor razonable en secciones apuntaladas 12 a 24 horas después de haberse colado. Las cimbras de vigas y losas de piso y sus soportes (apuntalamientos) se podrán retirar entre 3 y 21 días dependiendo del tamaño del elemento y del desarrollo de resistencia del concreto.\*\*Para la mayoría de las condiciones es mejor confiar en la resistencia del concreto que se determine mediante pruebas, en vez de escoger arbitrariamente la edad a la cual se puedan retirar las cimbras.

El proyectista deberá especificar los requisitos mínimos de resistencia de los diversos elementos para efectuar el des-

cimbrado. Se deberá determinar la relación edad-resistencia a partir de muestras representativas del concreto empleado en la estructura, y curado en el campo bajo las mismas condiciones de la obra. La Tabla 9-3 muestra las edades requeridas normalmente para lograr ciertas resistencias bajo condiciones promedio para concretos con aire incluido hechos con una relación agua-cemento de aproximadamente 0.53. Debe tenerse presente, sin embargo, que las resistencias son afectadas por los materiales usados, por la temperatura y por otras condiciones. Por lo tanto el tiempo requerido para descimbrar variará de obra a obra (Consulte el Capítulo 12).

**Tabla 9-3. Relación típica edad-resistencia de concretos con aire incluido.**

Resistencia, kg/cm <sup>2</sup>	Edad	
	Cemento normal, Tipo I	Cemento de alta resistencia a edad temprana, Tipo III
35	24 horas	12 horas
50	1 1/2 días	18 horas
105	3 1/2 días	1 1/2 días
140	5 1/2 días	2 1/2 días

No se debe apoyar contra el concreto una barreta de pinchar u otra herramienta de metal para acuar y desprender las cimbras. Si es necesario acuar entre el concreto y la cimbra, sólo deberán usarse cuñas de madera. El descimbrado deberá comenzar a cierta distancia y deberá dirigirse hacia una saliente. Esto alivia las presiones contra las esquinas salientes y reduce las probabilidades de que las aristas se desprendan.

Las cimbras rebajadas requieren de una atención especial. Se deben clavar gradualmente cuñas de madera en la parte de atrás de la cimbra y esta se debe golpear ligeramente para separarla del concreto. No se deben arrancar con mucha rapidez las cimbras después de haber comenzado a acuar en un extremo, pues con eso seguramente se desprenderían las aristas del concreto.

## RESANADO, LIMPIEZA Y ACABADO

Luego de haber descimbrado, todas las combaduras, rebabas y pequeñas salientes se pueden retirar cinceland o labrando. Los pernos, clavos, amarres u otros metales insertos no descados pueden retirarse o pueden rebajarse hasta una profundidad de 12 mm de la superficie del concreto. Cuando se requiera, se puede raspar o pulir la superficie para dar una apariencia uniforme. Cualquier cavidad, como los agujeros de los separadores, deberá rellenarse, a menos que se deje permanecer así por motivos decorativos. Las áreas apanaladas deberán repararse y las manchas deberán limpiarse para presentar una superficie de concreto que sea uniforme en color. Todas estas operaciones se pueden minimizar teniendo cuidado en el montaje de la cimbra y en el colado del concreto. En general, las reparaciones son más fáciles de ejecutar y de mayor éxito si se hacen tan pronto como sea posible, de preferencia cuando se retiren las cimbras. Sin embargo, los procedimientos que en seguida se

\* La Referencia 9-22 comenta el uso del acero distribuido en los pisos.

\*\* Referencia 9-26.



discuten son aplicables al concreto endurecido, ya sea concreto nuevo o concreto viejo.

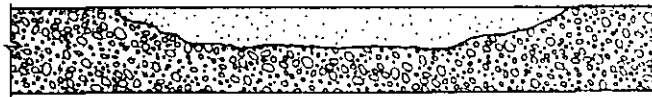
## Agujeros, defectos y capas superpuestas

Los parches normalmente parecen más oscuros que el concreto que les circunda; en consecuencia, se deberá usar una cierta cantidad de cemento blanco en el mortero o en el concreto en aquellos puntos donde la apariencia sea importante. Se deberán aplicar y curar muestras en zonas sin importancia, por ejemplo en un muro de sótano, varios días antes de efectuar las operaciones de parchado para determinar las proporciones más adecuadas de cemento gris y de cemento blanco. Se debe evitar el alisado con llana de metal porque el parche se oscurece.

Los agujeros de los pernos, de los separadores, y otras cavidades que tengan áreas pequeñas pero que sean relativamente profundas deberán rellenarse con un mortero empacado en seco. El mortero deberá mezclarse lo más consistente que se pueda, usando 1 parte de cemento, 2 1/2 partes de arena que pase la malla No. 16, y la cantidad justa de agua que sea suficiente para formar una pelotilla cuando el mortero se apriete suavemente con las manos. La cavidad deberá estar limpia de aceite y de material suelto y deberá mantenerse húmeda con agua durante varias horas. Un mortero de adherencia (1 parte de cemento, 1 parte de arena, y la suficiente agua para formar una mezcla de consistencia cremosa) se deberá cepillar sobre las superficies de los agujeros pero sin permitir que se seque antes de colocar el mortero. El mortero deberá retacarse en su lugar en capas de aproximadamente 1.25 cm de espesor. Con un retacado vigoroso y con un curado adecuado se asegura una correcta adherencia del parche así como una contracción mínima.

Para los parches grandes y para las capas superpuestas delgadas se requiere el uso de concreto como material de reparación. Este concreto deberá tener una relación agua-cemento baja, a menudo con un contenido de cemento igual o mayor que el concreto que se vaya a reparar. Los contenidos de cemento a menudo varían entre 356 y 504 kg/m<sup>3</sup> y la relación agua-cemento es usualmente de 0.45 ó menos. El tamaño del agregado deberá ser de preferencia no mayor de 1/3 del espesor del parche o sobrecapa. Normalmente se emplea un agregado con tamaño máximo de 9.5 mm (3/8"). La proporción de arena puede ser mayor que la usual, con frecuencia igual a la cantidad de agregado grueso, dependiendo de las propiedades deseadas y de la aplicación.

Antes de comenzar a aplicar el concreto para parchar, el concreto circundante deberá estar limpio y sano. Usualmente se necesita usar métodos abrasivos de limpieza (limpieza con chorro de arena, con chorro de agua a baja o alta presión, con escarificadores, o con chorro de perdigones). Se deberá restregar un mortero (1 parte de cemento, 1 parte de arena fina que pase la malla No. 30, y la cantidad de agua suficiente para darle una consistencia cremosa) con un cepillo o con una escobilla sobre todas las superficies a las que el nuevo material se vaya a adherir. Este mortero se deberá aplicarse inmediatamente antes de colocar el concreto nuevo. No debe dejarse que el mortero seque antes de colocar el concreto, pues debilitaría la adherencia. Al aplicar el mortero, el concreto puede estar seco o húmedo pero no empapado con agua libre. El espesor mínimo para la mayoría de parches y capas



(a) Parche colocado de manera incorrecta. Los bordes biselados fallarán bajo la acción del tránsito o se intemperizarán.



(b) Parche colocado adecuadamente. La zona labrada deberá tener una profundidad mínima de 2 cm y sus bordes deben tener ángulos rectos o estar socavados hasta la superficie.

Figura 9-18. Instalación de parches.

superpuestas es de 2 cm. Algunas estructuras, como las cubiertas de los puentes, deberán tener un espesor mínimo de reparación de 4 cm. Frecuentemente se agrega un superplastificante al concreto de la sobrecapa o de la reparación con el propósito de disminuir la relación agua-cemento y de mejorar la trabajabilidad y la facilidad para consolidar.\*

El concreto con apanalamientos y otros defectos se debe retirar para dejar expuesto material sano. Si se deja concreto defectuoso alrededor de un parche, se puede introducir humedad en los vacíos; con el tiempo, la acción del intemperismo causará que el parche se descostre. Los bordes del área defectuosa se deberán cortar o cincelar derechos y en ángulos rectos con respecto a la superficie, o ligeramente socavados para proporcionar una muesca en el borde del parche. No se debe permitir que los bordes estén biselados (Fig. 9-18). Según sea el tamaño del parche se deberá usar una mezcla de mortero o de concreto.

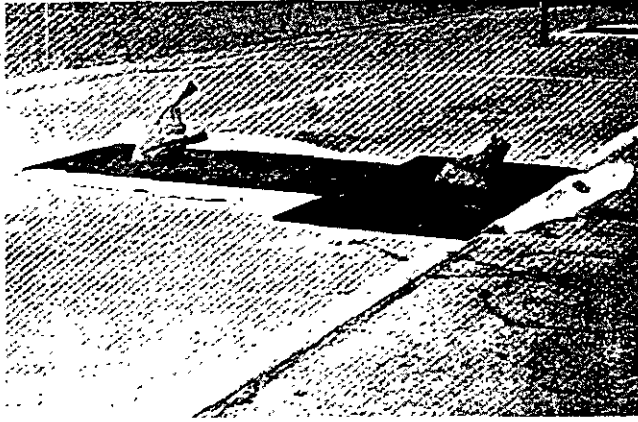
Los parches superficiales se pueden rellenar con un mortero que tenga la consistencia previamente descrita. Este mortero se deberá colocar en capas no mayores de 1.2 cm de espesor, debe darse a cada capa un acabado rayado para mejorar la adherencia con la capa subsiguiente. A la capa final se le puede aplicar un acabado que coincida con el concreto que le rodea ya sea por medio de un emparejado, o con tratamiento abrasivo, o mediante labrado, o sobre superficies moldeadas presionando una sección del molde contra el parche, siempre y cuando éste aún se encuentre en estado plástico.

Los parches profundos se pueden rellenar con concreto que esté sostenido en su lugar mediante cimbras. Tales parches deberán estar reforzados anclando el refuerzo en el concreto endurecido.\* Las reparaciones grandes, poco profundas que se localicen en posiciones verticales o en plafones se pueden llevar a cabo de mejor manera empleando la técnica del concreto lanzado (Capítulo 15). También se puede disponer de diversos productos cementantes para reparaciones de baja contracción.

## Curado de parches

En seguida del parchado, un buen curado es esencial (Fig. 9-19). El curado debe comenzar tan pronto como sea posible para impedir un secado temprano. Se podrá usar manta

\* Referencia 9-27.



**Figura 9-19. Un buen curado es indispensable para producir un parchado correcto. Este parche ha sido cubierto con láminas de polietileno junto con un aislante rígido para retener la humedad y el calor a fin de propiciar una hidratación y un desarrollo de resistencia rápidos.**

húmeda, arena húmeda, láminas de plástico, papel para curado, cubiertas de lona, o alguna combinación de ellas. En los lugares donde sea difícil mantener en su lugar estos materiales, el método más conveniente frecuentemente consistirá de una aplicación de dos capas de alguna membrana de curado.

## Limpeza de las superficies de concreto

Las superficies del concreto no siempre tienen un color uniforme al retirar las cimbras; pueden tener una apariencia un tanto manchada y en ciertas áreas también puede existir una capa del agente empleado para evitar que las cimbras permanezcan adheridas al concreto. Pueden haber manchas de mortero provenientes de fugas de las cimbras, o pueden existir manchas de óxido. Las superficies planas también pueden decolorarse durante la construcción. Cuando la apariencia sea importante, todas las superficies deberán limpiarse después de que la construcción haya progresado hasta que no se produzcan decoloraciones provocadas por actividades posteriores.

Existen tres técnicas para limpiar superficies de concreto: con agua, mediante medios químicos, y mediante medios mecánicos (abrasión). El agua disuelve el polvo y lo enjuaga de la superficie. Los productos limpiadores químicos, normalmente mezclados con agua, reaccionan con el polvo separándolo de la superficie, para ser posteriormente lavados; tanto el polvo como los productos químicos se eliminan por medio de agua. Los métodos mecánicos - de los cuales el más usado es la limpieza con chorro de arena - retiran el polvo mediante abrasión.

Antes de seleccionar algún método de limpieza, éste deberá probarse en alguna zona para asegurarse que será útil y no perjudicial. De ser posible, las características de las decoloraciones se deberán identificar pues algunos tratamientos son más efectivos que otros para remover ciertos materiales.

Los métodos de limpieza con agua incluyen los lavados de baja presión, la limpieza a chorro de agua con presiones que varían de moderadas a altas, y la limpieza con vapor. El lavado de baja presión es el método más sencillo, y sólo requiere que el agua corra suavemente por la superficie del

concreto durante uno o dos días. Después el polvo ya reblandecido se retira por medio de un enjuague con chorro a una presión ligeramente mayor. Las zonas persistentes se pueden restregar con un cepillo de cerdas no metálicas para posteriormente volverlas a enjuagar. La limpieza con chorro de agua a alta presión puede ser aprovechada de manera efectiva si se cuenta con operadores experimentados. La limpieza con vapor debe ser ejecutada por operadores hábiles empleando equipo especial. Los métodos de limpieza con agua son los menos dañinos al concreto, no obstante, no se pueden descartar ciertos problemas potenciales. Podrían ocurrir daños severos si la superficie de concreto, estando aún mojada, llegara a exponerse a temperaturas de congelación; y el agua podría acarrear sales solubles a la superficie, formando un depósito blanco, con apariencia de yeso, mejor conocido como eflorescencia.

La *limpieza química* normalmente se efectúa con mezclas cuya base es el agua formuladas para materiales específicos, tales como el ladrillo, la piedra y el concreto. En la mayoría de limpiadores químicos se incluye un compuesto orgánico denominado surfactante (superficie-agente activo), el cual actúa como detergente para humedecer la superficie con mayor facilidad. Va incluida una pequeña cantidad de ácido o de álcali con el propósito de separar el polvo de la superficie. Por ejemplo, el ácido clorhídrico (muriático) se usa comúnmente para limpiar muros de mampostería y para remover eflorescencias. Pueden llegar a producirse problemas relacionados con el uso de los limpiadores químicos. Sus propiedades ácidas o alcalinas pueden llevar a una reacción entre el limpiador y el concreto, al igual que con el mortero, con las superficies pintadas, con el vidrio, con los metales, y con un sinnúmero de otros materiales para construcción. Como los limpiadores químicos se utilizan en forma de soluciones diluidas en agua, también pueden liberar sales solubles del interior del concreto y acabar formando eflorescencias. Ciertos productos químicos también pueden llegar a dejar a los agregados expuestos en el concreto. Entre los productos químicos que se emplean más comúnmente para limpiar las superficies de concreto y para remover las decoloraciones se incluyen las soluciones débiles (con concentraciones de 1 a 10%) de ácidos clorhídrico, acético, o fosfórico. El citrato diamónico (como solución en agua de 20 a 30%) es especialmente útil para remover manchas de decoloraciones y eflorescencias en las superficies manchadas y de trabajos en plano. Los productos químicos deberán ser manejados por operadores hábiles que mantengan siempre precauciones adecuadas de seguridad.\*\*

La *limpieza mecánica* (Fig. 9-9) incluye a la limpieza con chorro de arena, con chorro de perdigones, la escarificación, el burilado mecánico, y el esmerilado. Estos métodos desgastan el polvo existente en la superficie en vez de separarlo de ella. De hecho destruyen el polvo y también parte de la superficie del concreto; es inevitable una cierta pérdida de detalles decorativos, un aumento de la rugosidad de la superficie, y el redondeo de las esquinas agudas. Los métodos abrasivos también pueden revelar defectos (vacíos) escondidos justo debajo de la superficie producto del descimbrado.

\* Consulte la Referencia 1-15, página 398.

\*\* Consulte las Referencias 9-1 y 9-20 para mayor información.

Las limpiezas química y mecánica pueden tener cada una un efecto de desgaste sobre la superficie de concreto de tal toma que llegue a cambiar la apariencia de una cierta superficie al compararla con otra superficie contigua sin limpiar.

## Acabado de superficies como se obtienen de la cimbra

Muchas superficies de concreto producto del descimbrado requieren poco o ningún tratamiento adicional cuando han sido construidas con revestimientos de cimbras o con materiales de cimbra adecuados. Estas superficies se dividen en dos clases comunes: lisas y texturizadas o moldeadas. Las superficies lisas se producen con cimbras forradas con plásticos, con cimbras de acero, con cimbras de plástico reforzadas con fibra de vidrio, con cimbras de fórmica o con cimbras de tableros-templados. Las superficies texturizadas o moldeadas se obtienen con madera aserrada toscamente, con clases o texturas especiales de madera contrachapada (laminada), con revestimientos de cimbras, o fracturando las salientes de una superficie estriada.

Los acabados de concreto aparente pueden, si se ha especificado, requerir parches en los agujeros y en los defectos, aunque de otra manera las superficies no necesitan trabajo posterior porque la textura y el acabado la dan las cimbras mismas.

Para un acabado liso al retirar la cimbra, es importante preparar el material de cimbra que se empleará en la cara lisa, así como los separadores siguiendo un patrón simétrico. Las cimbras de acabado liso deberán estar apuntaladas por pies derechos y por largueros que sean capaces de evitar las deflexiones excesivas.

Un acabado liso con tratamiento abrasivo se produce en una superficie de concreto recién endurecido antes de que se cumpla un día de haber retirado la cimbra. Las cimbras se retiran y el parchado necesario se completa lo más pronto posible. Después la superficie se humedece y se frota con un ladrillo carborundo o con algún otro abrasivo hasta que se produzca un color y una textura satisfactoriamente uniformes.

Un acabado por llana de madera con adición de arena también se puede producir en las superficies de concreto recién endurecido. Pasando un tiempo no mayor de 5 a 6 horas después de la remoción de las cimbras, la superficie deberá ser humedecida perfectamente y frotada con una llana de madera siguiendo un movimiento circular, aplicando arena húmeda en la superficie hasta que el acabado que resulte sea parejo y uniforme en cuanto a su color y textura.

Una limpieza con mortero (acabado frotado con arpillera) se puede emplear para impartir un color y una apariencia uniformes a una superficie lisa. Después de haber reparado los defectos, la superficie deberá saturarse perfectamente con agua y mantenerse húmeda durante las operaciones de lechadeado. Un mortero hecho con 1 parte de cemento, 1 1/2 a 2 partes de arena fina, y con la cantidad de agua suficiente para obtener una consistencia espesa y cremosa se deberá aplicar uniformemente por medio de un cepillo, o de una plana de yesero para rellenar completamente las burbujas de aire y los agujeros.

La superficie deberá ser aplanada vigorosamente con una llana de madera, con una esponja de hule, o con una llana con cara de corcho inmediatamente después de haber aplicado el mortero para rellenar cualquier agujero pequeño que hubiera quedado y para retirar parte del exceso de mortero. El exceso

de mortero restante deberá ser raspado con una llana con cara de esponja. Si la llana extrae mortero de los agujeros, se puede corregir esa dificultad por medio de un movimiento de aserrado con la llana. Al mortero que queda en la superficie se le puede dejar sin perturbar hasta que pierda algo de su plasticidad pero no su apariencia húmeda. Entonces se deberá frotar la superficie con yate limpio y seco para retirar el exceso de mortero. Todos los agujeros deberán permanecer rellenos, y no quedará ninguna película visible de mortero después del frotado. Cualquier sección que se vaya a limpiar con mortero deberá ser trabajada en un día, pues un mortero que permanezca sobre la superficie toda la noche es demasiado difícil de retirar.

Si es posible, el trabajo se deberá ejecutar a la sombra y de preferencia con clima fresco y húmedo. En climas secos o cálidos, se puede mantener húmedo al concreto con un rocío de agua muy fino.

La superficie ya terminada deberá someterse a curado manteniendo el área húmeda durante 36 horas después de la limpieza. Al quedar completamente seca, la superficie deberá tener un color y una textura uniformes.

## ACABADOS SUPERFICIALES ESPECIALES

### Agredado Expuesto

Los métodos para dejar expuesto al agredado en los concretos cimbrados incluyen al lavado y cepillado, al uso de retardantes y lavado, a la limpieza a chorro abrasiva, y al labrado o esmerilado.\*

En el lavado y cepillado, la capa superficial de mortero deberá ser deslavada cuidadosamente con un rocío ligero de agua y cepillada hasta que se logre la exposición deseada.

Con el método del retardante generalmente debe usarse un aditivo retardante que no sea soluble al agua. La capa superficial de mortero con retardante se deslava por medio de un rocío ligero de agua y de un cepillado. Cuando el concreto se haya vuelto demasiado duro para producir el acabado requerido con un deslavado normal, se puede utilizar ácido clorhídrico diluido.

La limpieza a chorro abrasiva se aplica mejor en un concreto con agregados con granulometría discontinua. La manguera deberá sostenerse perpendicularmente a la superficie y esta deberá ser desgastada hasta una profundidad máxima de aproximadamente un tercio del diámetro del agregado grueso.

También se puede utilizar la limpieza a chorro con agua para texturizar la superficie de un concreto endurecido, especialmente cuando los reglamentos locales prohíben el uso de limpieza a chorro con arena por razones ambientales. Los chorros de agua de alta presión se emplean sobre las superficies sin importar que hayan sido tratadas o no con retardantes.

\* Referencias 9-5 y 9-12.

Con el labrado o martelinado se remueve una capa de concreto endurecido y el agregado se fractura en la superficie. Las superficies logradas pueden variar desde un descascamiento ligero hasta una textura escarpada y profunda obtenida por martillo perforador con un cincel de una punta. Se pueden utilizar peines y puntas múltiples para producir acabados similares a los que se usan al cortar piedra.

El esmerilado deberá efectuarse en varios pasos sucesivos, cada uno con un esmeril más fino que el que le precedió. Un compuesto pulidor y un raspador se pueden usar entonces para dar un acabado rastrillado.

## Pinturas y recubrimientos claros

Se pueden aplicar a las superficies de concreto muchos tipos de pinturas y de recubrimientos claros. Entre ellas, las principales pinturas que se utilizan son las pinturas con cemento portland como base, las pinturas con cemento portland modificadas con látex, y las pinturas de látex (acrílicas y de acetato de polivinilo).\*

Las pinturas a base de cemento portland se pueden utilizar ya sea para exposición en interiores o en exteriores. La superficie del concreto deberá estar húmeda en el momento de la aplicación y cada recubrimiento deberá ser humedecido tan pronto como haya sido aplicado sin que se perturbe la pintura. El curado húmedo de una pintura de cemento portland convencional es esencial. En las superficies de textura abierta, como lo es la mampostería de concreto, la pintura deberá aplicarse con cepillos de cerdas duras, como los cepillos de fregar. La pintura deberá penetrarse bien en la superficie. Para un concreto con una superficie lisa o arenosa, son mejores los cepillos de lechada tipo holandés o los cepillos de blanquear.

Los materiales de látex que se emplean en las pinturas de cemento portland modificadas con látex retardan la evaporación, reteniendo con ello la cantidad de agua necesaria para la hidratación del cemento portland. Con las pinturas modificadas con látex el curado húmedo no es necesario.

La mayoría de pinturas de látex son resistentes a los álcalis y se pueden aplicar al concreto nuevo después de 10 días en un clima muy seco. El método de aplicación preferido es por medio de cepillos de fibras largas de nylon de 10 a 15 cm de ancho. Sin embargo, la aplicación también se puede ejecutar por medio de rodillos o de rociado. Las pinturas se pueden aplicar a superficies mojadas, aunque no con agua libre en la superficie, y si la superficie es regularmente porosa o si prevalecen condiciones extremadamente secas, se recomienda mojar con anterioridad la superficie.

Los recubrimientos claros se utilizan frecuentemente sobre las superficies de concreto para evitar el manchado o la decoloración del concreto debido a la contaminación del aire, y se utilizan también para facilitar la limpieza de una superficie si se llega a ensuciar, para aclarar el color de los agregados, y para convertir a la superficie en repelente al agua evitando con ello que ocurran cambios de color debido a la absorción del agua. Los mejores recubrimientos a menudo consisten de formas de metil metacrilato de resina acrílica, como lo indica la evaluación practicada en un laboratorio a varios recubrimientos comerciales claros.\*\* Los recubrimientos de metil metacrilato deberán tener una mayor

viscosidad y un mayor contenido de sólidos cuando se apliquen sobre un concreto liso, pues la apariencia original de un concreto liso es más difícil de conservar que la apariencia original de un concreto con agregado expuesto.

Otros materiales, como lo son la nueva generación de selladores-penetradores de silanos y de siloxanas, están adquiriendo uso como repelentes de agua para concretos arquitectónicos.

## COLOCACION DE CONCRETO BAJO EL AGUA

Siempre que sea posible, el concreto deberá colocarse en seco en vez de bajo el agua. Cuando se tenga que colocar bajo el agua, el trabajo deberá realizarse contando con una supervisión experimentada. Los principios básicos para el trabajo de concreto normal en seco se pueden aplicar, con sentido común, a las operaciones de concreto bajo el agua. Sin embargo, deberán observarse los siguientes puntos especiales:

El revenimiento del concreto no deberá ser mayor que 12.5 cm, y el contenido de cemento no deberá ser menor de 385 kg por metro cúbico. Es importante que el concreto fluya sin segregación; de ahí que el enfoque al efectuar el proporcionamiento sea el de obtener una mezcla cohesiva con una alta trabajabilidad. El uso de agregados redondeados, de un porcentaje más elevado de finos, y de aire incluido ayudaría a obtener la consistencia deseada.

Entre los métodos para colocar concreto bajo el agua se incluyen los siguientes: tubo-embudo (tubo tremie), bomba de concreto, cubetas de vaciado por el fondo, inyección de lechada a agregados precolocados, sacos con fijador atravesado, obras con sacos y campana de buzo.

El tubo-embudo es un tubo liso, recto, lo suficientemente largo para alcanzar el punto más inferior que se vaya a colar desde una plataforma de trabajo sobre el agua. En la parte superior del tubo se fija una tolva. El extremo inferior del tubo deberá conservarse enterrado en el concreto fresco a fin de mantener un sello y de forzar que el concreto fluya hasta su posición por medio de la presión. El colado deberá ser continuo con la menor perturbación posible del concreto anteriormente colado. La superficie superior deberá mantenerse tan nivelada como sea posible.

El desarrollo de la bomba móvil para concreto con un cañón de radio variable ha facilitado grandemente la labor de colar concreto por debajo del agua.

Los cucharones de descarga por el fondo varían en cuanto a sus formas y capacidades. Las compuertas para la abertura del fondo son operadas por algún buzo o por medio de un cable de descarga desde la superficie. La parte superior del cucharón deberá estar cerrada con alguna cubierta de lona para proteger al concreto contra cualquier daño mientras se le hace descender.

La inyección de lechada de cemento a los agregados precolocados ofrece ciertas ventajas al colar concretos bajo corrientes de agua.

\* Referencia 9-8.

\*\* Referencia 9-3.

Los sacos con fijador atravesado son sacos de lona reutilizables, con forma de salchicha, que se rellenan de concreto y se hacen descender hasta donde se encuentran los buzos. En los extremos superior e inferior un nudo corredizo o una cadena con un fijador atravesado permiten la fácil descarga y llenado del saco.

Los sacos de arena a medio llenar con concreto plástico se pueden emplear en los trabajos pequeños, relleno de huecos o como obra temporal. El extremo amarrado no deberá dar hacia el exterior.

## TECNICAS DE COLADO ESPECIALES

El concreto se puede colocar por medio de métodos distintos al método habitual de colado en el lugar. Tales métodos, como lo es el concreto lanzado, se describen en el Capítulo 15. No importa que método se emplee, los fundamentos sobre mezclado, colocación, consolidación y curado son aplicables a todos los morteros y concretos de cemento portland.

## PRECAUCIONES

Siempre que se trabaje con el concreto fresco se deberá tener el cuidado de evitar irritaciones en la piel o quemaduras químicas que puedan suceder por el contacto prolongado entre el concreto y las superficies de la piel, los ojos y la ropa.

Existen tres causas de irritación de piel o de quemaduras químicas por el contacto prolongado con el concreto fresco.

1. El cemento portland es alcalino por naturaleza, y por lo tanto es caústico.
2. El cemento portland es higroscópico - tiende a absorber la humedad de la piel.
3. La arena que contiene el concreto fresco es abrasiva a la piel descubierta.

No se debe dejar que la ropa se sature con la humedad procedente del concreto pues la ropa saturada puede transmitir los efectos alcalinos o higroscópicos a la piel. Se deberán usar guantes impermeables, una camisa de manga larga, y pantalones largos. Si llega a ser necesario permanecer en el concreto fresco mientras se está colando, se deberán usar botas de hule lo suficientemente largas para impedir que el concreto inunde su interior.

Al trabajar un acabado en el concreto, se deberán emplear almohadillas impermeables entre las superficies del concreto y las rodillas, codos, manos, y demás. Las partes de la ropa que se lleguen a saturar por el contacto con el concreto fresco se deberán enjuagar pronto con agua limpia para evitar el contacto continuo con la piel. Los ojos o las partes de la piel que entren en contacto con el concreto fresco deberán lavarse minuciosamente con agua limpia. Las irritaciones leves de la piel se pueden aliviar aplicando alguna crema con lanolina en el área irritada luego de haberse lavado. Las molestias persistentes o severas deberán ser atendidas por un médico.

## REFERENCIAS

- 9-1. Greening, N. R., and Landgren, R., *Surface Discoloration of Concrete Flatwork*, Research Department Bulletin RX203, Portland Cement Association, 1966.
- 9-2. Colley, B. E., and Humphrey, H. A., *Aggregate Interlock at Joints in Concrete Pavements*, Development Department Bulletin DX124, Portland Cement Association, 1967.
- 9-3. Litvin, Albert, *Clear Coatings for Exposed Architectural Concrete*, Development Department Bulletin DX137, Portland Cement Association, 1968.
- 9-4. Turner, C. D., "Unconfined Free-Fall of Concrete," *Journal of the American Concrete Institute*, American Concrete Institute, Detroit, December 1970, pages 975-976.
- 9-5. *Bushhammering of Concrete Surfaces*, IS051A, Portland Cement Association, 1972.
- 9-6. *Subgrades and Subbases for Concrete Pavements*, IS029P, Portland Cement Association, 1975.
- 9-7. *Bonding Concrete or Plaster to Concrete*, IS139T, Portland Cement Association, 1976.
- 9-8. *Painting Concrete*, IS134T, Portland Cement Association, 1977.
- 9-9. Hurd, M. K., *Formwork for Concrete*, SP-4, American Concrete Institute, 1979.
- 9-10. *Finishing Concrete Slabs, Exposed Aggregate, Patterns, and Colors*, IS206T, Portland Cement Association, 1979.
- 9-11. *Bridge Deck Renewal with Thin-Bonded Concrete Resurfacing*, IS207E, Portland Cement Association, 1980.
- 9-12. *Color and Texture in Architectural Concrete*, SP021A, Portland Cement Association, 1980.
- 9-13. *Roller Compacted Concrete*, ACI 207.5R-80, ACI Committee 207 Report, American Concrete Institute, 1980.
- 9-14. *Guide for Concrete Floor and Slab Construction*, ACI 302.1R-80, ACI Committee 302 Report, American Concrete Institute, 1980.
- 9-15. *Concrete Basements for Residential and Light Building Construction*, IS208B, Portland Cement Association, 1980.
- 9-16. *Joint Design for Concrete Highway and Street Pavements*, IS059P, Portland Cement Association, 1980.
- 9-17. *Resurfacing Concrete Floors*, IS144T, Portland Cement Association, 1981.
- 9-18. *Building Movements and Joints*, EB086B, Portland Cement Association, 1982.
- 9-19. *Standard Practice for Consolidation of Concrete*, ACI 309-72, revised 1982, ACI Committee 309 Report, American Concrete Institute.
- 9-20. *Removing Stains and Cleaning Concrete Surfaces*, IS214T, Portland Cement Association, 1982.
- 9-21. *Joints in Walls Below Ground*, CR059T, Portland Cement Association, 1982.
- 9-22. *Concrete Floors on Ground*, EB075D, Portland Cement Association, 1983.
- 9-23. "Why Concrete Walls Crack," *Concrete Technology Today*, PL842B, Portland Cement Association, June 1984.

- 9-24. "Joints to Control Cracking in Walls," *Concrete Technology Today*, PL843B, Portland Cement Association, September 1984.
- 9-25. "Sealants for Joints in Walls," *Concrete Technology Today*, PI844B, December 1984.
- 9-26. *Recommended Practice for Concrete Formwork*, ACI 347-78, reaffirmed 1984, ACI Committee 347 Report, American Concrete Institute.
- 9-27. Kosmatka, Steven H., "Repair with Thin-Bonded Overlay," *Concrete Technology Today*, PL851B, Portland Cement Association, March 1985.
- 9-28. *Guide for Measuring, Mixing, Transporting and Placing Concrete*, ACI 304-85, ACI Committee 304 Report, American Concrete Institute, 1985.
- 9-29. Kosmatka, Steven H., "Floor-Covering Materials and Moisture in Concrete," *Concrete Technology Today*, PI853B, Portland Cement Association, September 1985.
- 9-30. *Specifications for Structural Concrete for Buildings*, ACI 301-84, revised 1985, ACI Committee 301 Report, American Concrete Institute.
- 9-31. *Concrete Slab Surface Defects: Causes, Preventions, Repair*, IS177T, Portland Cement Association, 1987.
- 9-32. *Cement Mason's Guide*, PA122H, Portland Cement Association, 1971, revised 1987.

## CAPITULO 10

# Curado del Concreto

El curado consiste en el mantenimiento de contenidos de humedad y de temperaturas satisfactorios en el concreto durante un período definido inmediatamente después de la colocación y acabado, con el propósito que se desarrollen las propiedades deseadas. Nunca se exagerará al enfatizar la necesidad de un curado adecuado. El curado tiene una gran influencia sobre las propiedades del concreto endurecido como lo son durabilidad, resistencia, hermeticidad, resistencia a la abrasión, estabilidad volumétrica, y resistencia a la congelación y deshielo y a las sales para descongelar. Las superficies sujetas a la exposición son especialmente sensibles al curado, pues el desarrollo de la resistencia en la superficie puede llegar a reducirse de manera importante cuando el curado es defectuoso.

Al mezclar cemento portland con agua, se lleva a cabo la reacción química denominada hidratación. El grado hasta el cual esta reacción se llegue a completar, influye en la resistencia, la durabilidad y en la densidad del concreto. La mayoría de los concretos frescos contienen una cantidad de agua considerablemente mayor a la requerida para que tenga lugar la hidratación completa del cemento; sin embargo, cualquier pérdida de agua apreciable por evaporación o por otra manera retrasará o evitará la completa hidratación. Si la temperatura es favorable, la hidratación es relativamente rápida los primeros días después de haber colado el concreto; es importante que el agua sea retenida durante este período, es decir, que se impida o que al menos se reduzca la evaporación. Los objetivos del curado son por consiguiente:

1. Prevenir (o reaprovisionar) la pérdida de humedad del concreto
2. Mantener una temperatura favorable en el concreto durante un período definido

Con un curado adecuado, el concreto se volverá mas fuerte, impermeable, y resistente a los esfuerzos, a la abrasión, congelación y deshielo. La mejora es inmediata en las edades tempranas, aunque continúa dándose más lentamente durante un periodo indefinido. En la figura 10-1 se muestra el desarrollo de la resistencia con respecto a la edad para distintos periodos de curado.

El método de mayor efectividad para curar concreto depende de las circunstancias. Para la mayoría de los trabajos, el curado normal resulta adecuado, pero en algunos casos,

Resistencia a la compresión, porcentaje respecto a la resistencia a 28 días del concreto con curado húmedo

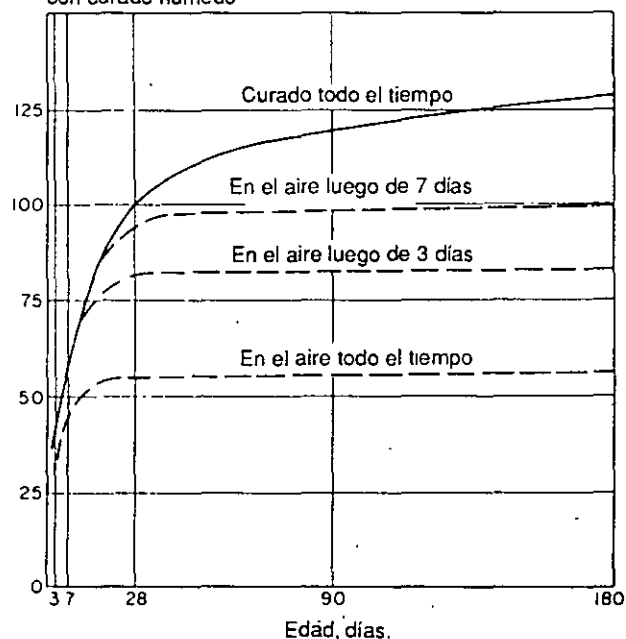


Figura 10-1. Incrementos de resistencia en el concreto con la edad mientras se cuente con humedad y temperatura favorables para la hidratación del cemento. Referencia 10-16.

como ocurre en los climas cálidos y en los climas fríos, se requiere de cuidados especiales.

Cuando se interrumpe el curado húmedo, el desarrollo de resistencia continúa presentándose durante un periodo corto y se detiene luego que la humedad relativa interna del concreto cae a aproximadamente 80%. Sin embargo, si el curado húmedo se reanuda, el desarrollo de resistencia será reactivado. Aunque se puede resaturar concreto en el laboratorio, es difícil hacerlo en el campo. Por eso lo mejor es curar continuamente al concreto desde el momento en que es colado hasta que haya adquirido la suficiente resistencia mecánica, impermeabilidad, y resistencia a la abrasión, a la congelación y al deshielo, y al ataque químico.

La pérdida de agua también va a provocar que el concreto se contraiga, creando así esfuerzos de tensión en el concreto. Si estos esfuerzos se presentan antes que el concreto haya adquirido la resistencia a la tensión adecuada, se podría tener como resultado agrietamientos superficiales. Todas las superficies expuestas, incluyendo los rebordes y las juntas que queden expuestas, deberán protegerse contra la evaporación de la humedad.

Cuando la temperatura del concreto es baja, la hidratación avanza a una velocidad mucho menor. Las temperaturas inferiores a los 10°C son desfavorables para el desarrollo de la resistencia a edad temprana; debajo de los 4.5°C el desarrollo de la resistencia a edad temprana se retrasa en gran medida; y a temperaturas de congelación o por debajo de ellas, hasta los -10°C, el desarrollo de resistencia es mínimo o nulo.

En años recientes se ha introducido el concepto de madurez para evaluar el desarrollo de la resistencia cuando existe una variación en la temperatura de curado del concreto. La madurez se define como el producto de la edad del concreto y de su temperatura de curado promedio por encima de una cierta temperatura base. Para mayor información sobre este concepto, refiérase al Capítulo 12. Se deduce que debe protegerse al concreto de manera tal que su temperatura se mantenga favorable para la hidratación y que no se pierda humedad durante el periodo inicial de endurecimiento.

## MÉTODOS Y MATERIALES DE CURADO

El concreto puede mantenerse húmedo (y en ciertos casos a temperatura favorable) con el uso de tres métodos de curado:

1. Métodos que mantengan la presencia de agua de mezclado en el concreto durante el periodo inicial de endurecimiento. Entre éstos se incluye al estancamiento o inmersión, al rociado y a las cubiertas húmedas saturadas. Estos métodos proporcionan un cierto enfriamiento a través de la evaporación, lo cual es benéfico en climas cálidos.
2. Métodos que evitan la pérdida del agua de mezclado del concreto sellando la superficie. Esto se puede lograr cubriendo al concreto con papel impermeable o con hojas de plástico, o aplicando compuestos de curado que formen membranas.
3. Métodos que aceleren la ganancia de resistencia suministrando calor y humedad adicional al concreto. Esto se logra normalmente con vapor directo, serpentines de calentamiento, o cimbras o almohadillas calentadas eléctricamente.

El método o la combinación de métodos elegida dependerá de factores tales como la disponibilidad de los materiales de curado, el volumen y forma del concreto, las instalaciones de producción (en obra o en planta), la apariencia estética, y la economía.

### Estancamiento o inmersión

En las superficies planas tales como pavimentos y pisos, el concreto se puede curar por estancamiento. Se puede retener un tirante de agua por medio de bordos de arena o de tierra en el perímetro de la superficie de concreto. El estancamiento

es un método ideal para evitar la pérdida de humedad y también es efectivo para conservar una temperatura uniforme en el concreto. El agua de curado no deberá estar en 11°C más fría que el concreto, para evitar esfuerzos por temperatura que pudieran ser causa de agrietamientos. Como el estancamiento requiere de trabajo y supervisión considerables, el método solamente es empleado en los trabajos pequeños.

El método más completo de curado con agua consiste en la inmersión total del elemento de concreto ya terminado. Este método se utiliza comúnmente en el laboratorio para curar especímenes de prueba de concreto. Cuando la apariencia del concreto sea importante, el agua que se utilice para curar por estancamiento o inmersión deberá estar libre de sustancias que manchen o decoloren al concreto. El material utilizado para los bordos también podría decolorar al concreto.

### Rociado o aspersión

La aspersión o rociado continuo con agua es un método excelente de curado cuando la temperatura ambiente queda suficientemente por encima de la congelación y cuando la humedad es muy baja. Se debe aplicar una llovizna muy fina de manera continua a través de un sistema de boquillas o rociadores. Los rociadores ordinarios para césped resultan ser efectivos si se logra una buena cobertura y si el volumen de descarga de agua no tiene demasiada importancia. Las mangueras para regar el suelo son útiles para superficies que son verticales o casi verticales.

El costo del rociado puede ser una desventaja. El método requiere de una amplia fuente de abastecimiento y de una supervisión cuidadosa. Si el rociado o aspersión se hace en intervalos, se debe evitar que el concreto se seque entre las aplicaciones de agua, porque los ciclos alternos de saturación y secado pueden ser causa de agrietamientos irregulares en la superficie. También se deben adoptar precauciones para evitar que se presente erosión en el concreto recién acabado provocada por el agua.

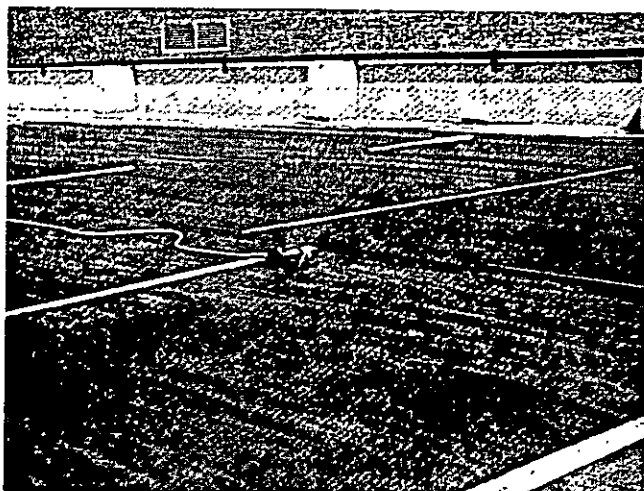
### Cubiertas húmedas

Las cubiertas de tela saturadas con agua, como la arpillera, las esteras de algodón, las esterillas, u otras telas que retengan la humedad, se utilizan comúnmente para el curado (Fig. 10-2). Ya se puede disponer de arpilleras tratadas que reflejan la luz y son resistentes al fuego y a la putrefacción. Los requisitos para las arpilleras se describen en la norma "Specification for Burlap Cloths Made from Jute or Kenaf" (American Association of State Highway and Transportation Officials M 182), y los requisitos para las mantas con arpillera blanca de polietileno se describen en la norma ASTM C 171.

La arpillera debe estar libre de encolados o de cualquier otra sustancia que sea dañina para el concreto o que cause decoloración. Las arpilleras nuevas deben ser enjuagadas a conciencia en agua para remover sustancias solubles y volverlas más absorbentes.

Las cubiertas de tela saturadas, capaces de retener la humedad, deberán colocarse tan pronto como el concreto haya endurecido lo suficiente para evitarle daños en su superficie. Se debe tener la precaución de cubrir toda la superficie incluyendo los bordes de las losas. Las cubiertas deben





**Figura 10-2.** Las arpilleras húmedas saturadas con agua son un método efectivo para el curado húmedo del concreto.

mantenerse húmedas de manera continua, de tal suerte que una película de agua permanezca sobre la superficie del concreto durante el periodo de curado. Con el empleo de rollos de polietileno sobre la arpillera se eliminará la necesidad de un riego continuo sobre la cubierta. Los ciclos alternos de saturación y secado durante el curado a edades tempranas pueden provocar agrietamientos irregulares en la superficie.

Las cubiertas húmedas de tierra, arena, o aserrín resultan ser efectivas para curar y regularmente son útiles en los trabajos pequeños.\* Se debe distribuir de manera uniforme una capa de aproximadamente 5 cm sobre la superficie del concreto previamente humedecida, la cual deberá mantenerse húmeda continuamente.

Para curar superficies planas, se puede usar paja o forraje. Si se utilizan, se les deberá colocar en una capa de al menos 15 cm de espesor, y deberán quedar fijos con malla de alambre, arpillera, o lonas impermeables para impedir que el viento las levante. La principal desventaja de las cubiertas de forraje, paja, aserrín, arena o tierra húmedos es que existe la posibilidad de decolorar al concreto.

### Papel impermeable

El papel impermeable para curar al concreto consiste en dos hojas de papel kraft (o de pulpa sulfítica), cementadas entre sí por un adhesivo bituminoso con fibras de refuerzo. Este papel, según la norma ASTM C 171, es un medio eficiente para curar las superficies horizontales y el concreto estructural que tenga una forma relativamente simple. Una ventaja de importancia de este método es que no se necesitan adiciones periódicas de agua. El curado con papel impermeable asegura una hidratación adecuada del cemento evitando la pérdida de humedad en el concreto (Fig. 10-3).

En cuanto el concreto haya endurecido lo suficiente para evitar daños en su superficie, deberá ser saturado completa-



**Figura 10-3.** El papel impermeable para curado es un medio eficiente para curar superficies horizontales.

mente y se le deberá colocar el papel con el mayor ancho con que se pueda contar. Los bordes de las hojas adyacentes deberán quedar traslapados aproximadamente unos 15 cm y estar sellados firmemente con arena, tabloncillos de madera, cinta adhesiva sensible a la presión, mastique o cola. Las hojas deberán ser ancladas con pesos para mantener un contacto estrecho con la superficie del concreto durante todo el periodo de curado.

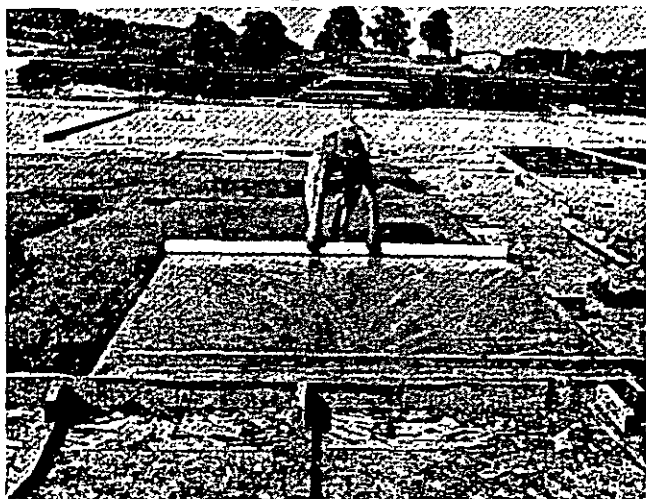
El papel impermeable puede ser reutilizado si efectivamente retiene a la humedad. Las rasgaduras y los agujeros se podrán reparar fácilmente con parches de papel de curado. Cuando se dude sobre el estado en que se encuentre el papel, se le puede seguir empleando utilizándolo ahora con espesor doble.

El papel impermeable le brinda una cierta protección al concreto contra los daños causados por la actividad constructiva subsecuente y contra los rayos solares directos. Deberá ser de color claro y no deberá manchar al concreto. Para curar concretos que queden en el exterior en climas cálidos es preferible usar papeles con superficies superiores de color blanco.

### Láminas de plástico

Las láminas de materiales plásticos, tales como los rollos de polietileno, pueden ser empleadas para curar al concreto (Fig. 10-4). Los rollos de polietileno constituyen una barrera efectiva de peso ligero contra la humedad, y se pueden aplicar

\* El aserrín proveniente de la mayoría de maderas resulta ser aceptable, no obstante, se deberá evitar el uso de maderas de roble y otras que contengan ácido tánico porque podrían ocasionar daños al concreto.



**Figura 10-4.** Para el curado del concreto los rollos de polietileno constituyen una barrera efectiva para la humedad y se pueden aplicar con la misma facilidad en formas complicadas o formas simples. Para minimizar la decoloración, los rollos se deberán mantener sobre las superficies del concreto lo más plano posible.

fácilmente en los elementos de formas simples o complejas. Su aplicación es igual a la descrita con el papel impermeable.

El curado por medio de rollos de polietileno (o con papel impermeable), puede provocar decoloraciones en ciertas zonas, especialmente si el concreto contiene cloruro de calcio y si se le ha dado el acabado con llana metálica. Esta decoloración es más pronunciada cuando la película se arruga, aunque es difícil y toma mucho tiempo colocar las hojas de material sin arrugas en los proyectos grandes. Se puede impedir esa decoloración inundando la superficie bajo la cubierta, no obstante, se deberán usar otros métodos de curado cuando la uniformidad de color sea importante.

Los rollos de polietileno deberán satisfacer la norma ASTM C 171, la cual especifica un espesor de 0.10 mm para curar al concreto y enlista solamente rollos opacos de colores claros y blancos. Sin embargo, se pueden conseguir rollos negros, mismos que bajo ciertas condiciones resultan ser satisfactorios. Los rollos blancos deberán emplearse para exteriores en los climas cálidos con el propósito de reflejar los rayos del sol. Los rollos negros se pueden usar en climas templados o en locaciones interiores. Los rollos de colores claros tienen poco efecto en lo que se refiere a absorción de calor.

La norma ASTM C 171 también incluye una lámina de material que consiste en arpillera con una película de polietileno opaco blanco adherida por un lado. Las combinaciones de rollos de polietileno unidas a telas absorbentes como la arpillera, ayudan a retener la humedad en la superficie del concreto.

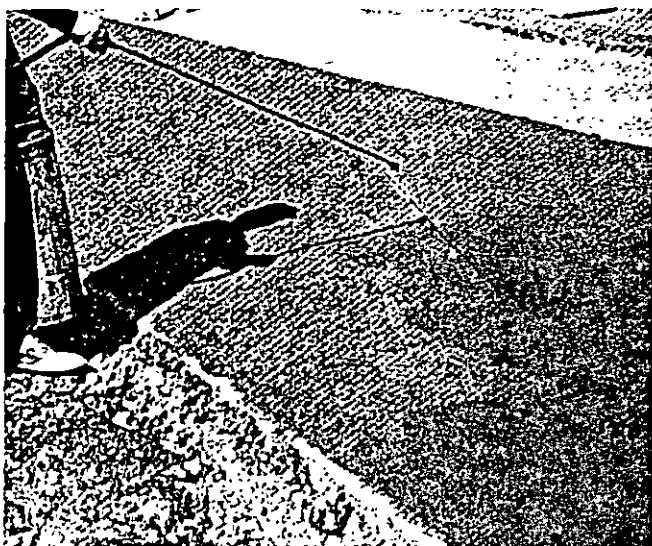
Los rollos de polietileno también se pueden colocar sobre la arpillera húmeda o sobre otros materiales húmedos para retener el agua en el material de recubrimiento. Este procedimiento elimina la necesidad de trabajo manual intenso para regar continuamente los materiales de la capa de recubrimiento.

## Compuestos para curado formadores de membranas

Los compuestos líquidos formadores de membranas a base de parafinas, resinas, hules clorados, y solventes de alta volatilidad se pueden usar para retardar o reducir la evaporación de la humedad del concreto. Son adecuados no solamente para curar concreto recién colocado, sino también para prolongar el curado luego de la remoción de las cimbras o después del curado húmedo inicial.

Los compuestos formadores de membranas de curado se pueden clasificar en dos tipos generales: 1) claros o translúcidos, y 2) pigmentados de blanco. Los compuestos claros o translúcidos pueden llegar a contener un tinte perecedero que facilita la revisión visual de la cobertura total de la superficie de concreto cuando se aplica el compuesto. El tinte se desvanece rápidamente después de haber sido aplicado. En los días cálidos y soleados, el uso de compuestos con pigmentos blancos reduce el aumento de calor provocado por el sol, reduciendo así la temperatura del concreto. Para impedir que el pigmento se asiente en el fondo, se debe agitar el recipiente que contenga los compuestos pigmentados.

Los compuestos de curado deberán ser aplicados con equipos rociadores operados manualmente o de propulsión mecánica inmediatamente después de haberle dado el acabado final al concreto (Fig. 10-5). La superficie del concreto normalmente deberá estar mojada al aplicar el recubrimiento. En los días secos y con viento, o durante los periodos en que las condiciones ambientales sean adversas y se puedan producir agrietamientos por contracción plástica, se ayudará a prevenir la formación de grietas con la aplicación de los compuestos de curado inmediatamente después del acabado final y antes que toda el agua libre en la superficie se haya evaporado. Se recomienda equipo rociador o propulsión mecánica para una aplicación uniforme de los compuestos de curado en los proyectos de pavimentación grandes. Las boquillas atomizadoras de tales equipos al igual



**Figura 10-5.** Para lograr un curado prolongado y efectivo, los compuestos líquidos formadores de membranas de curado se deberán aplicar sobre toda la superficie de concreto con una cobertura adecuada y uniforme.

que sus parabrisas deberán estar adaptados de forma tal que eviten la pérdida de compuesto de curado por la acción del viento.

Comúnmente sólo se aplica una capa llana y uniforme a razón de 3.7 a 4.9 m<sup>2</sup> por litro, aunque pueden llegar a ser necesarias dos capas para asegurar un recubrimiento completo y una protección efectiva. Cuando se utilice la segunda capa, deberá ser aplicada en ángulo recto (cuatrapeada), respecto a la primera. Se debe lograr un recubrimiento completo de la superficie pues aún los agujeros mas diminutos en la membrana permitirían la evaporación de una cierta humedad del concreto.

Los compuestos de curado pueden impedir la adherencia de los concretos endurecidos con los concretos recién colados o con otros materiales de superficie en los pisos. En consecuencia, no deberán ser usados cuando sea necesario un enlace subsecuente. Por ejemplo, no se deberá aplicar ningún compuesto de curado sobre la losa base de un piso que vaya a colarse en dos capas. De manera similar, algunos compuestos para el curado afectan la adhesión de pinturas o de materiales elásticos para pisos con los pisos de concreto. Se deberá consultar a los fabricantes de los compuestos para curado con el propósito de determinar si sus productos se encuentran dentro de esta categoría.

Los compuestos para curado deberán ser uniformes y fáciles de conservar en una solución completamente homogénea. No deben correrse, escurrirse en los vértices, o recolectarse en las ranuras. Deberán formar una película resistente capaz de soportar el tránsito de la construcción sin sufrir daños, no deberán amarillarse, y deberán tener buenas propiedades de retención de humedad.

Los compuestos de curado deberán satisfacer la norma ASTM C 309. En la norma ASTM C 156 se presenta la descripción de un método para determinar la eficiencia de los compuestos de curado, del papel impermeable, y de las láminas de plástico.

## Cimbras dejadas en su lugar

Las cimbras brindan una protección satisfactoria contra la pérdida de humedad si las superficies expuestas del concreto se conservan húmedas. Una manguera para regar suelos es excelente para lograr esto. Las cimbras se deberán dejar en el concreto el mayor tiempo posible.

Las cimbras de madera dejadas en la obra se deberán mantener húmedas ya sea por medio de riego, especialmente en los climas cálidos y secos. Si esto no se puede realizar, se deberán remover tan pronto esto sea práctico y se deberá comenzar sin ningún retraso algún otro método de curado.

## Curado al vapor

El curado al vapor resulta ventajoso en los casos en que sea importante contar con una mejora a edad temprana, en la resistencia del concreto o en los casos en que se requiera de una cantidad adicional de calor para completar la hidratación, como ocurre en los climas fríos.

Se usan dos métodos de curado al vapor: a) vapor vivo (o directo) a presión atmosférica (para estructuras encerradas, coladas en obra y para unidades grandes de concreto

prefabricado) y b) vapor a alta presión en autoclaves (para unidades manufacturadas pequeñas).

Un ciclo de curado al vapor consiste de (1) un retardo inicial antes de aplicar el vapor, (2) un periodo para elevar la temperatura, (3) un periodo para mantener constante la temperatura máxima, y (4) un periodo para disminuir la

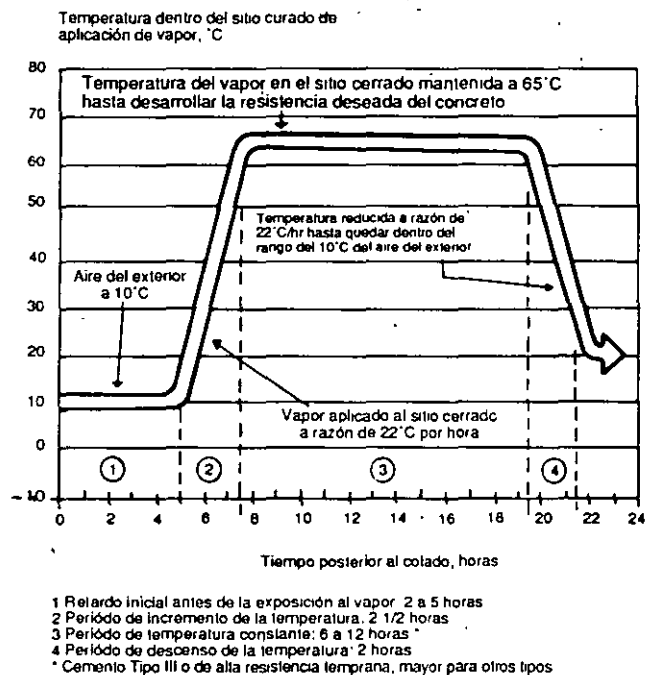


Figura 10-6. Un ciclo típico de curado atmosférico al vapor (idealizado).

temperatura. En la Fig. 10-6 se muestra un ciclo óptimo de curado al vapor a presión atmosférica.

El curado al vapor a presión atmosférica generalmente se efectúa en un sitio cerrado para minimizar las pérdidas de humedad y calor. Frecuentemente se utilizan lonas para formar el sitio cerrado. La aplicación del vapor en tal sitio se debe retardar dos horas por lo menos, después del colado final del concreto para permitir un cierto endurecimiento del concreto. Sin embargo, con un periodo de 3 a 5 horas de retraso antes de la exposición al vapor se logrará la máxima resistencia a edad temprana, como se muestra en la Fig. 10-7. La temperatura del vapor en el sitio cerrado se deberá mantener a aproximadamente 65°C hasta que se haya desarrollado la resistencia deseada del concreto. La resistencia no aumentará de manera significativa si se eleva la temperatura máxima del vapor de 65°C a 80°C. Se deben evitar temperaturas de curado al vapor superiores a 82°C; son antieconómicas y pueden dar como resultado una reducción indebida en la resistencia última. Aparte del incremento de la resistencia a edad

Resistencia a la compresión a 18 horas,  
porcentaje respecto de la resistencia a  
28 días con curado húmedo.

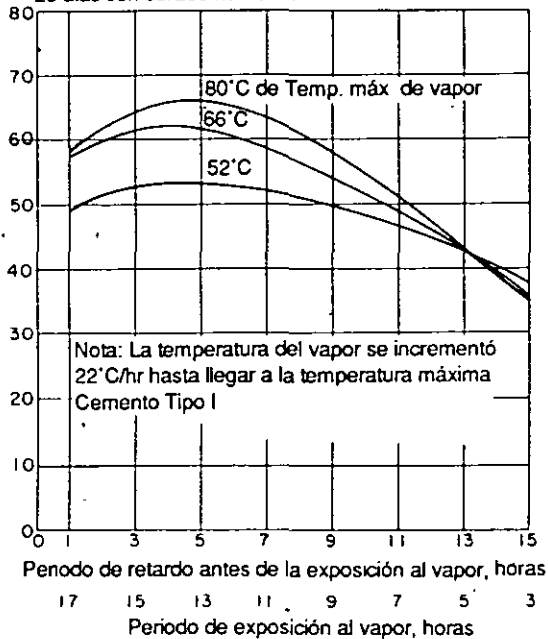


Figura 10-7. Relación entre la resistencia a las 18 horas de edad y el periodo de retardo antes de la exposición al vapor. En cada caso, el periodo de retardo mas el periodo de exposición al vapor totalizan 18 horas. Referencia 10-5.

temprana, otras ventajas de curar el concreto a temperaturas de alrededor de 65°C consisten en la reducción de la contracción por secado y de la fluencia en comparación con los concretos curados a 21°C durante 28 días.\*

Se deben evitar velocidades excesivas de calentamiento y de enfriamiento para evitar dañar a los elementos debido a cambios volumétricos. La temperatura en el sitio cerrado que rodea al concreto no deberá ser elevada o disminuída en más de 22°C a 33°C por hora dependiendo del tamaño y de la forma del elemento de concreto. La temperatura del concreto antes del colado se puede elevar hasta 60°C inyectando vapor directo a la mezcla junto con el agua de mezclado, haciendo innecesario tanto el retraso como el periodo de incremento de temperatura. Sin embargo, el tiempo de manejo puede reducirse.

La temperatura máxima de curado en el sitio cerrado deberá mantenerse constante hasta que el concreto haya alcanzado la resistencia deseada. El tiempo que se requiera dependerá de la temperatura del vapor y de la mezcla de concreto en el sitio cerrado.\*\*

El curado al vapor a alta presión en los autoclaves aprovecha temperaturas que varían de 163°C a 190°C y las correspondientes presiones manométricas de 5.6 a 12 kg/cm<sup>2</sup>. La hidratación se acelera grandemente y las elevadas temperaturas y presiones pueden producir reacciones químicas adicionales benéficas entre los agregados y los materiales cementantes que no ocurren con el curado al vapor a presión atmosférica. El curado con autoclave puede

producir en unas cuantas horas resistencias iguales a las que se obtienen en los concretos con curado húmedo durante 28 días a 21°C.

## Mantas o cubiertas aislantes

Cuando las temperaturas lleguen a caer por debajo de 0°C, se pueden utilizar capas de materiales secos y porosos, como la paja y el forraje, para proporcionar aislamiento contra la congelación del concreto.

La cimbra se puede aislar de manera económica con colchas comerciales o con aislantes de material fibroso cuyas cubiertas no permitan el escape de la humedad. Las colchas aislantes adecuadas están hechas de fibra de vidrio, hule-espónja, fibras de celulosa, lana de asbesto, esponja de vinilo, y esponja de poliuretano de celdas descubiertas. Cuando se usen cimbras aisladas, se deberá tener la precaución de asegurarse que las temperaturas del concreto no lleguen a ser excesivas.

Se pueden colocar alrededor de la estructura marcos con lonas, o con polietileno reforzado, u otros materiales que encierren el espacio y que puedan calentarse por medio de calentadores de espacio o de vapor.

El curado del concreto en climas fríos debe seguir las recomendaciones del Capítulo 12 y del reporte del comité ACI 306, "Cold-Weather Concreting", respecto al colado de concreto en climas fríos.

## Curado por métodos eléctricos, con aceite, y con rayos infrarrojos

Desde hace muchos años se dispone de métodos para curar normal y acelerado del concreto por medio de electricidad, aceite caliente, y rayos infrarrojos. Dentro de los métodos eléctricos se incluye una cierta variedad de técnicas: el uso del concreto mismo como conductor eléctrico, el uso del acero de refuerzo como elemento de calefacción, las mantas eléctricas, y el uso de las cimbras de acero calentadas eléctricamente (el método de mayor popularidad en los E.E.U.U., en la actualidad). La calefacción eléctrica es especialmente útil para los colados en climas fríos. A través de las cimbras de acero se puede hacer que circule aceite caliente para calentar al concreto. Los rayos infrarrojos han tenido un empleo limitado en el curado acelerado del concreto. El concreto que se cura por métodos con rayos infrarrojos queda normalmente bajo una cubierta o es encerrado en cimbras de acero. Los métodos de curado eléctricos, con aceite y con rayos infrarrojos se utilizan principalmente en la industria de elementos precolados.

## PERIODO DE CURADO Y TEMPERATURA

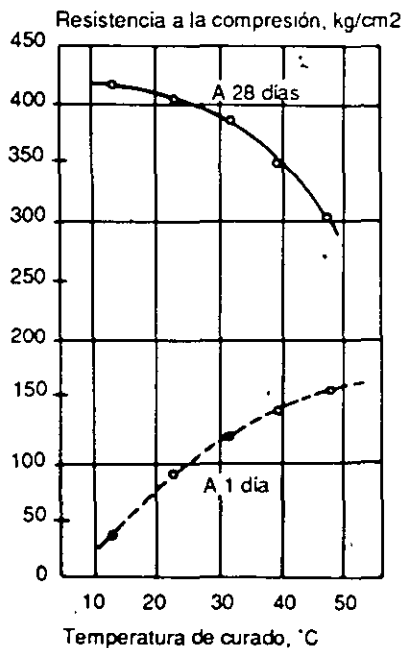
El periodo durante el cual se debe proteger al concreto contra la pérdida de humedad depende del tipo del cemento, de las proporciones de la mezcla, de la resistencia requerida, del

\* Referencia 10-4.

\*\* Consulte la Referencia 10-14 para contar con información referente a aplicaciones específicas del curado al vapor.

tamaño y forma del miembro de concreto, de las condiciones ambientales, y de las condiciones futuras de exposición. El periodo puede ser de 3 semanas o mayor para mezclas pobres de concreto empleadas en las estructuras masivas como lo son las presas; contrariamente, puede ser de sólo unos días para las mezclas ricas, especialmente si se ha empleado cemento Tipo III. Los periodos de curado al vapor normalmente son mucho menores, variando desde 3 horas hasta 3 días; aunque generalmente se emplean ciclos de 24 horas.

Como el curado mejora todas las propiedades deseadas en el concreto, el periodo de curado deberá ser tan largo como lo permitan las condiciones prácticas. Para las losas de concreto sobre el piso (pisos, pavimentos, revestimientos de canales, lotes de estacionamientos, calzadas, banquetas), y para el concreto estructural (columnas, losas, trabes, zapatas pequeñas, estribos, muros de contención, cubiertas de puentes y muros colados en el lugar), la longitud del periodo de curado para temperaturas ambientales superiores a 4°C deberá ser como mínimo de 7 días o el tiempo necesario para llegar al 70% de la resistencia especificada a la compresión o a la flexión. Una mayor temperatura de curado proporciona un aumento de resistencia del concreto a edad mas temprana que una temperatura baja, pero puede ser causa de que disminuya la resistencia a los 28 días, como lo muestra la Fig. 10-8. Si se desea llevar a cabo ensayos de resistencia para establecer el tiempo en el cual pueda detenerse el curado o en que se pueda descimbrar, se deberán elaborar en campo cilindros o vigas de concreto representativos, manteniéndolos adyacentes a la estructura o pavimento que representen, y utilizando los mismos métodos de curado: También se puede hacer uso de corazones, de cilindros removibles colados en el lugar y de pruebas no destructivas para determinar la resistencia de los miembros de concreto. El curado natural con temperaturas



**Figura 10-8.** La resistencia a un día de edad se incrementa con el aumento de la temperatura de curado, aunque la resistencia a los 28 días disminuye con dicho aumento de la temperatura de curado. Referencia 10-13.

por encima de 10°C (lluvia, neblina, humedad alta, relleno húmedo, etcétera) puede ser suficiente si equivale a mantener un concreto con cemento Tipo I húmedo durante 7 días, un concreto con cemento Tipo II húmedo durante 14 días, y un Tipo III húmedo durante 3 días.

Como la velocidad de hidratación se ve afectada por la composición y la finura del cemento, se deberá prolongar el periodo de curado en los concretos hechos con cementos que posean características referentes a desarrollos lentos de resistencia. En el caso de los concretos masivos (esclusas, estribos, cimentaciones densas, columnas masivas, trabes de transferencia, y espigones de gran volumen) que no contengan puzolana como parte del material cementante, el curado de los miembros sin refuerzo deberá continuar durante 2 semanas por lo menos. Si el concreto masivo llegara a contener alguna puzolana, el tiempo mínimo de curado para las secciones sin refuerzo deberá extenderse a 3 semanas. Las secciones de concreto masivo fuertemente reforzadas deberán curarse 7 días como mínimo.

Durante el clima frío a menudo se requiere una cantidad adicional de calor para mantener favorables las temperaturas de curado de 10°C a 21°C. Esto se puede lograr por medio de calentadores de combustión de gas o petróleo, o de serpentines calentadores o de vapor directo. En todos los casos se debe tener precaución para evitar la pérdida de humedad del concreto. Se deberá evitar la exposición del concreto fresco a los gases de salida de calentadores o de motores, porque se pueden producir daños en la superficie y levantamientos de polvo en los pisos de concreto (carbonataciones rápidas).

En los climas fríos se puede usar concreto de alta resistencia a edad temprana para acelerar el tiempo de fraguado y el desarrollo de la resistencia. Con ello es posible reducir el periodo de curado de 7 a 3 días, aunque se tiene que mantener en el concreto una temperatura mínima de 10°C durante 3 días.

Para obtener una resistencia adecuada contra los descascamientos provocados por los productos químicos descongelantes en el concreto, el periodo de curado mínimo deberá corresponder generalmente al tiempo requerido para desarrollar la resistencia de diseño del concreto. Antes de la aplicación de las sales descongelantes deberá transcurrir un periodo de secado al aire. Dicho periodo de secado deberá ser de un mes por lo menos.

## REFERENCIAS

- 10-1. Powers, T. C., *A Discussion of Cement Hydration in Relation to the Curing of Concrete*, Research Department Bulletin RX025, Portland Cement Association, 1948.
- 10-2. Lerch, William, *Plastic Shrinkage*, Research Department Bulletin RX081, Portland Cement Association, 1957.
- 10-3. Klieger, Paul, *Curing Requirements for Scale Resistance of Concrete*, Research Department Bulletin RX082, Portland Cement Association, 1957.
- 10-4. Klieger, Paul, *Some Aspects of Durability and Volume Change of Concrete for Prestressing*, Research Department Bulletin RX118, Portland Cement Association, 1960.

- 10-5. Hanson, J. A., *Optimum Steam Curing Procedure in Precasting Plants*, with discussion, Development Department Bulletin DX062 and DX062A, Portland Cement Association, 1963.
- 10-6. *Curing of Concrete, 1925-1960*. Bibliography 32, Highway Research Board, Washington, D.C., 1963.
- 10-7. *Curing of Concrete Pavements*, Current Road Problems No. 1-2R, Highway Research Board, May 1963.
- 10-8. Hanson, J. A., *Optimum Steam Curing Procedures for Structural Lightweight Concrete*, Development Department Bulletin DX092, Portland Cement Association, 1965.
- 10-9. ACI Committee 516 Report, "High Pressure Steam Curing: Modern Practice and Properties of Autoclaved Products," *Proceedings of the American Concrete Institute*, American Concrete Institute, Detroit, August 1965, pages 869-908.
- 10-10. Proudley, C. E., "Curing Materials," *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, STP 169-A, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1966, pages 522-529.
- 10-11. Greening, N. R., and Landgren, R., *Surface Discoloration of Concrete Flatwork*, Research Development Bulletin RX203, Portland Cement Association, 1966.
- 10-12. McCoy, W. J., "Mixing and Curing Water for Concrete," *Significance of Test and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, STP 169-A, American Society for Testing and Materials, 1966, pages 515-521.
- 10-13. Verbeck, George, J., and Helmuth, R. A., "Structures and Physical Properties of Cement Pastes," *Proceedings, Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement*, vol. III, The Cement Association of Japan, Tokyo, 1968, page 9.
- 10-14. *Accelerated Curing of Concrete at Atmospheric Pressure—State of the Art*, ACI 517.2R-80, ACI Committee 517 Report, American Concrete Institute, 1980.
- 10-15. *Hot-Weather Concreting*, ACI 305R-77, revised 1982, ACI Committee 305 Report, American Concrete Institute.
- 10-16. *Cold-Weather Concreting*, ACI 306R-78, revised 1983, ACI Committee 306 Report, American Concrete Institute.
- 10-17. *Standard Practice for Curing Concrete*, ACI 308-81, revised 1986, ACI Committee 308 Report, American Concrete Institute.

## CAPITULO 11

# Concreto en Climas Cálidos

Las condiciones ambientales de la obra - con clima cálido o frío, con viento o calma, con clima seco o húmedo - pueden diferir grandemente con respecto a las condiciones óptimas supuestas en el momento de especificar, diseñar o seleccionar una mezcla de concreto. El clima cálido puede crear ciertas dificultades en el concreto fresco, como lo son:

- una mayor demanda de agua
- pérdidas aceleradas de revenimiento
- velocidades de fraguado elevadas
- una mayor tendencia al agrietamiento plástico
- dificultades para controlar el aire incluido
- la necesidad definitiva de un curado inmediato

El hecho de agregar agua al concreto en la obra puede afectar adversamente a las propiedades y a la capacidad de servicio del concreto endurecido, teniéndose como efecto:

- una resistencia reducida
- una durabilidad e impermeabilidad reducida
- una apariencia no uniforme en la superficie
- una tendencia elevada a la contracción por secado

El trabajo se podrá ejecutar con tranquilidad solamente si, anticipándose a las condiciones de los climas cálidos, se toman las precauciones necesarias para atenuar estas dificultades.

### TOMA DE PRECAUCIONES

La temperatura más favorable para el concreto fresco es, en climas cálidos, menor que la que normalmente se obtiene sin enfriamiento artificial. Es deseable una temperatura de 10°C a 16°C, aunque esto no siempre es posible. Muchas especificaciones sólo exigen que cuando se coloque el concreto tenga una temperatura menor que 29°C ó que 32°C.

Para la mayoría de obras resulta impráctico limitar la temperatura máxima del concreto porque las circunstancias varían ampliamente. Un límite que pudiera servir adecuadamente en una obra podría ser excesivamente restrictivo en otra. Por ejemplo, el acabado con llana metálica hecho bajo un techo con muros exteriores se podría completar a una temperatura que podría causar dificultades si se colocara el mismo concreto en exteriores el mismo día.

Se deben anticipar los efectos que las temperaturas elevadas provocan en el concreto, y este se debe colocar a un límite de temperatura que permita los mejores resultados para las condiciones de los climas cálidos, probablemente entre los 24°C y los 38°C. El límite se deberá establecer para las condiciones prevalecientes en la obra teniendo como base mezclas de prueba hechas a la temperatura límite en vez de realizarlas a temperaturas ideales.

### EFFECTOS DE LAS TEMPERATURAS ELEVADAS EN EL CONCRETO

A medida que aumenta la temperatura del concreto, se presenta una pérdida en el revenimiento que a menudo se compensa con la poco recomendada práctica de agregar más agua en la obra. A mayores temperaturas se necesita una cantidad mayor de agua que la que se requiere a bajas temperaturas para mantener constante el revenimiento. La adición de agua sin agregar cemento acaba produciendo una mayor relación agua-cemento, disminuyendo en consecuencia la resistencia del concreto a cualquier edad y afectando adversamente otras propiedades del concreto endurecido. Esto se presenta, además del efecto adverso sobre la resistencia a edades tardías, debido a la mayor temperatura aún cuando no se le hubiera agregado más agua.

Como se muestra en la Fig. 11-1, si la temperatura del concreto fresco se eleva de 10°C a 38°C, se necesitan aproximadamente 20 kg de agua adicional por metro cúbico de concreto para mantener constante el revenimiento de 7.5 cm. Esta cantidad adicional de agua podría reducir la resistencia de 12 a 15% y producir valores de falla en los cilindros de prueba a compresión inferiores a la resistencia a compresión especificada ( $f'_c$ ).

La Fig. 11-2 muestra el efecto de las temperaturas iniciales elevadas en el concreto sobre la resistencia a la compresión. Las temperaturas del concreto en el momento de mezclado, colado, y curado fueron de 23°C, 32°C, 41°C y 49°C. Después de 28 días, todos los especímenes tuvieron un curado húmedo a 23°C hasta las edades de prueba al día 90 y al año de edad. Las pruebas, utilizando concretos idénticos de igual relación agua-cemento, muestran que mientras que las mayores temperaturas del concreto dan una resistencia a edad temprana mayor que el concreto a 23°C, a edades mayores las

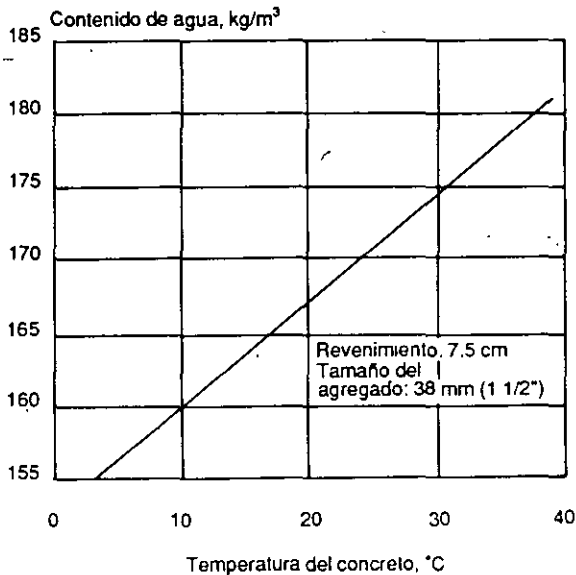


Figura 11-1. La cantidad necesaria de agua en una mezcla de concreto aumenta con el incremento en la temperatura del concreto. Referencia 11-6.

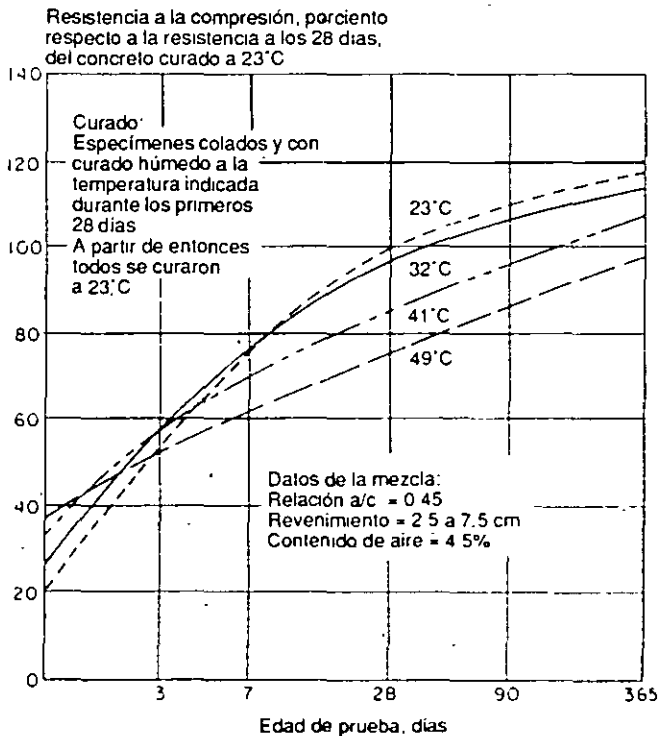


Figura 11-2. Efecto de las altas temperaturas en el concreto sobre la resistencia a la compresión a distintas edades. Referencia 11-3.

resistencias del concreto son inferiores. Si el contenido de agua se hubiera incrementado para mantener el mismo revenimiento, sin aumentar el contenido de cemento, la reducción de la resistencia habría sido aún mayor que la mostrada.

Aparte de reducir la resistencia y de elevar la cantidad necesaria de agua de mezclado, las temperaturas elevadas en el concreto fresco tienen otros efectos nocivos. El tiempo de

fraguado se reduce considerablemente, las temperaturas altas aumentan la velocidad de endurecimiento del concreto y acortan el período durante el cual se puede transportar, colocar y dar acabado al concreto. Un incremento de 11°C en la temperatura del concreto puede reducir el tiempo de fraguado 2 ó más horas (Fig. 11-3). El concreto deberá permanecer en estado plástico el tiempo suficiente para que cada capa se pueda colar sin que se desarrollen juntas frías ni discontinuidades en el concreto. Para compensar el efecto acelerante de la temperatura elevada, el uso de aditivos retar-

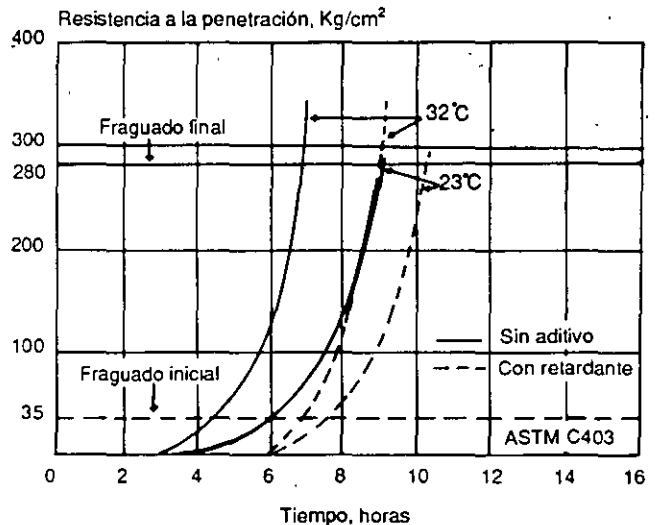


Figura 11-3. Efecto de la temperatura del concreto y del retardante sobre el tiempo de fraguado. Referencia 11-5.

dantes, ASTM C 494 Tipo B, puede ser de utilidad.

En los climas cálidos, la tendencia a la formación de grietas aumenta antes y después del endurecimiento. La evaporación rápida del agua del concreto fresco puede causar grietas de contracción plástica antes de que la superficie endurezca, esto se expone con mayor detalle más adelante en este capítulo. También se pueden desarrollar grietas en el concreto endurecido debido a una mayor contracción por secado ocasionada por un mayor contenido de agua, o a cambios volumétricos por temperatura en la superficie ocasionados por el enfriamiento.

La inclusión de aire también se ve afectada en los climas cálidos. A temperaturas elevadas se requiere de un incremento en la cantidad de aditivo inclusor de aire para producir un determinado contenido de aire.

Debido a los efectos perjudiciales de las temperaturas elevadas en el concreto, las operaciones en climas cálidos deben ser dirigidas con el propósito de mantener la temperatura del concreto lo más baja que sea factible.

## ENFRIAMIENTO DE LOS MATERIALES DEL CONCRETO

El método usual para enfriar concreto consiste en bajar la temperatura de sus materiales constituyentes antes de mezclarlos. Se debe enfriar uno o más de los ingredientes. En los climas cálidos tanto los agregados como el agua se deben mantener lo más frescos posible, pues estos materiales tienen



una mayor influencia en la temperatura después de haber sido mezclados que los otros componentes.

La contribución a la temperatura inicial del concreto que aporta cada material en la mezcla se relaciona con la temperatura, con el calor específico y con la cantidad del material. La Fig. 11-4 muestra gráficamente el efecto que la temperatura de los materiales tiene sobre la temperatura del concreto fresco. Resulta evidente que a pesar que la temperatura del concreto depende principalmente de la temperatura del agregado, se le pueda hacer descender de manera efectiva enfriando el agua de mezclado.

La temperatura aproximada del concreto se puede calcular a partir de las temperaturas de sus ingredientes empleando la siguiente ecuación:\*

$$T = \frac{0.22(T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w + T_{wa} W_{wa}}{0.22(W_a + W_c) + W_w + W_{wa}}$$

donde

- $T$  = temperatura del concreto fresco  
 $T_a, T_c, T_w$  y  $T_{wa}$  = temperatura de los agregados, cemento, agua de mezclado agregada, y agua libre en los agregados, respectivamente  
 $W_a, W_c, W_w$  y  $W_{wa}$  = peso de los agregados, cemento, agua de mezclado agregada, y agua libre en los agregados, respectivamente

En la Tabla 11-1A se muestra un ejemplo de los cálculos para estimar la temperatura inicial del concreto.

De todos los materiales en el concreto, el agua es el material más fácil de enfriar. Aunque se le utilice en menores cantidades que los demás ingredientes, el agua fría tendrá como efecto una reducción moderada en la temperatura del concreto. Se debe usar agua de mezclado que provenga de una fuente fría. Debe almacenarse en tanques que no estén expuestos directamente a los rayos del sol. Los tanques y las tuberías que conduzcan al agua de mezclado debe estar enterrados, aislados, sombreados, o pintados de color blanco a fin de mantener el agua a la menor temperatura posible. El agua se puede enfriar por refrigeración, nitrógeno líquido, o hielo. La Fig. 11-5 muestra una instalación de enfriamiento de agua por medio de nitrógeno líquido en una planta de concreto premezclado. El nitrógeno líquido también puede agregarse directamente dentro del tambor de un camión mezclador para bajar la temperatura del concreto. Se puede emplear hielo como parte del agua de mezclado siempre y cuando se funda totalmente para cuando se haya completado el mezclado. Cuando se utilice hielo triturado, se debe tener la precaución de almacenarlo a una temperatura que evite la formación de terrones.

Cuando se agrega hielo como parte del agua de mezclado, se debe considerar el efecto del calor de fusión del hielo, de modo que la ecuación para la temperatura del concreto fresco se modificará como sigue:

$$T = \frac{0.22(T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w + T_{wa} W_{wa} - 112W_i}{0.22(W_a + W_c) + W_w + W_{wa} + W_i}$$

donde  $W_i$  es el peso del hielo en kg.\*\*

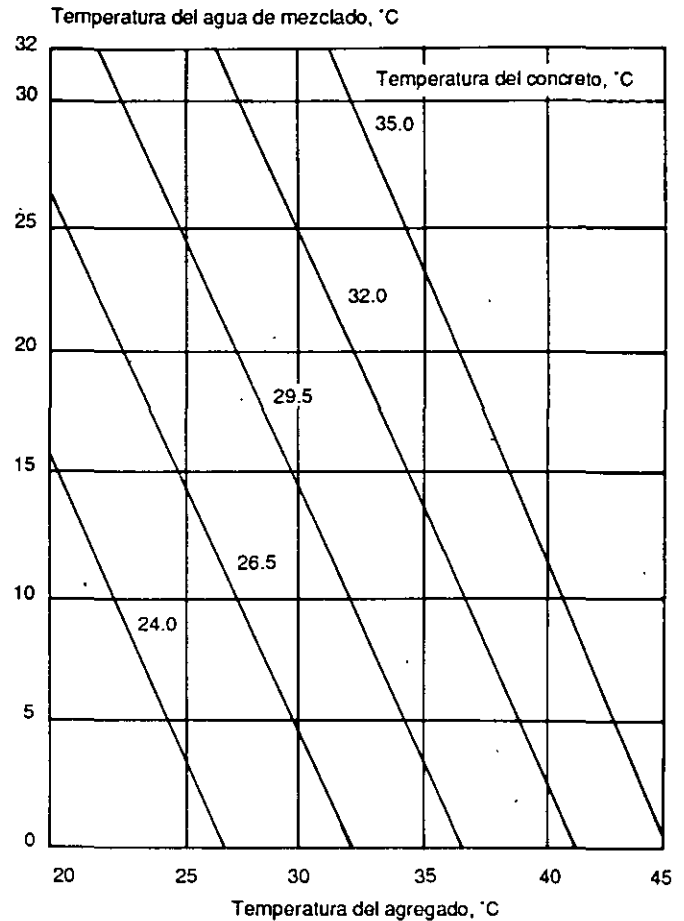


Figura 11-4. Temperatura de un concreto fresco tal como se ve afectada por la temperatura de sus ingredientes. A pesar que la gráfica está basada en la siguiente mezcla, es razonablemente exacta para otras mezclas típicas:

Agregado	1360 kg
Humedad en el agregado	27 kg
Agua de mezclado agregada	109 kg
Cemento a 65°C	256 kg

El calor de fusión del hielo es de 80 kilocalorías por kilogramo. Los cálculos de la Tabla 11-1B muestran el efecto que tienen 45 kg de hielo para reducir la temperatura de un metro cúbico de concreto. El hielo triturado o en copos es más efectivo que el agua fría para reducir la temperatura del concreto. La cantidad de agua y de hielo no deberá exceder la cantidad total requerida de agua de mezclado. La Fig. 11-6 muestra la carga de hielo en un camión mezclador antes de la adición de los demás materiales.

Los agregados tienen un efecto pronunciado en la temperatura del concreto fresco pues representan del 70 al 85% del peso total del concreto. Para bajar la temperatura del concreto 5°C se necesita solamente una reducción de 8°C en la temperatura de los agregados.

Existen varios métodos sencillos para mantener fríos los agregados. Los montones de agregado deben ponerse al

\* Referencia 11-4.

\*\* Referencia 11-4.

**Tabla 11-1.**

**A. Efecto de las temperaturas de los materiales sobre la temperatura inicial del concreto**

Material	Peso, W, kg/m <sup>3</sup>	Calor especifico relativo	Kilocalorías para variar la temperatura 1°C	Temperatura inicial del material, T, °C	Cantidad total de kilocalorías en el material
	(1)	(2)	(3) Col. 1 x Col. 2	(4)	(5) Col. 3 x Col. 4
Cemento	334 (Wc)	0.22	73.500	66 (Tc)	4851.000
Agua	167 (Ww)	1.00	167.000	27 (Tw)	4509.000
Agregado Total	1839 (Wa)	0.22	404.500	27 (Ta)	10921.500
			<u>645.000</u>		<u>20281.500</u>

$$\text{Temperatura inicial del concreto} = \frac{20282.340}{645.060} = 31.4^{\circ}\text{C}$$

Para lograr una reducción de 1°C en la temperatura inicial del concreto:

$$\text{La temperatura del cemento se debe disminuir} = \frac{645.060}{73.480} = 8.8^{\circ}\text{C}$$

$$\text{O la temperatura del agua se debe bajar} = \frac{645.060}{167.000} = 3.9^{\circ}\text{C}$$

$$\text{O la temperatura del agregado debe enfriarse} = \frac{645.060}{404.680} = 1.6^{\circ}\text{C}$$

**B. Efecto del hielo (45 kg/m<sup>3</sup>) sobre la temperatura del concreto**

Material	Peso, W, kg/m <sup>3</sup>	Calor especifico relativo	Kilocalorías para variar la temperatura 1°C	Temperatura inicial del material, T, °C	Cantidad total de kilocalorías en el material
	(1)	(2)	(3) Col. 1 x Col. 2	(4)	(5) Col. 3 x Col. 4
Cemento	334 (Wc)	0.22	73.500	66 (Tc)	4851.000
Agua	122 (Ww)	1.00	122.000	27 (Tw)	3294.000
Agregado Total	1839 (Wa)	0.22	404.500	27 (Ta)	10921.500
Hielo*	45 (Wi)	1.00	45.000	0 (Ti)	0.000
			<u>645.000</u>		
menos	45 (Wi) x calor de fusión, 80 kCal/kg =				<u>3600.000</u>
					<u>15466.500</u>

$$\text{Temperatura inicial del concreto} = \frac{15466.540}{645.000} = 24.0^{\circ}\text{C}$$

\* 0 Wi - 80 Wi = 80 Wi

abrigo del sol y mantenerse húmedos por aspersión. Como la evaporación es un proceso de enfriamiento, la aspersión proporciona un enfriamiento efectivo, especialmente cuando la humedad relativa es baja.

La aspersión de los agregados gruesos debe ajustarse para evitar producir variaciones excesivas en el contenido libre de humedad, lo que a su vez provocan una pérdida de uniformidad en el revenimiento. Otro método para enfriar los materiales es la refrigeración. Se puede sumergir a los agregados en tanques de agua fría, o se puede hacer circular aire frío a través de tolvas de almacenamiento. El enfriamiento al vacío puede reducir las temperaturas de los agregados a valores tan bajos como de 1°C.

La temperatura del cemento tiene un efecto secundario sobre la temperatura del concreto fresco debido al bajo calor específico del cemento y a la relativamente pequeña cantidad de cemento en la mezcla. Un cambio de 5°C en la temperatura del cemento generalmente modificará la temperatura del con-

creto tan sólo 0.5°C. Debido a que el cemento pierde calor lentamente durante su almacenamiento, podría estar caliente al ser entregado. Este calor se produce en la molienda del clínker de cemento durante la manufactura. Como la temperatura del cemento afecta en cierto grado a la temperatura del concreto fresco, algunas especificaciones colocan un límite a la temperatura del cemento para el momento en que se vaya a usar. La temperatura máxima que el ACI-305 recomienda para emplear el cemento en el concreto es de 77°C.\* Sin embargo, es preferible especificar una temperatura máxima para el concreto fresco en vez de colocar límites de temperatura para cada uno de los ingredientes.\*\*

\* Referencia 11-7, página 8

\*\* Para mayor información consulte la Referencia 11-1.

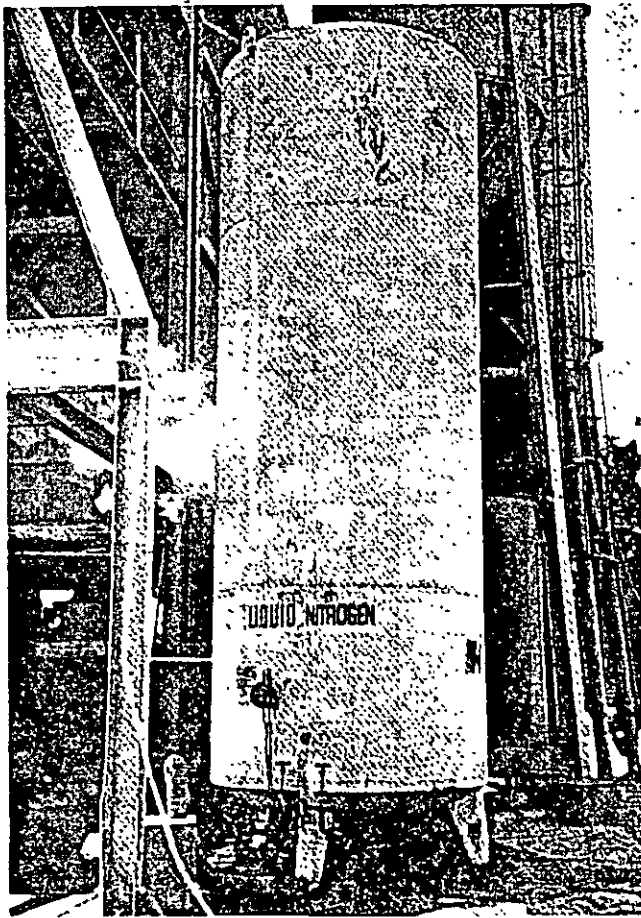


Figura 11-5. Instalación de enfriamiento de agua con nitrógeno líquido en una planta de concreto premezclado.

## PREPARACION ANTES DEL COLADO

Antes de colar concreto en climas cálidos, se deberán seguir ciertas precauciones para conservar o reducir su temperatura. Los mezcladores, canalones, bandas, tolvas, líneas de bombeo, y demás equipo para manejar concreto deberán estar protegidos a la sombra, pintados de color blanco, o cubiertos con mantas húmedas para reducir el calor provocado por el sol.

Las cimbras, el acero de refuerzo, y las subrasantes deberán rociarse con agua fría justo antes de colocar el concreto. El rociar el área durante las operaciones de colocación y acabado enfría las superficies de contacto y el aire circundante y aumenta su humedad relativa. Esto reduce el aumento de temperatura y minimiza la velocidad de evaporación del agua en el concreto después de su colocación. Para losas sobre el terreno, es buena práctica humedecer la subrasante la tarde anterior al colado. No deberá existir agua libre ni charcos sobre las cimbras o sobre las subrasantes en el momento en que el concreto se coloque.

Durante los períodos extremadamente calurosos, se pueden obtener mejores resultados limitando la colocación de concreto a únicamente la madrugada, la tarde o la noche, especialmente en los climas áridos. Esta práctica ha tenido como resultado una menor contracción térmica y menores agrietamientos en las losas de gran peralte y en los pavimentos.

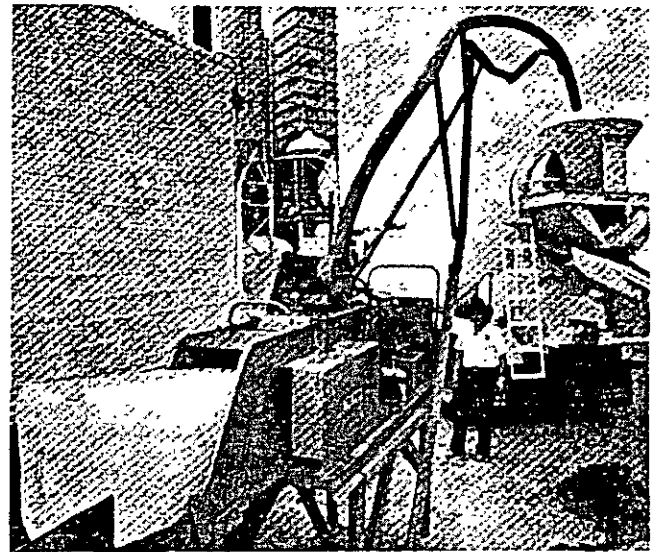


Figura 11-6. La sustitución de una parte del agua de mezclado por hielo hará descender sustancialmente la temperatura del concreto. Una trituradora suministra hielo finamente triturado a un camión mezclador de manera rápida y confiable.

## TRANSPORTE, COLOCACION, ACABADO

En los climas cálidos, el transporte y la colocación del concreto deberán efectuarse lo más rápido que sea posible. Los retrasos contribuyen a la pérdida de revenimiento y a un aumento en la temperatura del concreto. Se deberá disponer de la mano de obra y del equipo suficiente en la obra para manejar y colocar al concreto inmediatamente después de su entrega.

Se deberá evitar un mezclado prolongado, aún a la velocidad de agitación. Si llegan a ocurrir retrasos, se podrá minimizar el calor generado por el mezclado parando el mezclador y posteriormente agitar de manera intermitente. La especificación estándar para concreto premezclado ASTM C 94 demanda que la descarga del concreto se complete en 1 1/2 horas o antes de que el tambor haya revolucionado 300 veces, lo que ocurra primero. En climas calurosos el límite de tiempo se puede reducir razonablemente a 1 hora o aún a 45 minutos.

Como el concreto endurece con mayor rapidez en los climas cálidos, se deberá tener un cuidado adicional con las técnicas de colado que se vayan a emplear para evitar la formación de juntas frías. Para el colado de muros, se pueden especificar capas poco profundas para asegurar el tiempo suficiente para la consolidación con la colada anterior. Los rompevientos y pantallas para sol provisionales ayudan a minimizar la formación de juntas frías.

El emparejado deberá efectuarse inmediatamente después que el brillo del agua desaparezca de la superficie o cuando el concreto pueda soportar el peso de la persona que vaya a realizar el acabado. Para el acabado en días secos y con viento se requiere de un cuidado adicional. El secado rápido del concreto en la superficie puede provocar agrietamientos por contracción plástica.

## AGRIETAMIENTOS POR CONTRACCION PLASTICA

Las grietas por contracción plástica son grietas que aparecen en ocasiones, en la superficie del concreto fresco, poco después de haber sido colocado y mientras se le está practicando el acabado (Fig. 11-7). Estas grietas se aparecen principalmente en las superficies horizontales y pueden ser eliminadas en gran parte si se adoptan medidas preventivas.

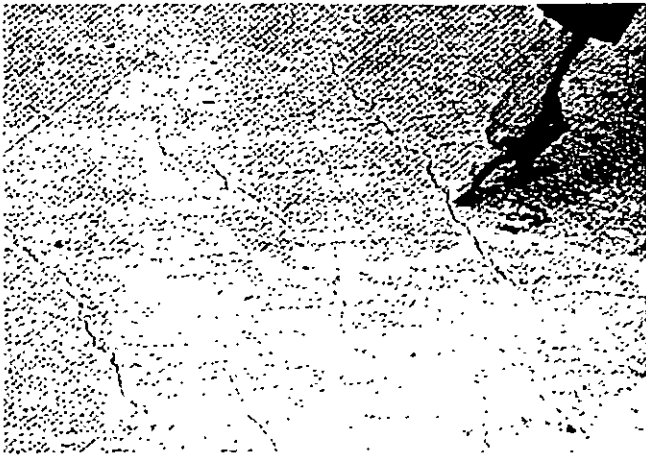


Figura 11-7. Grietas de contracción plástica típicas.

Los agrietamientos por contracción plástica usualmente se asocian con los colados en climas cálidos; sin embargo, pueden ocurrir en cualquier ocasión en que las condiciones ambientales produzcan una evaporación rápida de la humedad en la superficie del concreto. Tales grietas ocurren cuando el agua se evapora de la superficie con mayor rapidez que con la que puede aparecer en la superficie durante el proceso de sangrado. Esto origina una rápida contracción por secado y el desarrollo de esfuerzos de tensión en la superficie que a menudo tienen como resultado grietas cortas e irregulares. Las siguientes condiciones, solas o de manera colectiva, incrementan la evaporación de la humedad en la superficie y aumentan la posibilidad de agrietamientos por contracción plástica:

1. Temperatura elevada del concreto y del aire
2. Baja humedad
3. Vientos fuertes

La longitud de las grietas, varía generalmente desde unos cuantos centímetros hasta aproximadamente un metro; y normalmente las grietas se encuentran espaciadas siguiendo un patrón irregular desde unos cuantos centímetros hasta medio metro de distancia. La Fig. 11-8 es útil para determinar cuando se deben adoptar medidas preventivas. No hay manera de predecir con certidumbre cuando van a ocurrir agrietamientos por contracción plástica. Sin embargo, cuando la velocidad de evaporación sobrepasa 1 kg por metro

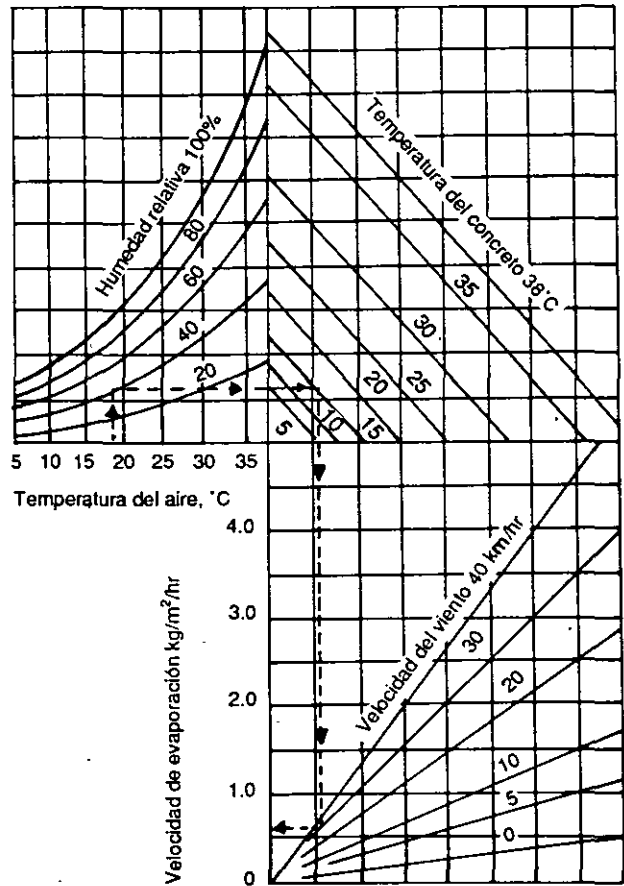


Figura 11-8. Efecto de las temperaturas del concreto y d aire, de la humedad relativa y de la velocidad del viento, sobre la velocidad de evaporación de la humedad superficial del concreto. Referencia 11-2.

cuadrado por hora, las medidas preventivas son casi obligatorias. Es posible que se presenten agrietamientos si la tasa de evaporación excede 0.5 kg por metro cuadrado por hora.

Las sencillas precauciones que se enlistan a continuación pueden minimizar la posibilidad de agrietamientos por contracción plástica. Deberían ser tomadas en consideración mientras se planea la construcción de obras de concreto en climas cálidos o para enfrentar el problema luego de haber comenzado la construcción. Se enlistan en el orden con el que se deben realizar durante la construcción.

1. Humedecer la subrasante y las cimbras.
2. Humedecer los agregados del concreto que estén secos y sean absorbentes.
3. Levantar rompavientos provisionales para reducir la velocidad del viento por encima de la superficie del concreto.
4. Levantar pantallas para sol provisionales para reducir la temperatura en la superficie del concreto.
5. Mantener la temperatura del concreto fresco baja por medio del enfriamiento de los agregados y del agua de mezclado.
6. Proteger al concreto con cubiertas provisionales, como los forros de polietileno, durante cualquier retraso apreciable entre la colocación y el acabado. Inmediata-

mente después de la nivelación se puede aplicar, con rocío algún retardante de evaporación comúnmente polímeros para retrasar la evaporación del agua antes de comenzar con las operaciones de acabado final y de curado. Estos materiales serán emparejados y alisados en la superficie durante el acabado y no deberán causar ningún efecto adverso en el concreto ni tampoco deberán inhibir la adhesión de los compuestos para curado por medio de membranas.

7. Reducir el periodo entre la colocación y el inicio del curado eliminando los retrasos durante la construcción.
8. Proteger el concreto inmediatamente después del acabado final para minimizar la evaporación. Esto es de capital importancia para evitar agrietamientos. El uso del rocío con vapor para elevar la humedad relativa del ambiente constituye un medio efectivo para prevenir la evaporación del concreto. El rociado deberá continuar hasta que se pueda aplicar algún material de curado adecuado como puede ser algún compuesto de curado, manta húmeda, o papel para curar.

Si durante el acabado llegan a aparecer grietas de contracción plástica, se podrían cerrar emparejando cada lado de la grieta por medio de una talocha y volviendo a dar el acabado. No obstante, el agrietamiento podría volver a ocurrir a no ser que se corrigieran las causas que lo han provocado.

## CURADO Y PROTECCION

El curado y la protección del concreto son de mayor cuidado en los climas cálidos y fríos que en los templados. El mantener las cimbras en su lugar no puede considerarse un sustituto satisfactorio del curado en los climas cálidos; deberán separarse tan pronto como resulte práctico sin que se dañe el concreto. El agua se debe aplicar entonces en la parte superior de las superficies descubiertas de concreto, por ejemplo con una manguera para regar suelos, y permitirse que gotee hacia el interior de las cimbras. El agua de curado no deberá estar excesivamente fría en comparación con el concreto endurecido, particularmente en el caso de las superficies planas de concreto. Esto va a minimizar el agrietamiento causado por los esfuerzos térmicos debido a los diferenciales de temperatura entre el concreto y el agua de curado.

La necesidad de un curado húmedo es máxima durante las primeras horas después de realizar el acabado. Para evitar el secado de las superficies descubiertas, el curado húmedo deberá comenzar tan pronto como se le haya practicado el acabado a las superficies y continuar durante 24 horas por lo menos. En los climas cálidos, es preferible un curado húmedo continuo durante todo el período de curado. Sin embargo, si el curado húmedo no se pudiera prolongar más allá de 24 horas, las superficies de concreto deberán protegerse contra el secado utilizando papel para curado, láminas de plástico que reflejen el calor, o compuestos formadores de membranas mientras las superficies se encuentren aún húmedas. Para reducir la posibilidad de agrietamientos irregulares\* superficiales y grietas, luego del período de curado las superficies con curado húmedo deberán secarse lentamente.

Se podrán utilizar compuestos para curado pigmentados de blanco sobre las superficies horizontales. La aplicación de

cualquier compuesto para curado en los climas cálidos deberá ser precedido por 24 horas de curado húmedo. Si esto no fuera posible, el compuesto deberá aplicarse inmediatamente después del acabado final. Las superficies de concreto deberán estar húmedas.

## ADITIVOS

Para casos poco frecuentes en climas cálidos y donde se tenga una supervisión cuidadosa, un aditivo retardante puede ser útil para retrasar el tiempo de fraguado (Fig. 11-3), a pesar del ligero aumento en la tasa de pérdida de revenimiento que resulta generalmente de su empleo.

Los aditivos retardantes deben ajustarse a los requisitos de la norma ASTM C 494 Tipo B. Los aditivos deben ser probados con materiales de la obra en las mismas condiciones del trabajo antes de comenzar la construcción a fin de determinar su compatibilidad con los ingredientes básicos del concreto, así como su capacidad para producir las propiedades deseadas bajo esas condiciones particulares.

## CALOR DE HIDRATACION

El calor que se genera durante la hidratación del cemento eleva la temperatura del concreto en mayor o menor grado dependiendo del volumen de concreto por colar, del medio ambiente que le rodee, y de la cantidad de cemento en el concreto. El Reporte ACI 211.1 señala que como regla general se puede esperar un aumento de temperatura de 6°C a 9°C por cada 50 kg de cemento debido al calor de hidratación.\*\* Pueden existir casos en los trabajos de concreto en climas cálidos y en los colados masivos de concreto en que se tengan que adoptar medidas especiales para hacer frente a la generación de calor y a los cambios volumétricos por temperatura que le acompañan con el propósito de controlar los agrietamientos, consulte los Capítulos 13 y 15.

## REFERENCIAS

- 11.1. Lerch, William, *Hot Cement and Hot Weather Concrete Tests*, TA015T, Portland Cement Association, 1955.
- 11-2. Lerch, William, *Plastic Shrinkage*, Research Department Bulletin RX081, Portland Cement Association, 1957.

\* El agrietamiento irregular, como se denomina al patrón que presenta una red de grietas finas que no penetran mucho bajo la superficie, es causado por una ligera contracción por secado en la superficie. Sus grietas son muy finas y escasamente visibles salvo cuando el concreto se está secando luego de haber estado mojada la superficie. Las grietas abarcan áreas pequeñas de concreto con una dimensión menor que 5 cm, formando un patrón similar al de la malla de alambre para gallinero.

\*\* Referencia 11-9.

- 11-3. Klieger, Paul, *Effect of Mixing and Curing Temperature on Concrete Strength*, Research Department Bulletin RX103, Portland Cement Association, 1958.
- 11-4. *Cooling Ready Mixed Concrete*, NRMCA Publication No. 106, National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, 1962.
- 11-5. Sprouse, J. H., and Pepler, R. B., "Setting Time," *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, STP169B, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1978, pages 105-121.
- 11-6. *Concrete Manual*, 8th ed., U.S. Bureau of Reclamation, Denver, revised 1981.
- 11-7. *Hot Weather Concreting*, ACI 305R-77, revised 1982, ACI Committee 305 Report, American Concrete Institute, Detroit.
- 11-8. Gaynor, Richar D.; Meininger, Richar C.; and Khan, Tarek S., *Effect of Temperature and Delivery Time on Concrete Proportions*, NRMCA Publication No. 171, National Ready Mixed Concrete Association, June 1985.
- 11-9. *Standard Practice for Selecting proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*, ACI 211.1-81, revised 1985, ACI Committee 211 Report, American Concrete Institute.
- 11-10. *Standar Practice for Curing Concrete*, ACI 308-81, revised 1986, ACI Committee 308 Report, American Concrete Institute.

## CAPITULO 12

# Concreto en Climas Fríos

El concreto se puede colar de manera segura durante los meses de invierno en climas fríos si se toman ciertas precauciones. El Comité ACI 306 define al clima frío como el "período en el que durante más de 3 días sucesivos la temperatura media diaria caiga por debajo de 4°C". Las prácticas de colado normal se pueden reanudar una vez que la temperatura ambiente se encuentre por encima de 10°C durante más de medio día.

Durante el clima frío, la mezcla de concreto y su temperatura se tendrán que adaptar al procedimiento constructivo que se utilice y a las condiciones del medio ambiente. Se deberán hacer preparativos para proteger al concreto; por ejemplo, se contará con recintos, rompevientos, calentadores portátiles, cimbras aisladas y mantas, todos estos elementos estarán listas para preservar la temperatura del concreto. Cuando se vaya a colar el concreto, tanto las cimbras y como el acero de refuerzo y los accesorios que se vayan a insertar deberán estar libres de nieve y de hielo. Se deberá disponer de termómetros y de instalaciones de almacenamiento apropiadas para los cilindros de prueba a fin de verificar que las precauciones han sido adecuadas.

### EFFECTO DEL CONGELAMIENTO DEL CONCRETO FRESCO

El concreto desarrolla muy poca resistencia a temperaturas bajas. Se deberá proteger al concreto fresco de los efectos nocivos provocados por el congelamiento hasta el momento en que el grado de saturación del concreto se haya reducido lo suficiente debido al proceso de hidratación. El período en el que esta reducción ocurre corresponde aproximadamente al tiempo que el concreto necesita para alcanzar una resistencia a la compresión de 35 kg/cm<sup>2</sup>. \* A temperaturas normales esto ocurre dentro de las primeras 24 horas después del colado. Se pueden presentar importantes reducciones en la resistencia última del concreto, hasta de aproximadamente el 50% si el concreto se llega a congelar en las horas inmediatas al colado, o antes de alcanzar una resistencia a la compresión de 35 kg/cm<sup>2</sup>. \*\*

Un concreto que ha estado congelado a edad temprana solamente se puede restaurar una vez, hasta casi alcanzar su resistencia normal, si se le proporcionan condiciones de curado subsecuentes favorables. No obstante, tal concreto no será tan resistente al intemperismo ni tan hermético como lo

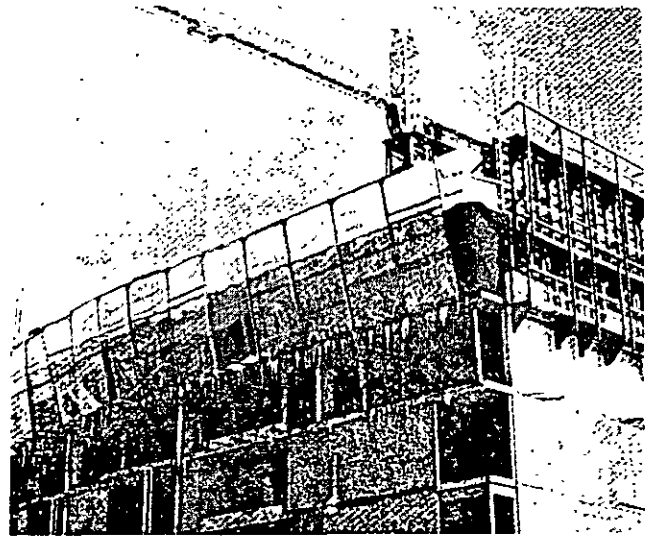


Figura 12-1. Cuando los preparativos adecuados se han llevado a cabo, el clima frío no constituye ningún obstáculo para la construcción con concreto.

sería un concreto que no se hubiera congelado. El período crítico luego del cual uno o dos ciclos de congelación no dañan seriamente al concreto, depende de los ingredientes del concreto y de las condiciones de mezclado, colocación, curado, y posterior secado. Por ejemplo, un concreto con aire incluido es menos susceptible al daño por congelamiento temprano que un concreto sin aire incluido. Para mayor información consulte el Capítulo 5 en las partes de "Resistencia a la congelación y al deshielo" y "Resistencia a las sales y productos descongelantes".

### DESARROLLO DE RESISTENCIA DEL CONCRETO A TEMPERATURAS BAJAS

La temperatura afecta a la velocidad en que ocurre la hidratación del cemento —las temperaturas bajas retardan la

\* Referencia 12-7  
\*\* Referencia 12-1.

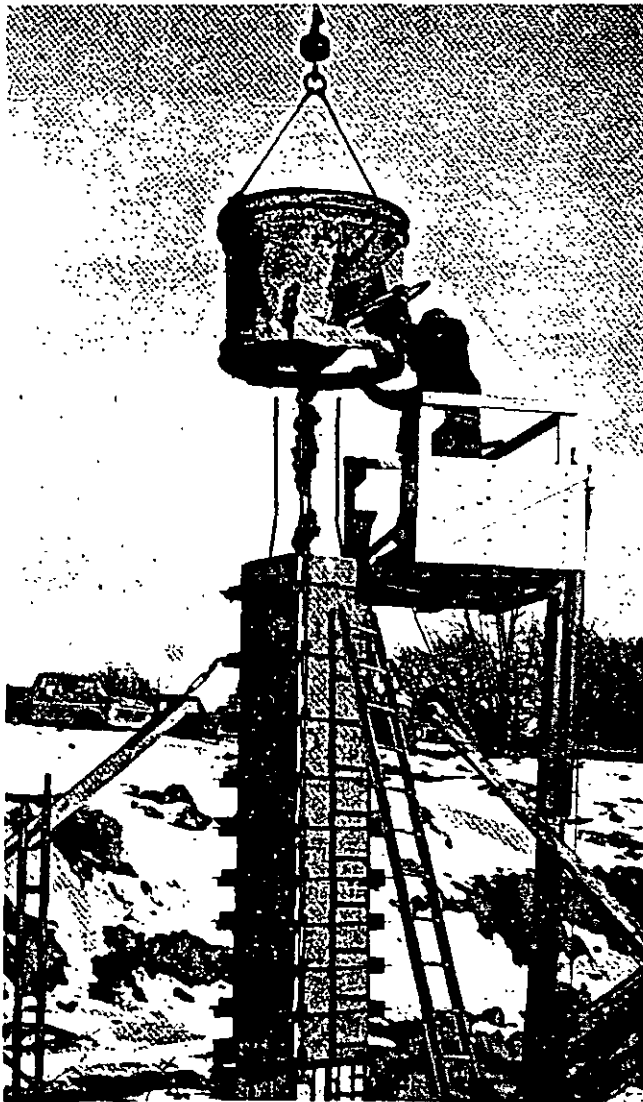


Figura 12-2. Las cimbras con aislamiento de las columnas permiten colar aún cuando la temperatura del aire se encuentre muy por debajo de la de congelación. Para mayores detalles vea las Figs. 12-20 y 12-21.

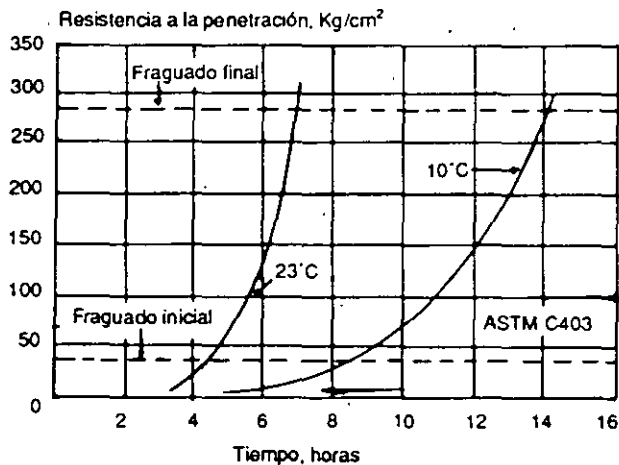


Figura 12-3. Efecto de la temperatura baja sobre la velocidad de endurecimiento. Referencia 12-11.

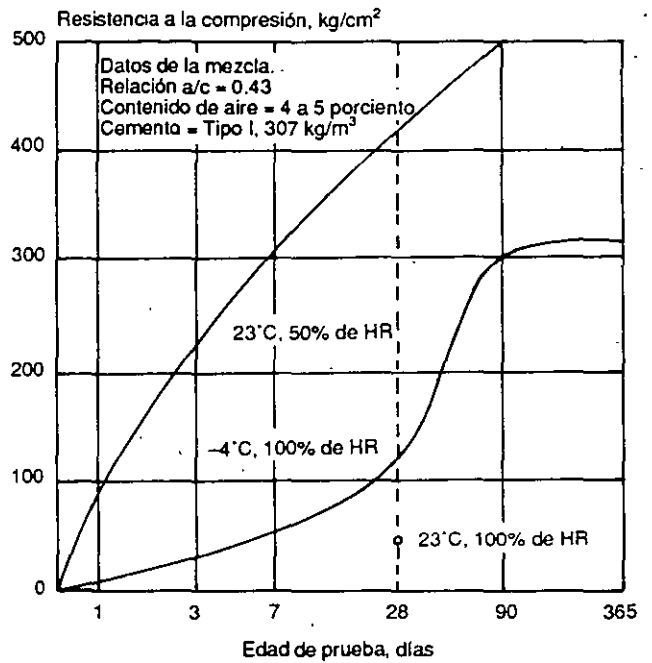


Figura 12-4. Efecto de las condiciones de temperatura sobre el desarrollo de resistencia del concreto. Los especímenes para la curva inferior fueron hechos a 4°C y colocados inmediatamente después dentro de un cuarto de curado a -4°C. Ambas curvas representan un curado con humedad relativa de 100% para los primeros 28 días seguido por un curado con humedad relativa de 50%. Referencia 12-5.

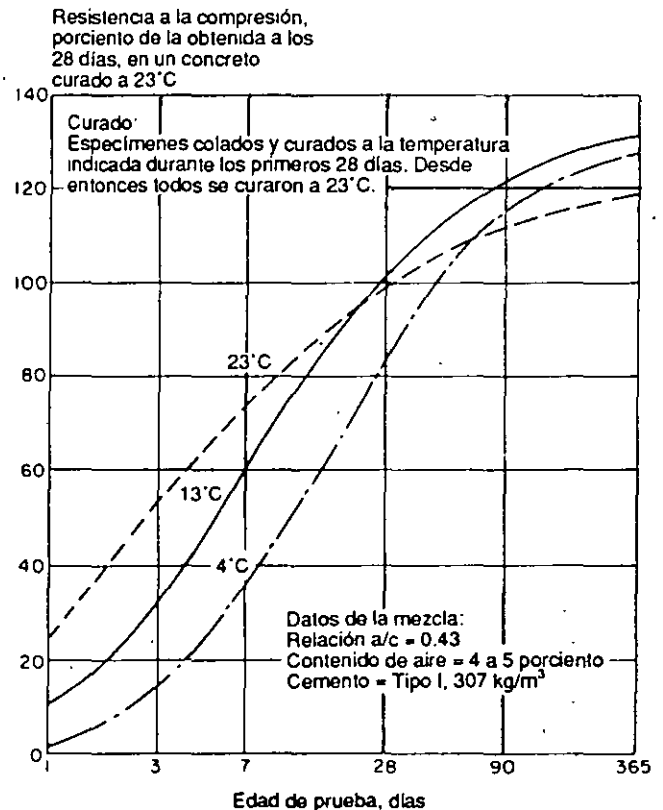


Figura 12-5. Efecto de las temperaturas bajas sobre la resistencia a la compresión a distintas edades. Referencia 12-5.



hidratación y en consecuencia retrasan el endurecimiento y el desarrollo de resistencia del concreto.

Si el concreto se congela y se mantiene congelado por arriba de  $-10^{\circ}\text{C}$ , ganará resistencia lentamente. Debajo de esa temperatura, la hidratación del cemento y el desarrollo de la resistencia del concreto cesan. La Fig. 12-3 ilustra el efecto de las temperaturas frías sobre el tiempo de fraguado. Las Figs. 12-4 y 12-5 muestran la relación edad- resistencia a compresión de concretos que han sido colados y curados a distintas temperaturas. Note en la Fig. 12-5 que los concretos colados y curados a  $4^{\circ}\text{C}$  y a  $13^{\circ}\text{C}$  tenían resistencias relativamente bajas durante la primera semana; pero después de los 28 días - período durante el cual todos los especímenes tuvieron un curado húmedo a  $23^{\circ}\text{C}$  — las resistencias para los concretos de  $4^{\circ}\text{C}$  y  $13^{\circ}\text{C}$  crecieron más rápidamente que la del concreto de  $23^{\circ}\text{C}$  y pasado un año fueron ligeramente superiores.

Se pueden lograr resistencias iniciales mayores utilizando cemento Tipo III, de alta resistencia a edad temprana, como se ilustra en la Fig. 12-6. Las principales ventajas ocurren durante los primeros 7 días. A una temperatura de curado de  $4^{\circ}\text{C}$ , las ventajas del cemento Tipo III son más pronunciadas y persisten durante más tiempo que a temperaturas mayores.

## CALOR DE HIDRATACION

El concreto genera calor durante su endurecimiento como resultado del proceso químico por el cual el cemento reacciona con el agua para formar una pasta dura y estable. El calor generado se denomina calor de hidratación; varía en cantidad y en velocidad según los distintos cementos portland. La generación de calor y su acumulación son afectados por las dimensiones del concreto, temperatura del aire, temperatura inicial del concreto, relación agua-cemento, composición y finura del cemento, cantidad de cemento y los aditivos.

El calor de hidratación resulta particularmente útil en los colados del pasado invernal pues a menudo genera el calor suficiente para suministrar una temperatura de curado satisfactoria sin que sean necesarias otras fuentes temporales de calor, particularmente en los elementos de mayor masa.

El concreto deberá entregarse a la temperatura adecuada y se deberá tener en cuenta la temperatura de las cimbras, del acero de refuerzo, del terreno, o del demás concreto sobre el que se vaya a colar. No se deberá colar concreto sobre concreto congelado ni sobre terreno congelado.

La Fig. 12-7 muestra el momento de cubrir con una lona un pedestal de concreto en un cimiento ensanchado justo después de haber colado al concreto. Las lecturas de la temperatura del concreto con el termómetro revelarán si la cubierta es adecuada. El calor liberado durante la hidratación compensará en un grado considerable la pérdida de calor durante la colocación, el acabado y las operaciones tempranas de curado.

## MEZCLAS ESPECIALES DE CONCRETO

Para la construcción en invierno es deseable una resistencia elevada a edad temprana con el propósito de reducir el período durante el cual se requiere de protección temporal. El

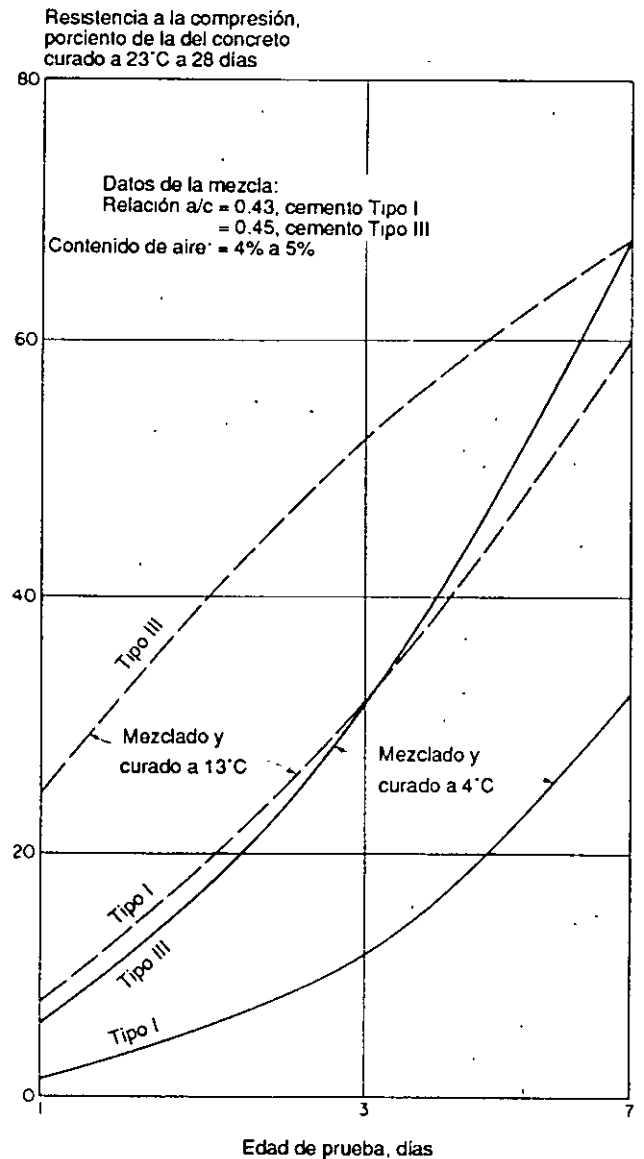


Figura 12-6. Relaciones edad temprana - resistencia a la compresión para cementos portland Tipo I y Tipo III a temperaturas de curado bajas. Referencia 12-5.

costo adicional del concreto de alta resistencia a edad temprana a menudo queda compensado con la rápida reutilización de las cimbras y la remoción de puntales, con ahorros al tener menor duración de las calefacciones temporales, con una mayor rapidez en los acabados de las superficies en plano, y con el pronto uso de la estructura. Un concreto de alta resistencia a edad temprana se puede obtener empleando alguno o su posible combinación de los puntos siguientes:

1. Cemento de alta resistencia a edad temprana Tipo III o IIIA
2. Cemento portland adicional de 60 a 120 kg por  $\text{m}^3$ .
3. Acelerantes químicos

Se pueden usar cantidades pequeñas de un acelerante como el cloruro de calcio con una dosificación máxima de



Figura 12-7. Momento en que se protege el pedestal de un cimiento de concreto con una cubierta de lona para retener el calor de hidratación.

2% en peso del cemento portland, para acelerar el fraguado y el desarrollo de la resistencia a edad temprana del concreto en climas fríos. Los acelerantes que contengan cloruros no se deberán usar cuando exista un potencial limitante por corrosión, como en el caso del concreto presforzado o cuando se empleen insertos de aluminio o de acero galvanizado. Los cloruros no se recomiendan para aquellos concretos expuestos a suelos o aguas que contengan sulfatos o para concretos susceptibles a reacciones álcali-agregado. Otras restricciones para los acelerantes que contengan cloruros se discuten en detalle en el Capítulo 6.

Los acelerantes no deberán emplearse como sustitutos de un curado y de una protección contra las heladas; tampoco se deberá permitir el empleo de los tan mencionados compuestos anticongelantes para disminuir el punto de congelación del concreto. La cantidad necesaria de estos materiales para bajar de manera apreciable el punto de congelación del concreto es tan grande que la resistencia y otras propiedades se ven seriamente afectadas con su empleo.

Para los trabajos de superficies planas durante climas fríos, resultan particularmente deseables las relaciones agua-cemento bajas y los concretos de bajo revenimiento. Se minimiza la evaporación y el acabado se puede llevar a cabo más rápidamente (Fig. 12-8).

## CONCRETO CON AIRE INCLUIDO

El aire incluido resulta especialmente deseable en cualquier concreto que se coloque durante climas muy fríos. Un con-

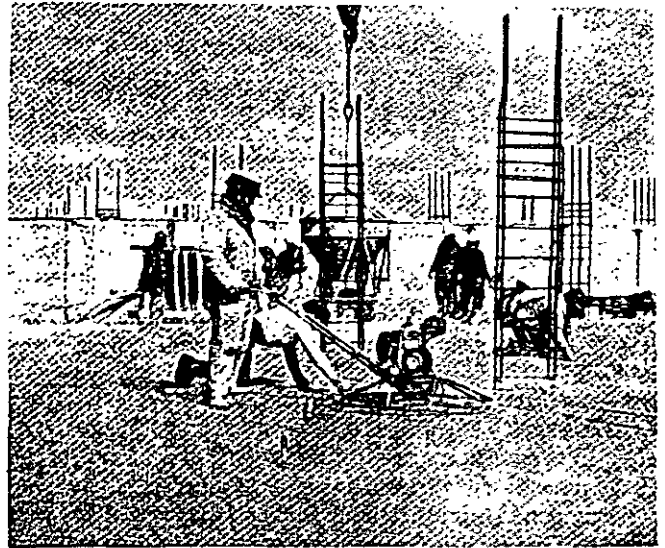


Figura 12-8. El acabado de la superficie de concreto puede proceder gracias a la colocación de un rompevientos, gracias a que existe el calor adecuado bajo la losa, y a que el concreto tiene un revenimiento bajo.

creto que no contenga aire incluido sufrirá una pérdida de resistencia como resultado de la congelación y deshielo (Fig. 12-9). La inclusión de aire brinda la capacidad de absorber los esfuerzos debidos a la formación de hielo dentro del concreto. Consulte el Capítulo 5 "Concreto con aire incluido".

El Reporte ACI 306R-78 "Cold-Weather Concreting"\* da a entender que la inclusión de aire deberá emplearse siempre en las construcciones durante los meses de heladas. Las excepciones son los trabajos que se realicen bajo techo donde no exista la posibilidad de que la lluvia, la nieve, ni el agua proveniente de otras fuentes puedan saturar al concreto y donde tampoco exista la posibilidad de que éste se congele.

La probabilidad de que el agua sature un piso de concreto durante su construcción es muy grande. La Fig. 12-10 muestra las condiciones en un piso superior de un edificio de departamentos durante su construcción en invierno. La nieve cayó sobre la cubierta superior, cuando se emplearon los calefactores abajo para calentar la cubierta, la nieve se fundió. El agua corrió a través de las aberturas hasta un nivel que no se estaba calentando. El concreto saturado con agua se congeló, lo que provocó una pérdida de resistencia, particularmente en la superficie del piso. Esto también pudo dar como resultado una mayor deflexión del piso y una superficie menos resistente a la abrasión de la que se pudo haber logrado.

## TEMPERATURA DEL CONCRETO

### Temperatura del concreto al mezclado

La temperatura del concreto fresco al mezclado no deberá ser menor que la mostrada en las Líneas 1, 2 ó 3 de la Tabla 12-1. Note que se recomiendan temperaturas del concreto menores

\* Referencia 12-13.

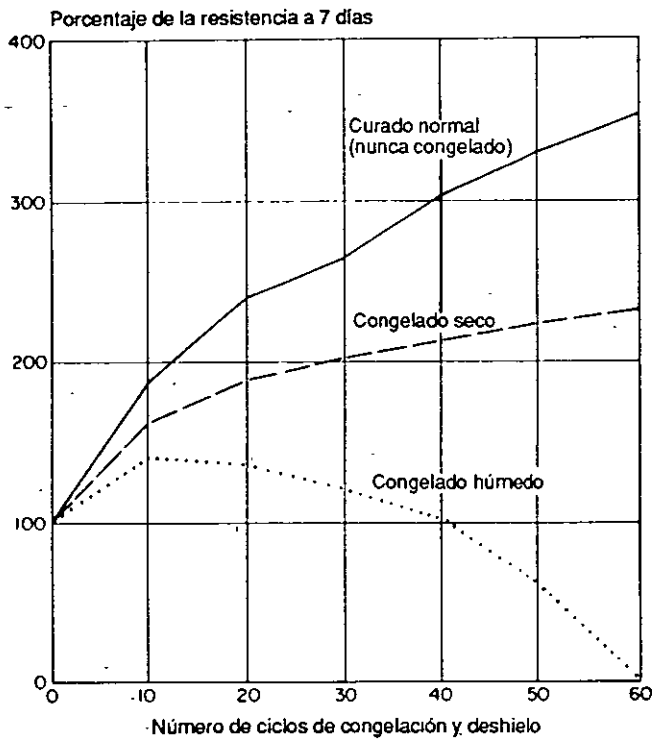


Figura 12-9. Efecto de la congelación sobre la resistencia de un concreto que no contiene aire incluido (curado 7 días antes de la primera congelación). Referencia 12-3.



Figura 12-10. Ejemplo de un piso de concreto que estuvo saturado y después se congeló, mostrando la necesidad de la inclusión de aire.

para las secciones de concreto masivas debido a que el calor generado durante la hidratación se disipa menos rápidamente en las secciones más gruesas. Note también que se pierde más calor del concreto durante el transporte y la colocación si las temperaturas del aire son menores; por lo tanto las temperaturas recomendadas para el concreto son más altas para los climas más fríos.

Existe poca ventaja al usar concreto fresco a una temperatura muy por encima de 21°C. Las temperaturas mayores no conceden una protección proporcionalmente

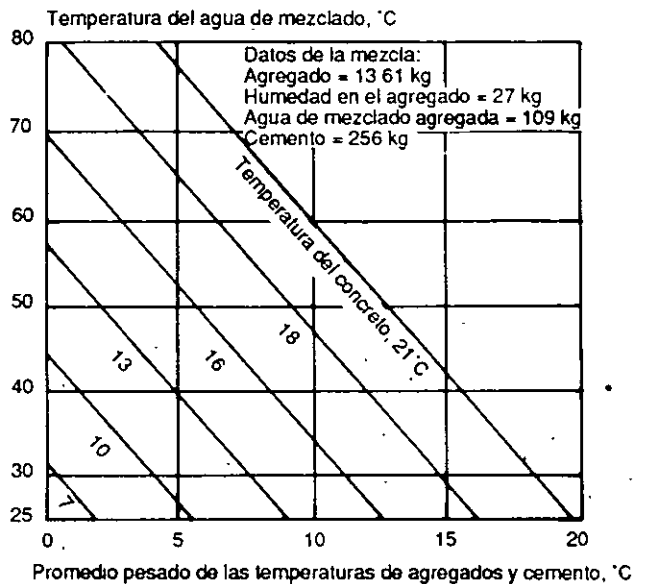


Figura 12-11. Temperatura necesaria del agua de mezclado para calentar a la temperatura requerida al concreto. Aunque las temperaturas se basan en la mezcla mostrada, son razonablemente exactas para otras mezclas típicas.

mayor contra el congelamiento porque la tasa de pérdida de calor es más elevada. Asimismo, las temperaturas altas en el concreto son indeseables porque aumentan la contracción térmica después del endurecimiento, requieren de más agua de mezclado para el mismo revenimiento, y contribuyen a la posibilidad de agrietamientos por contracción plástica (causados por una pérdida rápida de humedad debido a la evaporación). Por lo tanto, la temperatura del concreto al mezclado no deberá ser superior de 6°C por encima de los mínimos recomendados en la Tabla 12-1.

**Temperatura de los agregados.** La temperatura de los agregados varía según el clima y el tipo de almacenamiento; los agregados usualmente contienen terrones congelados y hielo cuando la temperatura se encuentra por debajo de la de congelación. Los agregados congelados deberán derretirse para evitar bolsones de agregado dentro del concreto luego de dosificar, mezclar y colar. Si el derretimiento tiene lugar en el mezclador, se deberán evitar contenidos de agua excesivamente altos debido a la fusión del hielo.

A temperaturas por encima de la de congelación rara vez es necesario calentar los agregados. A temperaturas por debajo de la de congelación, a menudo solamente el agregado fino necesita ser calentado para producir un concreto de la temperatura requerida, siempre y cuando el agregado grueso esté libre de terrones congelados. Si las temperaturas de los agregados se encuentran arriba de la de congelación, normalmente se podrá obtener la temperatura deseada en el concreto con sólo calentar el agua de mezclado.

Un método que se recomienda para calentar agregados consiste en hacer circular vapor a través de tuberías sobre las cuales los agregados estén amontonados. Los montones pueden cubrirse con lonas para retener y distribuir el calor y para evitar la formación de hielo. El vapor vivo, de preferencia a presiones entre los 5.3 y 8.8 kg/cm<sup>2</sup>, se puede inyectar directamente en la pila del agregado para calentarlo, aunque el contenido variable de humedad que resulta dentro de los

**Tabla 12-1. Temperatura del concreto recomendada para la construcción en climas fríos—Concreto con aire incluido\***

Líneas	Condición		Espesor de las secciones, cm:			
			Menos de 30	30 a 90	90 a 180	Mayor de 180
1	Temperatura mínima del concreto fresco, al mezclarlo para el clima indicado, °C	Mayor que -1°C	16	13	10	7
2		De -18°C a -1°C	18	16	13	10
3		Menor que -18°C	21	18	16	13
4	Temperatura mínima del concreto fresco, al colar y para conservar, °C**		13	10	7	4
5	Caída gradual máxima permisible de temperatura en las primeras 24 horas luego de finalizar la protección, °C		10	24	-1	-6

\* Adaptada de la Tabla 1.3 1 de la Referencia 12-13

\*\* Las temperaturas de colado enlistadas son para concretos de peso normal. Se pueden usar temperaturas inferiores para concreto de peso ligero si se justifican mediante pruebas. Para una duración recomendada de las temperaturas en la Línea 4, consulte la Tabla 12-2.

agregados podría acarrear un control errático en el agua de mezclado.

En las obras pequeñas, los agregados se pueden calentar apilándolos sobre tuberías de acero corrugado para alcantarillas bajo las cuales se prende fuego. Se deberá tener cuidado en evitar abrasar los agregados.

**Temperatura del agua de mezclado.** De todos los ingredientes que se emplean para producir concreto, el agua de mezclado resulta lo más sencillo y práctico de calentar. El peso de los agregados y del cemento en el concreto es mucho mayor que el peso del agua; sin embargo, el agua puede almacenar casi cinco veces la cantidad de calor que almacenaría el mismo peso de cemento o de agregado. Para el cemento y para el agregado el calor específico promedio, es decir, las unidades de calor que se requieren para elevar la temperatura de 1 kg de material 1°C, es de 0.22 kilocalorías por kg por grado Centígrado comparado con 1.0 para el agua.

**Ecuación para la temperatura del concreto.** La Fig. 12-11 muestra gráficamente el efecto que tiene la temperatura de los materiales, sobre la temperatura del concreto fresco. El gráfico se basa en la ecuación

$$T = \frac{0.22(T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w + T_{wa} W_{wa}}{0.22(W_a + W_c) + W_w + W_{wa}}$$

donde

$T$  = temperatura del concreto fresco  
 $T_a, T_c, T_w$  y  $T_{wa}$  = temperatura de los agregados, cemento, agua de mezclado agregada, y agua libre en los agregados, respectivamente  
 $W_a, W_c, W_w$  y  $W_{wa}$  = peso de los agregados, cemento, agua de mezclado agregada, y agua libre en los agregados, respectivamente

Si el promedio pesado de la temperatura de los agregados y del cemento se encuentra arriba de 0°C, la temperatura adecuada del agua de mezclado para la temperatura requerida del concreto se podrá seleccionar de la Fig. 12-11. El rango de las temperaturas del concreto en la gráfica corresponde a

los valores recomendados de las Líneas 1, 2, y 3 de la Tabla 12-1.

Para evitar la posibilidad de que se presente en el concreto un fraguado rápido o un fraguado relámpago cuando el agua o los agregados se calienten por encima de 38°C, éstos deberán combinarse primero dentro del mezclador antes de agregar el cemento. Si se sigue esta misma secuencia de carga en el mezclado, se pueden usar temperaturas de agua hasta el punto de ebullición, siempre y cuando los agregados se encuentren lo suficientemente fríos para reducir la temperatura final de la mezcla de los agregados con el agua hasta un valor apreciablemente inferior a 38°C.

Se deberán evitar fluctuaciones en la temperatura del agua de mezclado entre una mezcla y la otra. La temperatura del agua de mezclado se podrá ajustar mezclando agua caliente con agua fría.

### Temperatura del concreto al colarlo y conservarlo

Después del mezclado siempre habrá una cierta pérdida de temperatura mientras el camión mezclador viaja al sitio de la construcción y espera a descargar el concreto. Se deberá colocar el concreto dentro de las cimbras antes de que su temperatura caiga por debajo de la Línea 4 de la Tabla 12-1, y esa temperatura en el concreto se deberá preservar durante todo el período de protección que se especifica en la Tabla 12-2.

### PRUEBAS DE CONTROL

Se necesitan termómetros para revisar las temperaturas del concreto al ser entregado, mientras se coloca, y mientras se conserva. En la Fig. 12-12 se muestra un termómetro de bolsillo de bajo costo.

Luego de que el concreto haya endurecido, se podrán revisar las temperaturas con termómetros especiales de superficie o con un termómetro ordinario que se mantenga cubierto con mantas aislantes. Una manera sencilla de revisar temperatura bajo la superficie del concreto se muestra en la

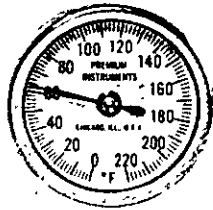
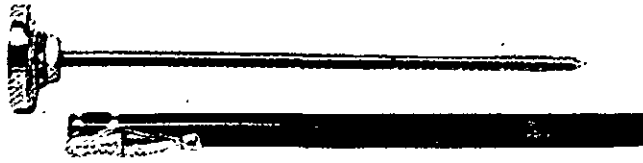


Figura 12-12. Termómetro bimetalico de bolsillo con un sensor de metal adecuado para revisar las temperaturas del concreto.

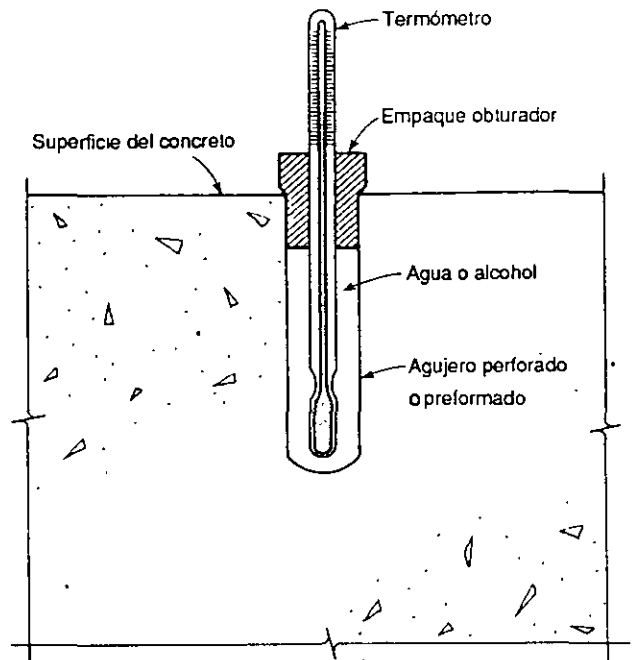


Figura 12-13. Bosquejo para medir las temperaturas bajo la superficie del concreto con un termómetro de vidrio.

Tabla 12-2.

**A. Duración recomendada de la temperatura del concreto en clima frío—Concreto con aire incluido\***

Categoría de servicio††	Por durabilidad		Por resistencia para descimbrar con seguridad	
	Concreto convencional,** días	Concreto de alta resistencia a edad temprana, † días	Concreto convencional,** días	Concreto de alta resistencia a edad temprana, † días
Sin carga, sin exposici[on], con curado húmedo favorable	2	1	2	1
Sin carga, expuesta, aunque tiene un curado húmedo favorable posteriormente	3	2	3	2
Con carga parcial, expuesta	3	2	6	4
Totalmente cargada, expuesta	3	2		Consulte la Tabla B inferior

**B. Duración recomendada de la temperatura del concreto para concretos con aire incluido, totalmente cargados y expuestos**

Porcentaje requerido de la resistencia de diseño, f'c	Días a 10°C			Días a 21°C		
	Tipo de cemento portland			Tipo de cemento portland		
	I	II	III	I	II	III
50	6	9	3	4	6	3
65	11	14	5	8	10	4
85	21	28	16	16	18	12
95	29	35	26	23	24	20

\* Adaptada de la Tabla 1.4.2 de la Referencia 12-13. El clima frío se define como aquel en el cual la temperatura diaria promedio es menor de 4°C durante 3 días sucesivos a excepción que si las temperaturas superiores a 10°C ocurren durante al menos 12 horas en un día, entonces el concreto ya no deberá ser considerado como un concreto en clima frío y deberá aplicársele un curado normal. Consulte la Tabla 12-1 para las temperaturas que se recomiendan en el concreto. Para los concretos que no tengan aire incluido, el Comité ACI 306 señala que la protección por durabilidad deberá ser al menos el doble del periodo de la Tabla A.

La parte B se adaptó de la Tabla 7.7 de la Referencia 12-13. Los valores mostrados son aproximaciones y variarán de acuerdo al espesor del concreto, proporciones de la mezcla, etc. Se propone representar las edades a las cuales las cimbras pueden retirarse. Para las temperaturas recomendadas del concreto, consulte la Tabla 12-1.

\*\* Fabricado con cemento portland Tipo I o II (ASTM).

† Fabricado con cemento portland Tipo III (ASTM), o con un acelerante, o con una cantidad extra de 60 kg de cemento por metro cúbico.

†† "Expuesto" se define como sujeto a la congelación y al deshielo.

Fig. 12-13. En lugar de rellenar el agujero mostrado en la Fig. 12-13 con algún fluido, se puede fijar con algún aislante exceptuando la zona del bulbo.

Los cilindros de prueba se deberán conservar en la obra a una temperatura entre 16°C y 27°C durante 24 horas hasta que sean llevados a curar a un laboratorio. Durante este período de 24 horas los cilindros se deberán mantener dentro de una caja de curado cuya temperatura estará controlada de manera muy precisa por medio de un termostato (Fig. 12-14). Cuando se almacenan los cilindros dentro de una caja de curado aislada a la intemperie, es menos probable que sufran golpes o vibraciones que si se les deja en el piso de un remolque. Si se les dejara dentro de un remolque o de una cabaña donde se pudiera apagar el calor durante la noche o un fin de semana o vacaciones, los cilindros no se encontrarían a las

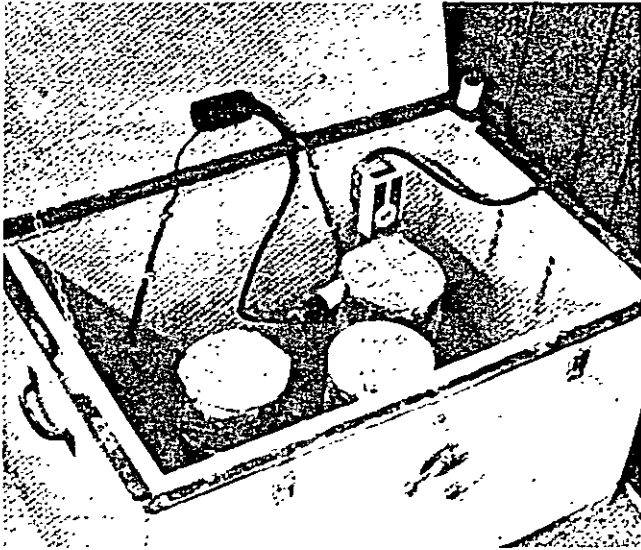


Figura 12-14. Caja de curado aislada con termostato para curar cilindros de prueba. El calor es suministrado por capas eléctricas de caucho ubicadas en el fondo. Es posible contar con una extensa variedad de diseños para las cajas de curado.

temperaturas de curado que se prescriben para este período crítico.

Además de los cilindros curados en el laboratorio, es útil curar en campo algunos cilindros de prueba para controlar las condiciones reales de curado en clima frío en la obra. A veces es difícil encontrar los lugares adecuados para el curado en campo, un lugar preferido es dentro de un cajón en una losa de piso o muro con aislamiento térmico como cubierta. Cuando se les coloque sobre un borde de la cimbra justo debajo de un piso calentado, suspendido, las posibles temperaturas altas que ahí se encuentren no duplicarán la temperatura promedio dentro de la losa, ni la menor temperatura en la parte superior de la losa. Con todo, los cilindros curados en el campo son más indicativos de la resistencia real del concreto que los cilindros curados en el laboratorio.

Los cilindros deberán desmoldarse luego de las primeras 24  $\pm$  4 horas, y envolverse ajustadamente con bolsas de plástico. Cuando los cilindros sean recogidos para su entrega al



Figura 12-15. Aún bajo el rigor del invierno, se puede construir una alberca al aire libre si se emplea un recinto con calefacción.

laboratorio, deberán conservarse a temperaturas entre 16°C y 27°C hasta que se depositen en el cuarto de curado del laboratorio.

Los cilindros colados en el lugar (ASTM C 873) y los métodos de prueba no destructivos que se discuten en el Capítulo 14, así como las técnicas de madurez que se tratan más adelante en este capítulo, son de utilidad para controlar la resistencia del concreto en el lugar.

## COLADOS A NIVEL DEL TERRENO

Los colados a nivel del terreno durante el clima frío implican un cierto esfuerzo y gasto adicional, aunque muchos contratistas reconocen que esa actividad se paga por sí misma. En invierno, el sitio puede estar congelado en vez de ser un pantano. El concreto proporcionará parte, si no es que la totalidad, del calor necesario para un curado adecuado. Es fácil suministrar mantas aislantes o recintos sencillos. Los terraplenes se encuentran congelados y requieren de menos ademado. Con un buen inicio durante los meses de invierno, la construcción puede llegar a avanzar por encima del terreno antes de que se presente un clima más cálido.

La colocación de concreto a nivel del terreno involucra procedimientos distintos de los que se usan en niveles superiores: 1).- el terreno deberá estar descongelado antes de colar el concreto; 2).- la hidratación del cemento proporcionará parte del calor para curar; 3).- la construcción de recintos es mucho más sencilla y puede bastar con el uso de mantas aislantes; y 4).- en caso de una losa para piso, se necesita un calentador con ventilación si el área está encerrada.

Se puede comenzar la cimentación si se descongela el terreno con calor temporal y la cimentación se rellena lo más rápido posible. Jamás se deberá colar concreto sobre una subrasante congelada porque cuando ésta se descongele, podría ocurrir un asentamiento desigual, provocando agrietamientos. Además, sobre una subrasante congelada, calor va a emigrar rápidamente del fondo del concreto,

retardándose su velocidad de endurecimiento. Idealmente, la temperatura de la subrasante deberá ser lo más cercana a la temperatura del concreto por colarle encima, que resulte práctica.

Cuando la subrasante se encuentre congelada hasta una profundidad de unos cuantos centímetros, esta región superficial se podrá descongelar siguiendo varios procedimientos 1).- tratando con vapor; 2).- tendiendo una capa de arena, grava u otro material granular caliente donde lo permitan las elevaciones de la rasante; 3).- quemando paja o forraje si lo permiten las disposiciones locales referentes a la contaminación ambiental; o 4).- cubriendo la subrasante con un aislante durante varios días. La colocación de concreto para losas de piso y para cimentaciones descubiertas deberá retrasarse hasta que el terreno se descongele y se caliente lo suficiente para asegurarse que no se volverá a congelar durante el período de curado.

Para las losas coladas a nivel del terreno a 2°C, el Comité ACI 306\* proporciona dos juegos de tablas y gráficas en que se muestra la resistencia requerida a la transferencia del calor (R) de mantas aislantes. Los datos abarcan un período de protección de solamente una semana y señalan que las mantas aislantes deberán complementarse con otra fuente de calor para las losas cuyos espesores sean de 30 cm ó menos.

## COLADOS POR ENCIMA DEL TERRENO

El trabajo en climas fríos por encima del nivel del terreno normalmente involucra varios enfoques distintos en comparación con el trabajo al nivel de terreno:

1. La mezcla de concreto no necesita modificarse forzosa-mente para generar más calor porque se pueden usar calefactores portátiles para calentar las caras inferiores de las losas de pisos y azoteas. Sin embargo, existen ciertas ventajas al tener una mezcla que produzca una resistencia elevada a edad temprana; por ejemplo, el calor artificial se puede cortar con mayor prontitud véase la Tabla 12-2, y las cimbras se pueden reciclar más rápidamente.
2. Deberán construirse recintos a fin de retener el calor bajo las losas de pisos y azoteas.
3. Los calefactores portátiles empleados para calentar las caras inferiores del concreto pueden ser unidades de calefacción con flama directa pero sin ventilación.

Antes de colar, los calefactores bajo una plataforma cimbrada se deberán encender para precalentar las cimbras y fundir cualquier resto de nieve o hielo que hubiera quedado en su parte superior. Cuando se termine de dar acabado a las losas, se deberán colocar en su parte superior mantas aislantes o algún otro tipo de aislamiento para asegurarse que se mantendrán las temperaturas de curado apropiadas. Los valores de aislamiento R necesarios para mantener una temperatura de curado adecuada por encima de 10°C durante 3 ó 7 días se pueden estimar de las Figs. 12-16 y 12-17. Para mantener una temperatura durante un período más largo, se requiere de un mayor aislamiento. Las Figs. 12-16 y 12-17 también se pueden aplicar para muros de concreto. El aislamiento se puede elegir basándose en los valores de R dados

\* Referencia 12-13.

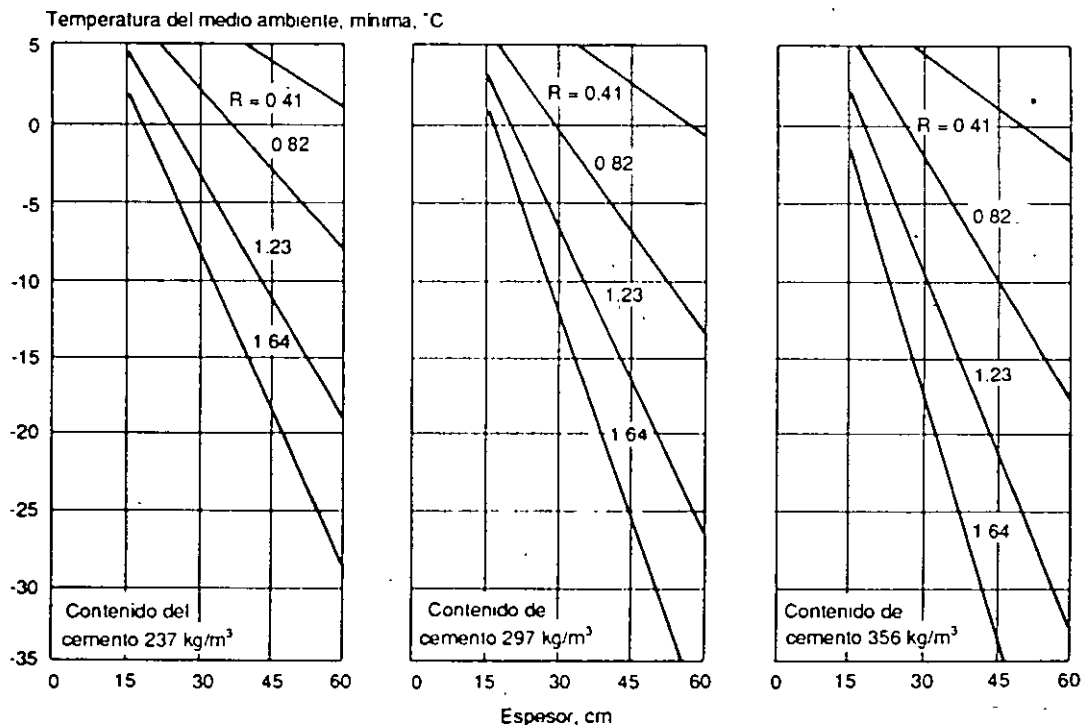


Figura 12-16. Resistencia térmica (R) del aislamiento necesario para conservar la temperatura de la superficie de muros y losas de concreto sobre el nivel del terreno a 10°C ó más durante 3 días. Temperatura del concreto al colarlo: 10°C. Velocidad máxima del viento: 24 km/h. Referencia 12-13.

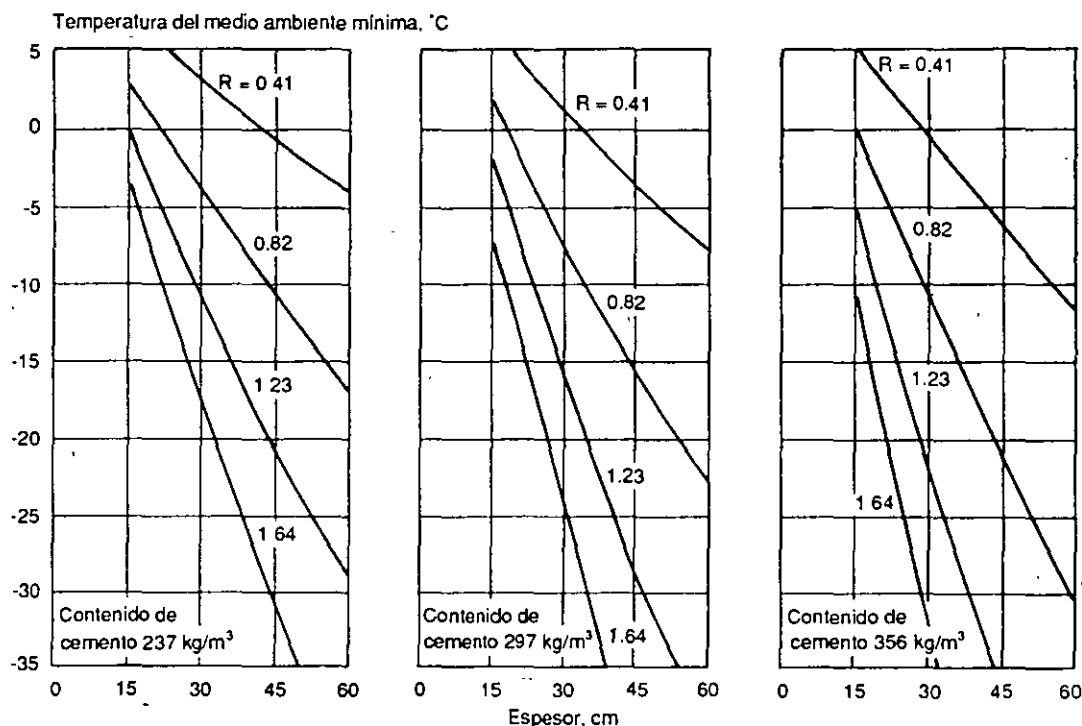


Figura 12-17. Resistencia térmica (R) del aislamiento necesario para conservar la temperatura de la superficie de muros y losas de concreto sobre el nivel del terreno a 10°C ó más durante 7 días. Temperatura del concreto al colar: 10°C. Velocidad máxima del viento: 24 km/h. Nótese que para conservar una cierta temperatura mínima durante un período más largo, se necesita más aislante o un valor R mayor. Referencia 12-13.

Tabla 12-3. Valores de aislamiento de varios materiales

A.			B.		
Material	Densidad, kg/m <sup>3</sup>	Resistencia térmica, R, para 25 mm de espesor de material,* (°C hr m <sup>2</sup> )/Kcal	Material	Densidad, kg/m <sup>3</sup>	Resistencia térmica, R, para 25 mm de espesor de material,* (°C hr m <sup>2</sup> )/Kcal
<b>Tableros y placas</b>					
Poliuretano expandido	24	1.28	Cobertor de fibra mineral, forma fibrosa (roca, escoria o vidrio) 4.80 a 32 kg/m <sup>3</sup>	51 a 70	1.43
Poliestireno expandido extruido superficie de piel suave	29 a 56	1.02		76 a 89	2.25
Poliestireno expandido extruido superficie de celdas cortadas	29	0.82		140 a 165	3.89
Fibra de vidrio, enlace orgánico	64 a 144	0.82		152 a 178	4.51
Poliestireno expandido, rebordes moldeados	16	0.79		216 a 229	6.14
Fibra mineral con aglomerante de resina	240	0.71		305	7.78
Lámina de fibra mineral, fieltro húmedo	256 a 272	0.60	Relleno suelto de fibra mineral (roca, escoria, o vidrio) 9.60 a 32 kg/m <sup>3</sup>	95 a 127	2.25
Revestimiento de lámina de fibra vegetal	288	0.54		165 a 222	3.89
Vidrio celular	136	0.59		190 a 254	4.51
Cartón de papel laminado	480	0.41		260 a 349	6.14
Tableros de partículas (densidad baja)	593	0.38			
Madera contrachapada	545	0.25			
<b>Relleno suelto</b>					
Fibra de madera, maderas suaves	32 a 56	0.68			
Perlita (expandida)	80 a 128	0.55			
Vermiculita (exfoliada)	64 a 96	0.46			
Vermiculita (exfoliada)	112 a 131	0.44			
Vermiculita (exfoliada)	128 a 240	0.45			
Aserrín o virutas					

\* Los valores provienen del "ASHRAE Handbook of Fundamentals", Air-Conditioning Engineers, Inc., Nueva York. Los valores de R son el recíproco de los valores de U (conductividad)



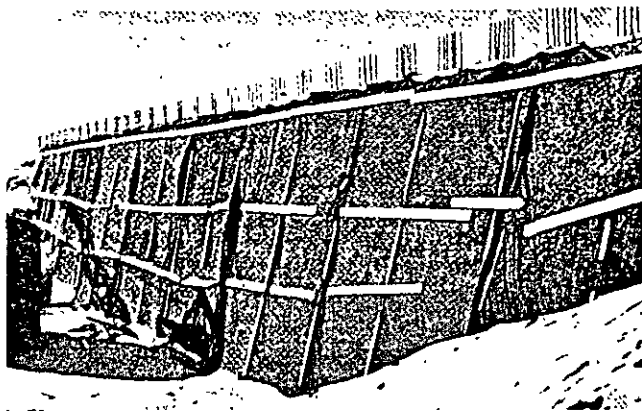
por los fabricantes de aislamientos o utilizando la información de en la Tabla 12-3. El Comité ACI 306 presenta gráficas y tablas adicionales para losas coladas al nivel del terreno o sobre éste.

El período para preservar la temperatura se puede basar en la información mostrada en la Tabla 12-2. Sin embargo, la cantidad real de aislamiento y la duración del período de protección deberán determinarse a partir del control de la temperatura en el lugar y de la resistencia deseada. Se puede establecer una correlación entre la temperatura de curado, el período de curado, y la resistencia a la compresión por medio de pruebas de laboratorio de la mezcla particular de concreto que se emplee en el campo véase el concepto de madurez el cual se trata en la parte de "Duración de la calefacción" en este mismo capítulo.

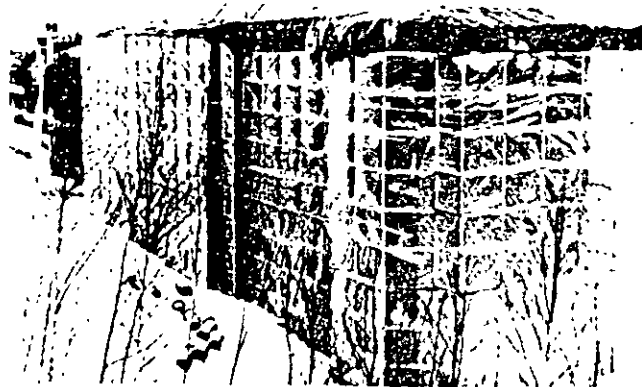
Como las columnas de sección cuadrada y rectangular tienen el doble de trayectorias de flujo de calor que tiene un muro largo y alto, se necesita el doble de aislamiento para

mantener las mismas características referentes a la pérdida de calor. Si la temperatura ambiente se eleva muy por encima de la temperatura supuesta al elegir los valores de aislamiento, la temperatura del concreto podría llegar a ser excesiva. Esto aumentaría la probabilidad de un choque térmico y de agrietamientos cuando se retiran las cimbras. En consecuencia, se deberán tomar lecturas de la temperatura del concreto aislado a intervalos regulares y no se les deberá permitir que se eleven muy por encima de 27°C. En caso de un incremento repentino en la temperatura del concreto, hasta digamos 35°C, podría llegar a ser necesario retirar parte del aislamiento o aflojar la cimbra. Para minimizar los agrietamientos, el diferencial máximo de temperatura entre el interior y la superficie del concreto deberá ser de aproximadamente 20°C. Se deberá revisar la predicción del clima y adoptar las acciones pertinentes respecto a los cambios de temperatura esperados.

No se deberán colar columnas ni muros sobre cimentaciones congeladas, porque el enfriamiento del concreto en la parte inferior de la columna o del muro retrasará su desarrollo de resistencia.



a.



b.

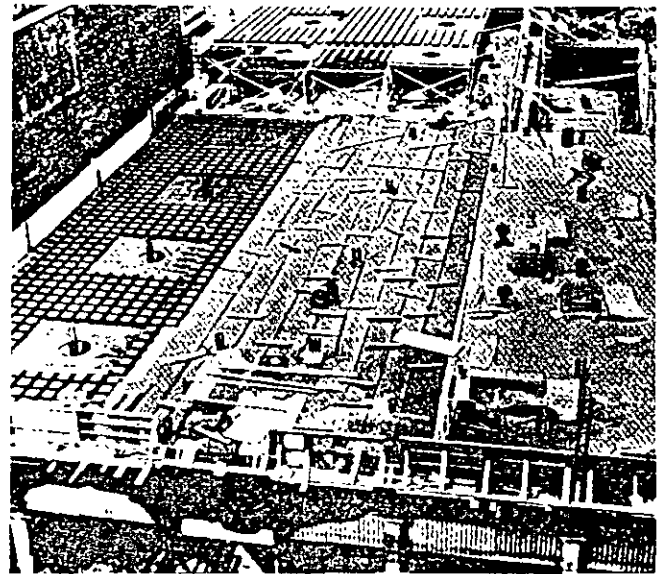
**Figura 12-18.** Los recintos con calefacción mantienen una temperatura adecuada para un curado apropiado. a). Un recinto de lona brinda protección a un puente durante un invierno extremadamente frío y prolongado. b). Para encerrar completamente la estructura de un edificio se usan hojas de polietileno que permitan el paso de la luz del día. La temperatura en el interior se mantiene a 10°C por medio de calefactores de espacio.

## RECINTOS

Los recintos con calefacción se pueden usar para proteger al concreto en los climas fríos, estos pueden ser de madera, de lona, o de polietileno (Fig. 12-18a). También se puede disponer de recintos prefabricados, cuya estructura es de plástico rígido. Los recintos más populares son los de plástico que admiten el paso de la luz solar (Fig. 12-18b).

Cuando los recintos se construyen bajo alguna plataforma, sus marcos se pueden prolongar por encima de ella para que sirvan como rompevientos. Una altura de 1.80 m bastará para brindar una protección adecuada contra vientos penetrantes.

Los recintos se pueden manufacturar para moverse junto con las cimbras voladoras; aunque más frecuentemente se tienen que retirar para que el viento no interfiera con las



**Figura 12-19.** Los cobertores aislantes atrapan el calor y la humedad del concreto, proporcionando un curado provechoso.

maniobras de colocar las cimbras en su posición. De manera similar, los recintos se pueden construir con paneles grandes semejantes a las cimbras con andamios con el rompevientos incluido (Fig. 12-1).

## MATERIALES PARA AISLAMIENTO

Es posible retener tanto al calor como a la humedad en el concreto cuando se cubre con cobertores aislantes comerciales o con aislamiento con bloques de materiales fibrosos (Fig. 12-19). Se puede determinar la efectividad del aislante colocando debajo de éste un termómetro que entre en contacto con el concreto. Si la temperatura desciende a un nivel inferior del mínimo requerido, se deberá aplicar más material aislante, o un material con un valor R más elevado. Como las esquinas y los bordes del concreto son los lugares más vulnerables al congelamiento, las temperaturas deberán revisarse particularmente en esos sitios.

En la Tabla 12-3 se presentan los valores de resistencia térmica para los materiales aislantes más comunes. Una eficiencia máxima se logrará cuando los materiales aislantes se conserven secos y en estrecho contacto con el concreto o con las cimbras.

Los pavimentos de concreto se pueden proteger contra el clima frío tendiendo sobre la superficie 30 cm ó más de paja o forraje seco como aislantes. Se deberán usar lonas, plásticos de polietileno o papel impermeable como cubierta protectora sobre la paja o forraje para hacer más efectivo al aislante y evitar que se vuele con el viento. La paja o forraje deberán mantenerse secos, pues de otra manera su valor de aislamiento descenderá considerablemente.

Las cimbras que se han construido para un uso repetido se pueden aislar frecuentemente de manera económica con cobertores comerciales o con aislamientos con bloques de materiales fibrosos (Fig. 12-20). El aislante deberá tener una cubierta resistente a prueba de humedad que soporte los maltratos al

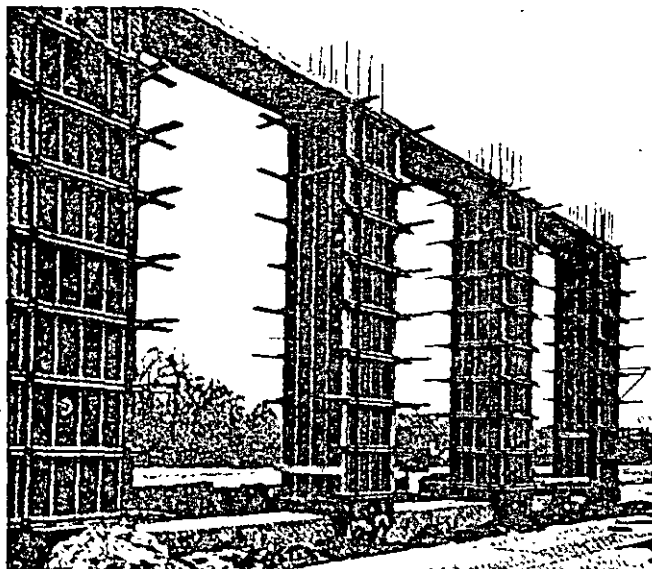


Figura 12-20. El aislamiento con cobertores o con bloques de materiales fibrosos puede aplicarse a la parte exterior de las cimbras construidas en obra o prefabricadas.

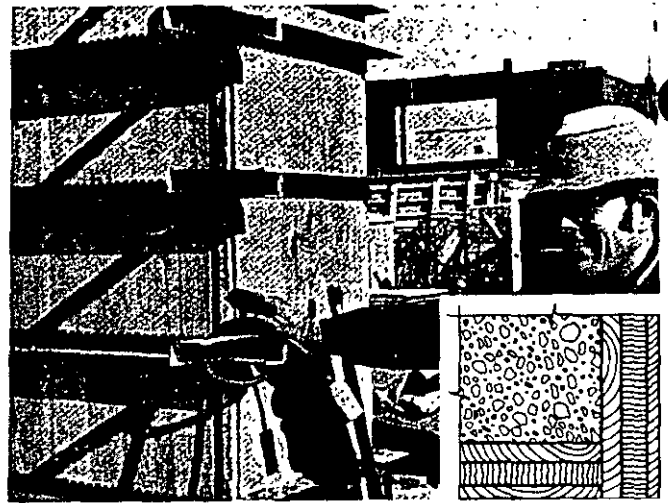
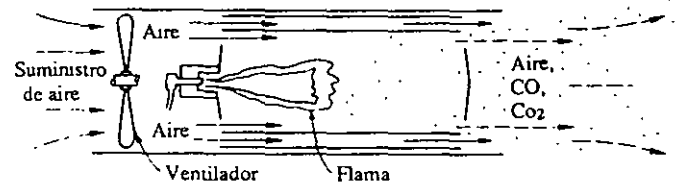
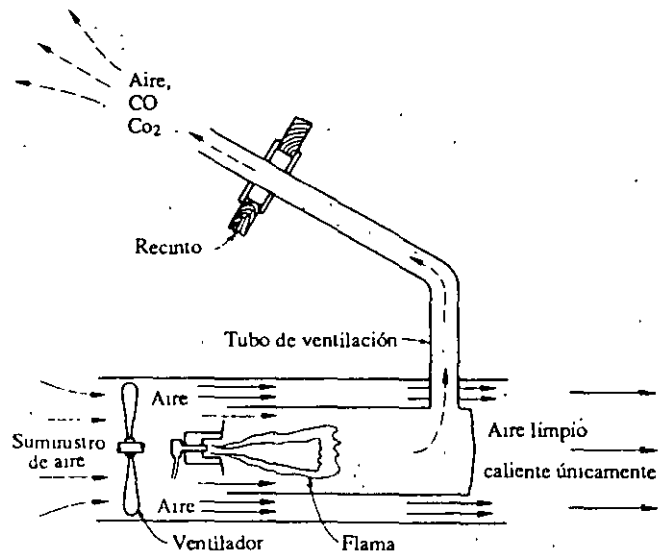


Figura 12-21. Aún teniendo temperaturas ambientales de  $-23^{\circ}\text{C}$ , se coló concreto en el interior de esta cimbra de columna con aislamiento fabricada con madera contrachapada de alta densidad de 19 mm (3/4") de espesor en su interior, con 25 mm (1") de poliestireno rígido en el centro, y con madera contrachapada tosca de 13 mm (1/2") de espesor por fuera. Valor R: 1.15 ( $^{\circ}\text{C hr m}^2/\text{Kcal}$ ).



a) Calefactor de flama directa



b) Calefactor de flama indirecta

Figura 12-22. Dos tipos básicos de calefactor.



Figura 12-23. Calefactor de flama indirecta. Note el tubo de ventilación que conduce los gases de la combustión fuera del recinto.

manejarla y también la exposición al medio ambiente. Los aislantes rígidos son excelentes para este uso (Fig. 12-21).

Los cobertores aislantes para la construcción están fabricados de fibra de vidrio, esponjas de hule, espuma de poliuretano de celdas abiertas, espuma de vinilo, lana de asbesto, o fibras de celulosa. Para las cubiertas externas se utilizan lonas, polietileno tejido u otras telas resistentes que absorban los manejos rudos. El valor R de un cobertor aislante típico es de aproximadamente 1.44 ( $^{\circ}\text{C hr m}^2/\text{Kcal}$ ), aunque como sus valores R no vienen marcados en los cobertores, se deberá revisar su efectividad con un termómetro. Si fuera necesario, se les podrá usar en dos o en tres capas para alcanzar el aislamiento deseado.

## CALEFACTORES

Para la construcción de concreto en climas fríos se emplean dos tipos de calefactor: los de flama directa y los de flama indirecta (Fig. 12-22). Los calefactores de flama indirecta tienen ventilación para retirar los productos de la combustión. Cuando el calor se vaya a proporcionar a la parte superior del concreto fresco por ejemplo, en una losa de piso, se necesitan calefactores con ventilación. El bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) del tubo de salida será ventilado hacia el exterior evitándose así su reacción con el concreto fresco (Fig. 12-23). Las unidades de flama directa se pueden usar para dar calefacción a los recintos bajo los pisos o cubiertas de azoteas (Fig. 12-24).

Cualquier calefactor que queme combustibles fósiles producirá  $\text{CO}_2$ , el cual se combinará con el hidróxido de calcio en la superficie del concreto fresco para formar una capa débil de carbonato de calcio que interferirá con la hidratación del cemento.\* Como resultado se producirá una superficie suave, gredosa que se levantará bajo la acción del tránsito. Tanto la profundidad, como el grado de carbonatación dependerán de la concentración de  $\text{CO}_2$ , temperatura de curado, humedad, porosidad del concreto,

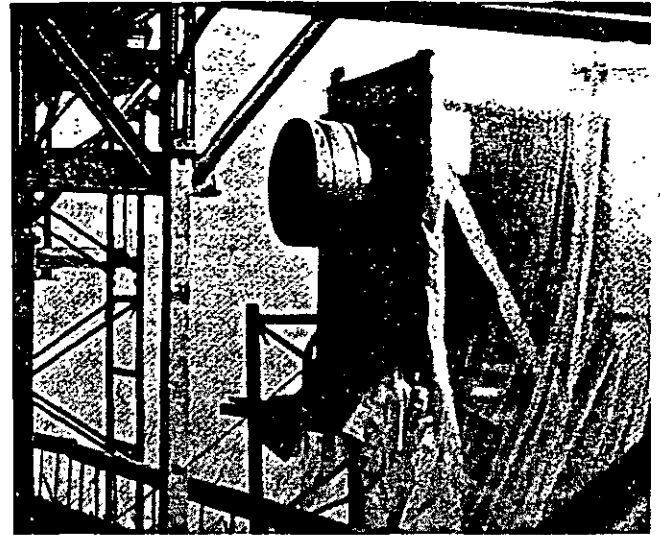


Figura 12-24. Calefactor de flama directa montado fuera del recinto, abasteciéndose en estas condiciones con aire puro.

duración del período de exposición, y del método de curado. Por lo tanto, no se deberá permitir que los calefactores de flama directa calienten el aire inmediatamente después de las operaciones de colado, sino una vez que hayan transcurrido por menos 24 horas.

El monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), otro producto de la combustión, normalmente no constituye ningún problema a menos que el calefactor utilice aire recirculante. Con una exposición de cuatro horas a 200 partes por millón de  $\text{CO}$  se producirán dolores de cabeza y náuseas. Tres horas de exposición a 600 ppm pueden ser de fatales consecuencias. Los requisitos estándar de seguridad norteamericanos para instrumentos de calefacción portátiles y temporales y para equipo empleado en la industria de la construcción (ANSI A10.10) limitan las concentraciones de  $\text{CO}$  a 50 ppm en los niveles de respiración de los trabajadores. El estándar también establece reglas de seguridad para la ventilación y para la estabilidad, operación, alimentación de combustible y mantenimiento de los calefactores.

Una "salamandra" es un calefactor de combustión de bajo costo sin ventilador que descarga sus productos de combustión al aire circundante; la calefacción se logra por radiación de su cubierta de metal. Las "salamandras" usan coque, petróleo, madera o propano líquido como combustible. Sólo son un tipo de calefactor de flama directa. Una de sus principales desventajas es la elevada temperatura que se llega a alcanzar en su cubierta de metal, lo que constituye un peligro definitivo de incendio. Las "salamandras" se deberán colocar donde no lleguen a sobrecalentar las cimbras ni los materiales del recinto. Cuando se coloquen sobre las losas de piso deberán elevarse para evitar abrasar al concreto.

Algunos calefactores queman más de un tipo de combustible. Los valores aproximados de calefacción de los combustibles son como sigue:

Combustóleo No. 1

8990 Kcal/L

\* Referencia 12-2.

Keroseno	8920 Kcal/L
Gasolina	8520 Kcal/L
Gas propano líquido	6090 Kcal/L
Gas natural	8900 Kcal/m <sup>3</sup>

Por lo general, la capacidad normal en kilocalorías de un calefactor portátil es el contenido de calor del combustible que se consume por hora. Una estimación aproximada consiste en considerar que se necesitan 32 Kcal para desarrollar un aumento de temperatura de 11°C por cada metro cúbico de aire.

También se puede utilizar electricidad para curar al concreto durante el invierno. Un método lo constituye el uso de cobertores eléctricos de gran tamaño equipados con termostatos. Los cobertores se pueden utilizar igualmente para descongelar subrasantes o cimentaciones de concreto.

Otro método consiste en emplear alambres de resistencia eléctrica, mismos que se cuelean dentro del concreto. La corriente que se suministra es menor de 50 voltios, y se necesitan de 2 a 6.5 kilowatt-horas de electricidad por metro cúbico de concreto, dependiendo de las circunstancias. Este método ha sido usado en el área de Montreal, Quebec, durante muchos años. Cuando se utilicen alambres de resistencia eléctrica, se deberán incluir aislantes durante el período de fraguado inicial. Si se retiran los aislantes antes del período recomendado, el concreto se deberá tapar con una cubierta impermeable y seguir con la corriente durante el tiempo requerido.

El vapor constituye otra fuente de calor para ser utilizado cuando se cuele en invierno. Se puede entubar vapor directo dentro de un recinto o suministrarlo a través de unidades radiantes de calor. Para mayor información referente al curado acelerado al vapor a temperaturas elevadas refiérase al Capítulo 10, "Curado del concreto".

Al elegir una fuente de calor, se deberá recordar que el concreto en sí mismo suministra calor a través de la hidratación del cemento, y que esa cantidad de calor a menudo resulta suficiente para las necesidades de curado si se le puede retener por medio de aislamientos.

## DURACION DE LA CALEFACCION

Después de que el concreto se encuentre en su sitio, deberá protegerse y conservarse a una temperatura de curado favorable hasta que adquiera la resistencia suficiente para soportar la exposición a las temperaturas bajas, al medio ambiente previsto, además de las cargas constructivas y de servicio. En la Tabla 12-2 se presentan los períodos de protección recomendados. Las columnas que llevan como encabezado "Por durabilidad" enlistan el período requerido en días para suministrar la durabilidad adecuada contra la exposición a la congelación y deshielo. Las columnas que tienen como encabezado "Por resistencia para descimbrar con seguridad" enlistan el período en días luego del cual se pueden retirar los fondos de las cimbras o puntales. Lo anterior se basa en la suposición de que durante la construcción las cargas serán menores que las previstas en el diseño y que las condiciones de curado normal permitirán al concreto alcanzar su resistencia total de diseño antes de poner en servicio a la estructura.

## Concepto de madurez

El concepto de madurez se basa en el principio de que el desarrollo de la resistencia es función del tiempo de curado y de la temperatura. El concepto de madurez, tal como lo describe el Reporte del Comité ACI 306 y las normas ASTM C 1074 y C 918, puede usarse para evaluar el desarrollo de la resistencia cuando las temperaturas prescritas para el curado no se hayan mantenido el tiempo requerido o cuando éstas hayan presentado fluctuaciones. El concepto se expresa mediante la ecuación

$$M = \Sigma(C - 10)\Delta t$$

donde

$M$  = factor de madurez

$\Sigma$  = sumatoria

$C$  = temperatura, grados Centígrados

$\Delta t$  = duración del curado a la temperatura  $C$ , normalmente en horas

La ecuación anterior se basa en la premisa de que el concreto desarrolla resistencia, o que el cemento continúa hidratándose a temperaturas tan bajas como -10°C.

Antes de que la construcción comience, se dibuja una curva de calibración graficando la relación entre la resistencia a la compresión y el factor de madurez para una serie de cilindros de prueba, con las proporciones de la mezcla de concreto en particular, curados en laboratorio y probados a edades sucesivas.

El concepto de madurez no es preciso y tiene ciertas limitantes. El concepto sólo es útil para supervisar el curado del concreto y para estimar la resistencia en relación con la edad y la temperatura. Supone que todos los demás factores que afectan la resistencia del concreto se han controlado adecuadamente. Por lo tanto, el concepto de madurez constituye otro método para monitorear las temperaturas, aunque no es ningún sustituto del control de calidad ni de las prácticas de colado apropiadas.\*

## Curado húmedo

El desarrollo de la resistencia se detiene al cesar la humedad necesaria para el curado. El concreto retenido en las cimbras o cubierto con aislamiento rara vez presenta una pérdida de humedad suficiente de 4°C a 13°C como para deteriorar al curado. Sin embargo, se necesita un medio propicio para dar curado húmedo a fin de compensar al secado cuando se empleen recintos con calefacción en climas fríos.

La disipación de vapor directo dentro de un recinto alrededor del concreto constituye un método excelente de curado porque proporciona tanto calor como humedad. El vapor resulta especialmente práctico en los climas extremadamente fríos porque la humedad suministrada compensa el rápido secado que se presenta al calentar aire muy frío.

Los compuestos líquidos formadores de membranas de curado se pueden emplear para el curado inicial de las super-

\* Consulte las Referencias 12-10 y 12-13 para mayor información.

ficies de concreto dentro de los recintos con calefacción. Estos compuestos también son útiles para reducir la carbonatación de la superficie que los calefactores sin ventilación llegan a provocar.

### Terminación del período de calefacción

Se deberán evitar los enfriamientos acelerados del concreto al finalizar el período de calefacción. Un enfriamiento repentino de la superficie del concreto mientras el interior aún se encuentra caliente puede ser causa de agrietamientos térmicos, especialmente en las secciones de gran volumen como lo son los estribos y pilas de puentes, presas y miembros estructurales grandes; por lo tanto, el enfriamiento deberá ser gradual. La caída uniforme máxima de temperatura durante las primeras 24 horas después de finalizar la protección no deberá superar las cantidades establecidas en la línea 5 de la Tabla 12-1. El enfriamiento gradual se puede lograr disminuyendo el calor o simplemente cerrando el calor y permitiendo que el recinto se enfríe alcanzando la temperatura del aire exterior.

### Remoción de cimbras y reapuntalamiento

En los climas fríos el dejar las cimbras en su lugar el mayor tiempo posible constituye una buena práctica. Aún dentro de los recintos con calefacción las cimbras sirven para distribuir más uniformemente el calor y para ayudar a prevenir el secado y el sobrecalentamiento en una zona.

La Tabla 12-2A se puede usar para determinar la duración en días que el soporte vertical deberá dejarse en su lugar. El período también constituye la duración que deberá mantenerse la temperatura requerida del concreto. La Tabla 12-2B enlista la duración en días de la calefacción y del apuntalamiento o reapuntalamiento de los miembros que queden totalmente esforzados. El ingeniero encargado deberá determinar el porcentaje de la resistencia de diseño que se requiera.

Las cimbras laterales se pueden retirar antes que los apuntalamientos y la obra falsa temporal.\*\*

## REFERENCIAS

- 12-1. McNeese, D.C., "Early Freezing of Non-Air-Entrained Concrete," *Journal of the American Concrete Institute Proceedings*, vol. 49, American Concrete Institute, Detroit, December 1952, pages 293-300.
- 12-2. Kauer, J. A., and Freeman, R. L., "Effect of Carbon Dioxide on Fresh Concrete," *Journal of the American Concrete Institute Proceedings*, vol. 52, December 1955, pages 447-454. Discussion: December 1955, Part II, pages 1299-1304, American Concrete Institute.
- 12-3. Powers, T.C., *Resistance of Concrete to Frost at Early Ages*, Research Department Bulletin RX071, Portland Cement Association, 1956.
- 12-4. Klieger, Paul, *Curing Requirements for Scale Resistance of Concrete*, Research Department Bulletin RX082, Portland Cement Association, 1957.
- 12-5. Klieger, Paul, *Effect of Mixing and Curing Temperature on Concrete Strength*, Research Department Bulletin RX103, Portland Cement Association, 1958.
- 12-6. Copeland, L. E.; Kantro, D. L.; and Verbeck, George, *Chemistry of Hydration of Portland Cement*, Research Department Bulletin RX153, Portland Cement Association, 1960, page 452.
- 12-7. Powers, T. C., *Prevention of Frost Damage to Green Concrete*, Research Department Bulletin RX148, Portland Cement Association, 1962.
- 12-8. Brewer, Harold W., *General Relation of Heat Flow Factors to the Unit Weight of Concrete*, Development Department Bulletin DX114, Portland Cement Association, 1967.
- 12-9. *Cold Weather Ready Mixed Concrete*, Publication No. 130, National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, 1968.
- 12-10. Malhotra, V. M., "Maturity Concept and the Estimation of Concrete Strength: A Review," Parts I and II, *Indian Concrete Journal*, vol. 48, Associated Cement Companies, Ltd., Bombay, April and May 1974.
- 12-11. Sprouse, J. H., and Pepler, R. B., "Setting Time," *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, STP169B, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1978, pages 105-121.
- 12-12. *Concrete Manual*, 8th ed., revised 1981, U.S. Bureau of Reclamation, Denver.
- 12-13. *Cold-Weather Concreting*, ACI 306R-78, revised 1983, ACI Committee 306 Report, American Concrete Institute.
- 12-14. *Recommended Practice for Concrete Formwork*, ACI 347-78, reapproved 1984, ACI Committee 347, American Concrete Institute.

\*\* Consulte la Referencia 12-14

## CAPITULO 13

# Cambios de Volumen en el Concreto

Es de utilidad al planear o analizar las obras de concreto, la comprensión de la naturaleza de ciertos cambios pues el concreto cambia ligeramente su volumen debido a varias razones. Si el concreto estuviera libre de todas las restricciones para deformarse, los cambios normales de volumen tendrían consecuencias mínimas; pero como el concreto en servicio normalmente queda restringido por las cimentaciones, las subrasantes, el refuerzo, o los miembros conectores, se pueden llegar a desarrollar esfuerzos de consideración. Lo anterior es particularmente cierto con los esfuerzos de tensión.

En ocasiones se desarrollan grietas, pues el concreto es relativamente débil a la tensión aunque muy resistente a la compresión. Los esfuerzos elevados y los agrietamientos se pueden evitar o minimizar si se controlan las variables que afectan a los cambios de volumen. Cuando se permita que el concreto reforzado se agriete o cuando no se pueda evitar el agrietamiento, en el diseño estructural se deberán considerar los anchos de grieta tolerables de la Tabla 13-1.

El cambio de volumen se define simplemente como un incremento o decremento del mismo. Más comúnmente, el tema de los cambios volumétricos en el concreto trata con la expansión y contracción debidas a ciclos de humedad y temperatura. No obstante, los cambios de volumen también son causados por efectos químicos como la contracción por carbonatación, el ataque de sulfatos y la expansión destructiva de las reacciones álcali-agregado. Del mismo modo, la fluencia es un cambio de volumen o deformación causada por la aplicación sostenida de un esfuerzo o carga. Igualmente importante resultan los cambios elástico o inelástico de dimensiones o formas que ocurren instantáneamente bajo la carga aplicada.

Por conveniencia, la magnitud de los cambios volumétricos generalmente se enuncia en unidades lineales en lugar de volumétricas. Los cambios de longitud a menudo se expresan en millonésimas y se pueden aplicar a cualquier unidad de longitud (cm/cm o pulg/pulg). Por ejemplo, una millonésima es 0.000001 cm/cm y 600 millonésimas son 0.000600 cm/cm. El cambio de longitud también puede expresarse como un porcentaje; así 0.06% es lo mismo que 0.000600, lo que incidentalmente es igual que 6 mm por cada 10 m. Los cambios de volumen que ocurren ordinariamente en el concreto son pequeños, variando en cambios longitudinales desde tal vez 10 millonésimas hasta aproximadamente 1000 millonésimas.

**Tabla 13-1. Anchos de grieta tolerables para concreto reforzado**

Condición de exposición	Ancho de grieta tolerable, mm
Secado al aire o membrana protectora	0.41
Humedad, aire húmedo, suelo	0.30
Productos químicos descongelantes	0.10
Agua de mar y brisa de agua de mar, humedecimiento y secado	0.15
Estructuras de retención de agua*	0.10

\*Excluyendo tuberías que no se encuentren bajo presión  
Referencia 13-39.

## CAMBIOS DE TEMPERATURA

El concreto se expande levemente conforme la temperatura se eleva y se contrae a medida que ésta baja, aunque se puede expandir ligeramente cuando el agua libre en el concreto se congela. Los cambios de temperatura pueden ser causados por las condiciones ambientales o por la hidratación del cemento. Un valor promedio para el coeficiente de dilatación térmica del concreto es de aproximadamente 10 millonésimas por grado Centígrado, aunque se han observado valores que varían de 6 a 13. Esto equivale a un cambio de longitud de 5 mm por 10 m de concreto sujeto a un aumento o disminución de 50°C. El coeficiente de dilatación térmica para el concreto ligero estructural varía desde 6.5 hasta 11 millonésimas por grado Centígrado.

La dilatación y contracción térmicas del concreto varían de acuerdo a factores tales como el tipo de agregado, el contenido de cemento, la relación agua-cemento, las variaciones de temperatura, la edad del concreto y la humedad relativa. De ellos, el tipo de agregado tiene la principal influencia.

La Tabla 13-2 muestra algunos valores experimentales de coeficientes de dilatación térmica de concretos fabricados con distintos tipos de agregados. Estos datos se obtuvieron de pruebas en especímenes pequeños de concreto en los que todos los factores fueron los mismos a excepción del tipo de agregado. El agregado fino fue del mismo material que el agregado grueso.

El coeficiente de dilatación térmica para el acero es de aproximadamente 12 millonésimas por grado Centígrado, el cual es comparable al del concreto. El valor del coeficiente

**Tabla 13-2. Efecto del tipo de agregado sobre el coeficiente de dilatación térmica del concreto**

Tipo de agregado (de una fuente)	Coefficiente de dilatación millonésimas por °C
Cuarzo	11.9
Arenisca	11.7
Grava	10.8
Granito	9.5
Basalto	8.6
Caliza	6.8

Fuente: Referencia 13-1. Nota: Los coeficientes de los concretos hechos con agregados provenientes de fuentes distintas pueden diferir ampliamente de estos valores, en especial de aquellos para gravas, granitos y calizas. El coeficiente para el concreto ligero estructural varía de 7.0 a 11.0 millonésimas por grado Centígrado, dependiendo del tipo de agregado y de la cantidad de arena natural.

para el concreto reforzado puede suponerse como 11 millonésimas por grado Centígrado, el promedio del concreto y del acero.

Los cambios de temperatura que resultan en acortamientos agrietarán los miembros de concreto que estén fuertemente restringidos por otra parte de la estructura o por fricción con el terreno. Considere una sección larga de concreto restringida y colada sin juntas a la que se permite descender la temperatura después del curado húmedo. A medida que ésta baja, el concreto tiende a acortarse, pero no puede hacerlo ya que se encuentra restringida longitudinalmente. Los esfuerzos de tensión que resultan, causan que el concreto se agriete. Tanto la resistencia a la tensión como el módulo de elasticidad del concreto se pueden suponer proporcionales a la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión del concreto, los cálculos muestran que una caída suficientemente grande de temperatura (dependiendo del tipo de agregado) agrietará al concreto sin importar su edad o resistencia, siempre que el coeficiente de dilatación no varíe con la temperatura y el concreto esté totalmente restringido.

Sigue un ejemplo de estos cálculos:\*

Suponga que el coeficiente de dilatación térmica del concreto,  $\alpha$ , es  $10 \times 10^{-6}/\text{C}$ . Si se le restringe firmemente en sus extremos contra la contracción, el esfuerzo de tensión en el concreto será de  $f = E \epsilon$  y

$$E = 15,114 \sqrt{f'_c} = 219,509 \text{ cuando } f'_c = 211 \text{ kg/cm}^2$$

Así, el esfuerzo de tensión será:

$$f = \frac{10 \times 0.219,509 \times 1,000,000}{1,000,000} = 2.20 \text{ kg/cm}^2/\text{C}$$

La resistencia a tensión del concreto  $f_t = 2 \sqrt{f'_c}$  y

$$f_t = 29 \text{ kg/cm}^2 \text{ cuando } f'_c = 211 \text{ kg/cm}^2$$

La caída de temperatura necesaria para agrietar al concreto es  $\Delta_t$  y

$$\Delta_t \frac{29.0}{2.20} = 13^\circ\text{C} \text{ cuando el concreto tenga una resistencia a la compresión de } 211 \text{ kg/cm}^2$$

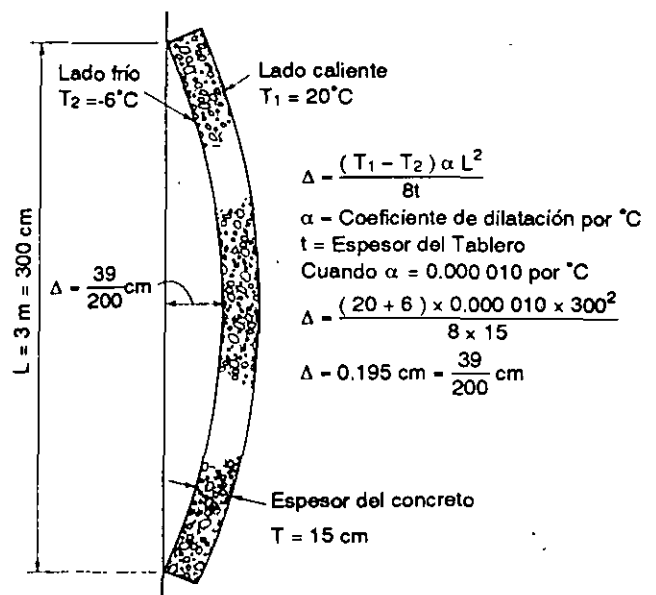
La ecuación general para  $\Delta_t$  a cualquier edad, suponiendo un coeficiente de contracción térmica constante, es

$$\Delta_t = \frac{f_t}{\alpha E} = \frac{2\sqrt{f'_c}}{\alpha \times 15,114 \sqrt{f'_c}} = \frac{1}{7600 \alpha}$$

Cuando  $\alpha = 10 \times 10^{-6}$ ,  $\Delta_t = 13^\circ\text{C}$  para cualquier edad o resistencia del concreto.

Los paneles para muros y losas precolados así como los pavimentos sobre el terreno son susceptibles a la flexión y al alabeo provocados por los gradientes de temperatura que se desarrollan cuando el concreto está frío de un lado y caliente del otro. La cantidad calculada de alabeo en un tablero de muro se ilustra en la Fig. 13-1.

Para el efecto de los cambios de temperatura en el concreto masivo ocasionados por el calor de hidratación, vea el Capítulo 15.



**Figura 13-1. Alabeo ocasionado por la temperatura en un tablero de concreto simple para muro, la variación de temperatura es uniforme desde el interior al exterior. Referencia -40**

### Temperaturas bajas

El concreto continúa contrayéndose a medida que la temperatura se reduce por debajo de la de congelación. La cantidad de cambio volumétrico a temperaturas bajo cero es afectada fuertemente por el contenido de humedad, el comportamiento del agua (estado físico - hielo o líquido) y el tipo de agregado en el concreto. En un estudio, el coeficiente de dilatación térmica para un intervalo de temperatura de  $24^\circ\text{C}$  a  $-157^\circ\text{C}$  varió de  $6 \times 10^{-6}$  por C para un concreto con agregado ligero hasta  $8 \times 10^{-6}$  por C para una mezcla de grava

\* Referencia 13-40, página 19.

y arena. Las temperaturas bajo cero pueden aumentar considerablemente la resistencia a compresión y tensión además del módulo de elasticidad del concreto húmedo. Las propiedades en el concreto seco no se afectan tanto por las temperaturas bajas. En el mismo estudio, el concreto húmedo con una resistencia original a la compresión de  $350 \text{ kg/cm}^2$  a  $24^\circ\text{C}$  alcanzó más de  $1200 \text{ kg/cm}^2$  a  $-100^\circ\text{C}$ , o sea un incremento de 240%. El mismo concreto que se probó en condición de secado al horno o con una humedad relativa interna de 50% sólo tuvo incrementos de resistencia de aproximadamente 20%. El módulo de elasticidad para el concreto con arena y grava con 50% de humedad relativa sólo fue 8% mayor a  $-157^\circ\text{C}$  que a  $24^\circ\text{C}$ , en tanto que el concreto húmedo tuvo un incremento de 50% en el módulo de elasticidad. Al pasar de  $24^\circ\text{C}$  a  $-157^\circ\text{C}$ , la conductividad térmica del concreto de peso normal también aumenta, principalmente para el concreto húmedo. La conductividad térmica del concreto con agregado ligero apenas es afectada.\*

### Temperaturas altas

Las temperaturas mayores de  $93^\circ\text{C}$  que se prolongan durante varios meses o aún varias horas pueden tener importantes efectos en el concreto. La magnitud total del cambio volumétrico es la suma de los cambios volumétricos de la pasta de cemento y del agregado. A temperaturas elevadas la pasta se contrae por deshidratación en tanto que el agregado se dilata. Para un concreto con agregado normal, la dilatación del agregado sobrepasa la contracción de la pasta causando una dilatación total en el concreto. Algunos agregados como la pizarra expandida, la andesita o la piedra pómez con coeficientes de dilatación bajos pueden producir un concreto con volumen muy estable en ambientes de temperaturas elevadas (vea el Capítulo 4 y la Fig. 13-2). Por otra parte, algunos agregados experimentan cambios volumétricos grandes y abruptos a una cierta temperatura particular, causando la falla del concreto. Por ejemplo, en un estudio un agregado de caliza dolomítica contenía una impureza de sulfuro de hierro que causó una expansión severa, agrietamientos y la desintegración del concreto sujeto a una temperatura de  $150^\circ\text{C}$  durante cuatro meses; a temperaturas superiores o inferiores de  $150^\circ\text{C}$  no se presentaba ninguna expansión

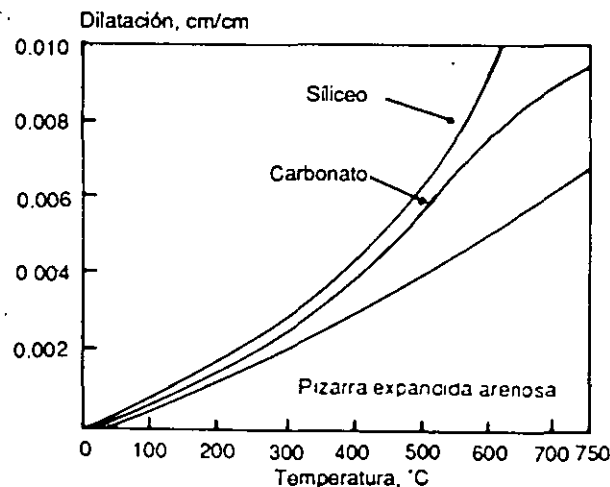


Figura 13-2. Dilatación térmica de concretos que contienen distintos tipos de agregado. Referencia 13-36.

nociva.\*\* El coeficiente de dilatación térmica tiende a aumentar con los incrementos de temperatura.

Aparte del cambio de volumen, el sostenimiento de temperaturas elevadas también puede tener otros efectos normalmente irreversibles, tales como la reducción de resistencia, del módulo de elasticidad y de conductividad térmica. La fluencia aumenta con la temperatura. Arriba de  $100^\circ\text{C}$ , la pasta comienza a deshidratarse; es decir, a perder químicamente el agua combinada de hidratación provocando con ello considerables pérdidas de resistencia. La resistencia disminuye con los aumentos de temperatura hasta que el concreto llega a perder esencialmente toda su resistencia. El efecto de la exposición a las temperaturas elevadas sobre la resistencia a la compresión de concretos específicos sin restricciones se ilustra en la Fig. 13-3. Varios factores, entre los que se incluyen al contenido de humedad del concreto, tipo y estabilidad del agregado, contenido de cemento, tiempo de exposición, a la velocidad del aumento de temperatura, edad del concreto, grado de restricción, y esfuerzo existente, todos ellos influyen sobre el comportamiento del concreto a temperaturas elevadas.

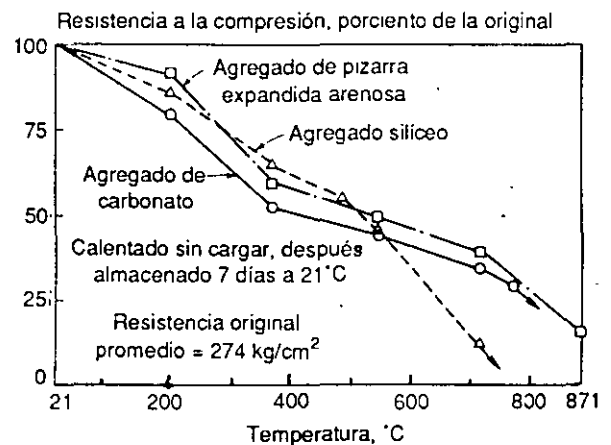


Figura 13-3. Efecto de las temperaturas elevadas sobre la resistencia residual a la compresión de concretos que contienen distintos tipos de agregado. Referencia 13-33.

Si se emplean agregados estables y se considera la reducción de resistencia, además de los efectos sobre otras características en el diseño de la mezcla, se podrá sujetar a un concreto de alta calidad a temperaturas entre  $93$  y  $204^\circ\text{C}$  durante periodos prolongados. A pesar que algunos elementos de concreto han quedado expuestos a temperaturas de hasta  $260^\circ\text{C}$  e incluso de  $316^\circ\text{C}$  durante periodos prolongados, se deberán adoptar precauciones especiales o considerar el uso de materiales específicos (tales como el cemento resistente al calor con contenido elevado de alúmina) para la exposición a temperaturas superiores de  $204^\circ\text{C}$ . Antes de que cualquier concreto estructural quede expuesto a temperaturas elevadas, mayores de  $93^\circ\text{C}$ , se deberán llevar a cabo pruebas de laboratorio para determinar las propiedades térmicas del concreto en particular para evitar la ocurrencia de fallas inesperadas.\*\*\*

\* Referencias 13-13 y 13-23.

\*\* Referencia 13-42.

\*\*\* Referencias 13-8, 13-9, 13-20, 13-22, 13-25, 13-29, 13-30, 13-31, 13-32, 13-33, 13-36, 13-37, 13-38, 13-42 y 13-45.



## CAMBIOS DE HUMEDAD (CONTRACCION POR SECADO)

El concreto se expande ligeramente con el aumento de humedad y se contrae con una pérdida de la misma. Los efectos de estos movimientos de humedad se ilustran esquemáticamente en la Fig. 13-4. El espécimen A representa al concreto almacenado de manera continua en agua desde el colado; el espécimen B representa el mismo concreto primeramente expuesto a un secado al aire y después a ciclos alternos de humedecimiento y secado. Para efectos comparativos, se puede notar que el hinchamiento que ocurre durante el almacenamiento húmedo continuo luego de un periodo de varios años, normalmente es menor que 150 millonésimas o aproximadamente un cuarto de la contracción del concreto secado al aire durante el mismo periodo.

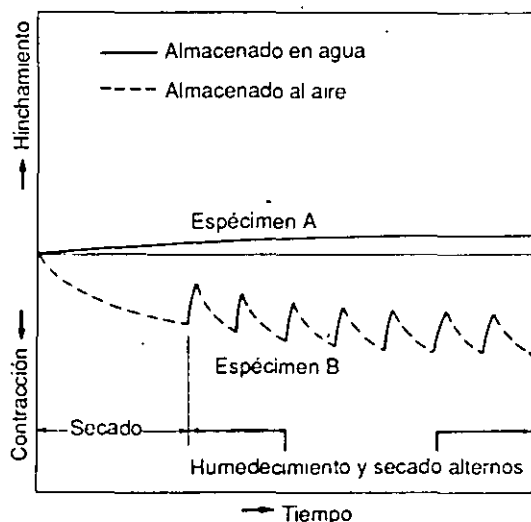


Figura 13-4. Ilustración esquemática de los movimientos de la humedad en el concreto. Si el concreto se mantiene continuamente húmedo, ocurre una leve expansión. Sin embargo, normalmente ocurre el secado, provocando contracción. El subsecuente humedecimiento y secado provoca expansión y contracción alternas. Referencia 13-12.

Las pruebas indican que la contracción por secado de especímenes pequeños de concreto simple, sin refuerzo, varía de 400 hasta 800 millonésimas aproximadamente cuando se les expone al aire a una humedad de 50%. El concreto con una contracción unitaria de 550 millonésimas acorta aproximadamente la misma cantidad que la contracción térmica causada por un descenso de temperatura de 38°C. El concreto con agregado precolocado tiene una contracción por secado entre 200 y 400 millonésimas, considerablemente menos que el concreto normal debido al contacto punta-a-punta entre las partículas del agregado. La contracción por secado del concreto ligero estructural varía desde poco menos de 30 por ciento más que la del concreto de peso normal, dependiendo del tipo de agregado que se emplee.

La contracción del concreto reforzado es menor que la del concreto simple; la diferencia depende de la cantidad de refuerzo. El acero de refuerzo restringe aunque no evita la contracción

por secado. En las estructuras de concreto reforzado con cantidades normales de refuerzo, comúnmente se supone que la contracción por secado es de 200 a 300 millonésimas.

Para muchas aplicaciones en exteriores, el concreto alcanza su contenido máximo de humedad en el invierno; así que durante este periodo los cambios volumétricos debidos al aumento en el contenido de humedad y al descenso en el promedio de la temperatura generalmente se compensan entre sí.

La cantidad de humedad en el concreto es afectada por la humedad relativa del aire que le rodea. El contenido libre de humedad de los elementos del concreto después del secado en el aire entre humedades relativas de 50% a 90% durante varios meses es aproximadamente del 1% al 2% por peso del concreto dependiendo de los componentes del concreto, del contenido de agua original, de las condiciones de secado, y del tamaño y forma del elemento de concreto.

Luego que el concreto se haya secado hasta un contenido de humedad constante bajo una cierta condición de humedad relativa, un descenso en la humedad relativa provocará que pierda contenido de humedad y un aumento causará que gane humedad. El concreto se contrae o se expande con cada uno de esos cambios en el contenido de humedad debido principalmente a la respuesta de la pasta de cemento en relación a la pérdida de humedad. La mayoría de los agregados manifiestan poca respuesta a los cambios de contenido de humedad, aunque existen unos cuantos agregados que se hinchan o se contraen en respuesta a tales cambios.

Conforme ocurre el proceso de secado, el concreto en las cercanías de la superficie se seca y se contrae con mayor rapidez que el concreto en el interior, provocando esfuerzos de tensión y posibles agrietamientos. Podrían desarrollarse agrietamientos aleatorios de importancia si las juntas no fueron planeadas adecuadamente y si el elemento de concreto se encuentra restringido en cuanto a su acortamiento (Fig. 13-5). Se ilustra en la fig. 13-6 la relación entre la velocidad de secado a distintas profundidades, contracción por secado, y pérdida de peso para concretos de peso normal.\*

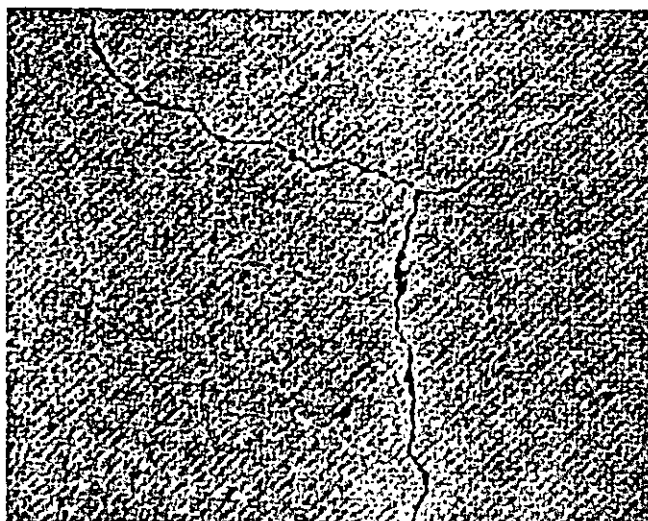


Figura 13-5. Las grietas por contracción por secado como estas se originan frecuentemente por la adopción de espaciamientos inadecuados entre las juntas.

\* La Referencia 13-28 también da relaciones para concreto ligero.

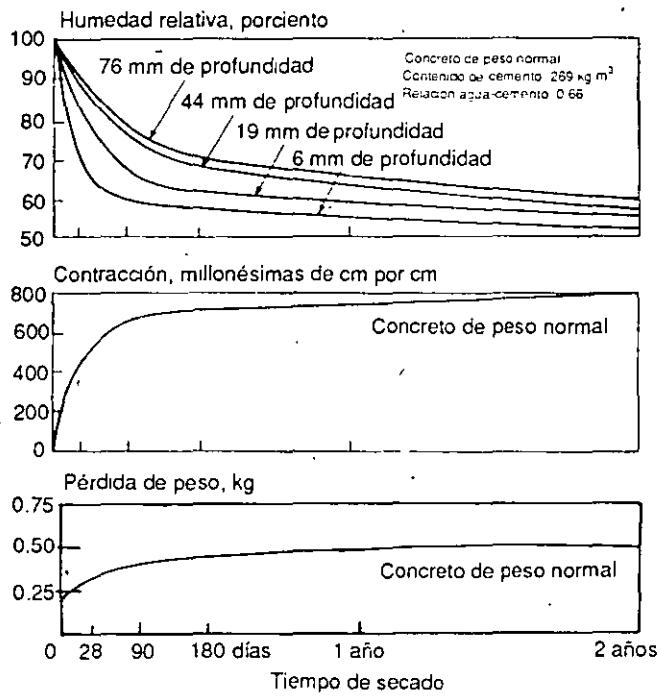


Figura 13-6. Distribución de la humedad relativa, contracción por secado y pérdida de peso de cilindros de 15 x 30 cm que tuvieron un curado húmedo durante 7 días al que siguió un secado a 23°C y 50% de humedad relativa. Referencia 13-28.

La contracción puede continuar durante varios años, dependiendo del tamaño y forma del concreto. La velocidad y la cantidad última de contracción normalmente son menores para los volúmenes grandes de concreto que para los de menor tamaño, aunque la contracción continúa durante más tiempo para los volúmenes grandes. Las mayores relaciones volumen a superficie (elementos de mayor tamaño) presentan una menor contracción, como se muestra en la Fig. 13-7.

La velocidad y la cantidad de contracción por secado para especímenes de concreto pequeños se muestran en la Fig. 13-8. Los especímenes tuvieron inicialmente un curado húmedo durante 14 días a 21°C, luego se almacenaron durante 38 meses al aire con la misma temperatura y con una humedad relativa de 50%. La contracción registrada a la edad de 38 meses varió desde 600 hasta 790 millonésimas. Un 34% en promedio de esta contracción ocurrió durante el primer mes. Al cabo de 11 meses había tenido lugar un 90% en promedio de la contracción a 38 meses. Se puede notar la uniformidad general de las contracciones para todos los tipos de cemento a diferentes edades.

Si el esfuerzo de tensión provocado por la restricción de la contracción por secado llega a rebasar la resistencia a tensión del concreto, se desarrollarán agrietamientos. Cuando no exista ninguna restricción, los movimientos ocurrirán libremente y no se desarrollarán ni esfuerzos ni grietas. En el Capítulo 9 se presentan recomendaciones para espaciamientos de juntas adecuados con el propósito de controlar las grietas. Para contar con información sobre los cambios volumétricos a edad temprana consulte la parte de "Agrietamientos por contracción plástica" en el Capítulo 11.

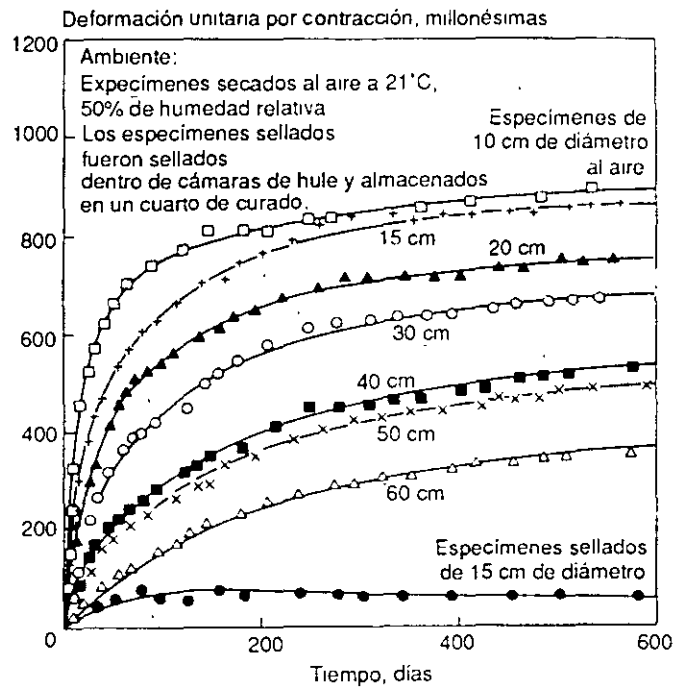


Figura 13-7. Contracción por secado de varios tamaños de especímenes cilíndricos de concreto con grava Elgin. Referencia 13-24.

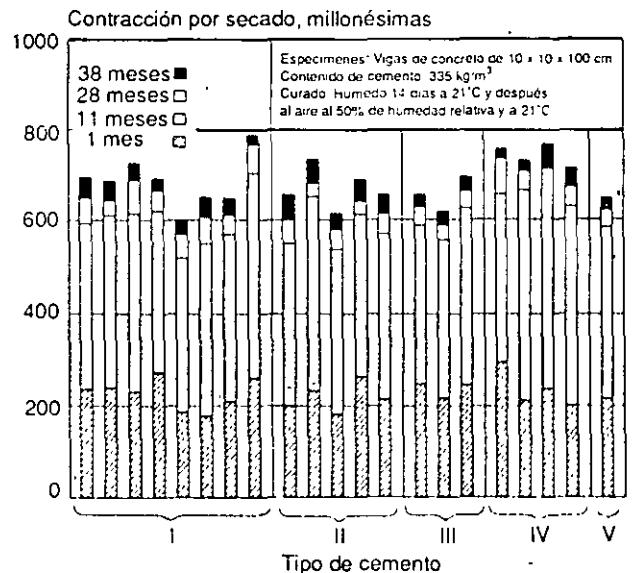


Figura 13-8. Resultados de pruebas de contracción por secado a largo plazo llevados a cabo por el «Bureau of Reclamation» de los E.E.U.U. La contracción varió de 600 a 790 millonésimas luego de 38 meses de secado. La contracción de los concretos fabricados con cementos inclusores de aire fue similar a la de los concretos sin aire incluido en este estudio. Referencias 13-4 y 13-6.

### Efecto de los ingredientes del concreto en la contracción por secado

El factor a controlar más importante que afecta a la contracción es la cantidad de agua por volumen unitario de concreto. Los resultados de pruebas que ilustran la relación

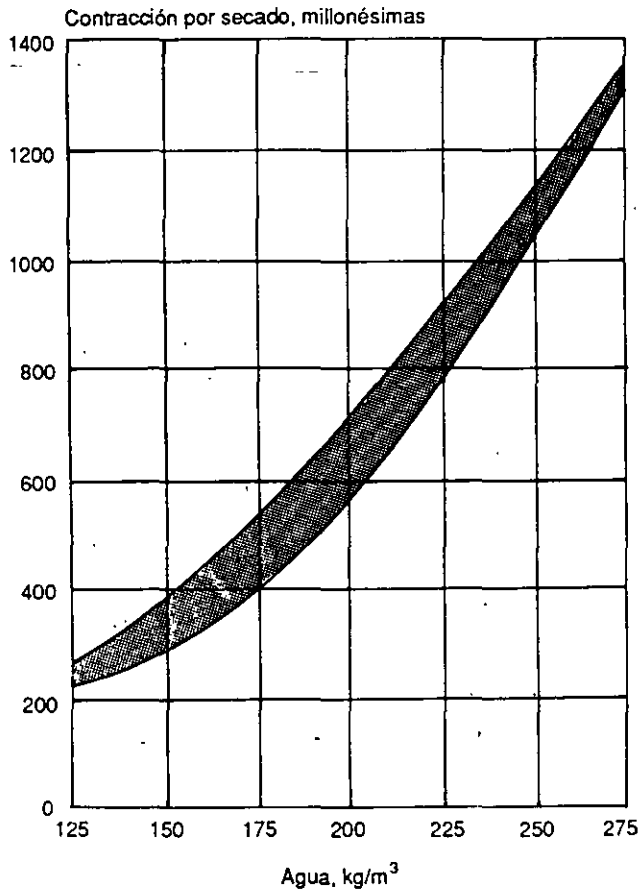


Figura 13-9. Relación entre contenido total de agua y contracción por secado. Un gran número de mezclas con distintas proporciones está representado dentro del área entre curvas. La contracción por secado aumenta al incrementar los contenidos de agua.

contenido de agua-contracción se muestran en la Fig. 13-9. La contracción se puede minimizar si el contenido de agua del concreto se mantiene lo más bajo posible. Esto se logra haciendo que el contenido total de agregado grueso sea lo más alto posible. Por lo tanto, los principales factores para controlar la contracción en el concreto son el empleo de revenimientos bajos y de métodos de colado que minimicen los requisitos de agua. Cualquier práctica que incremente la cantidad de agua necesaria en la pasta de cemento, como son el uso de revenimientos elevados, la presencia de temperaturas excesivamente altas en el concreto fresco, los contenidos elevados de agregado fino, o el uso de agregado grueso de tamaño pequeño, propiciarán un aumento de contracción. Trabajos desarrollados en el Instituto Tecnológico de Massachusetts han mostrado que por cada incremento de 1% en el agua de mezclado, la contracción del concreto aumentó aproximadamente 2%.\*

El tipo de cemento, su finura y composición, además del contenido de cemento tienen un efecto relativamente pequeño en la contracción por secado de los concretos de resistencia normal. La Tabla 13-3 ilustra que dentro del rango de las mezclas de concreto prácticas - 275 a 450 kg de cemento por metro cúbico - el contenido de cemento tiene poco efecto en la contracción del concreto.

Los agregados del concreto, principalmente el agregado grueso, restringen físicamente la contracción de la pasta de cemento hidratada. El contenido de pasta afecta más a la contracción por secado del mortero que a la del concreto. La contracción por secado también depende del tipo de agregado. Los agregados rígidos y duros son difíciles de comprimir y brindan mayor restricción a la contracción de la pasta de cemento. Como ejemplo extremo, si se usaran bolas de acero para sustituir el agregado grueso ordinario, la contracción se reduciría 30% ó más. La contracción por secado también puede reducirse evitando agregados que tengan características de contracción por secado elevadas y agregados que contengan cantidades excesivas de arcilla. Los agregados de cuarzo, granito, feldespato, caliza, y dolomita generalmente producen concretos con contracciones por secado bajas.\*\* El curado al vapor también reduce la contracción por secado. (Consulte el Capítulo 10, "Curado del concreto.")

Algunos aditivos requieren un aumento en el contenido unitario de agua del concreto y por esta razón es de esperarse que incrementen la contracción por secado. El uso de acelerantes tales como el cloruro de calcio producen una mayor contracción por secado en el concreto. A pesar de las reducciones en el contenido de agua, muchos aditivos químicos reductores de agua aumentan la contracción por secado de manera sustancial, particularmente aquellos que contienen acelerantes para compensar el efecto retardante del aditivo. La inclusión de aire así como algunos aditivos minerales finamente divididos tales como la ceniza volante, tienen poco o ningún efecto en la contracción por secado. La contracción por secado se puede evaluar conforme a la norma ASTM C 157.

## ALABEO (COMBADURA)

Además del movimiento horizontal provocado por los cambios de humedad y de temperatura, el alabeo de las losas sobre el terreno puede ser causado por las diferencias de contenido de humedad y temperatura entre las partes superiores e inferiores de las losas.

Los bordes en las juntas tienden a alabearse hacia arriba cuando la superficie de alguna losa está más seca o fría que el fondo. Una losa presentará un alabeo invertido cuando la superficie esté más húmeda o caliente que el fondo, aunque las losas de interiores como las de los pisos sobre el terreno, solamente tienen alabeos hacia arriba. Cuando los bordes de una losa de piso industrial se encuentran alabeados hacia arriba, el tránsito de los montacargas sobre las juntas causa una deflexión vertical repetitiva que crea un gran potencial de agrietamiento por fatiga en la losa. La cantidad de alabeo hacia arriba (combadura) es pequeña para una losa corta y gruesa.

A pesar de que los diseñadores están enterados de los efectos de humedad y de la existencia del alabeo en las losas, tienden solamente a hacer uso de los cambios de temperatura como factor de diseño para determinar la longitud de las losas y el tamaño de las aberturas de las juntas.†

\* Referencia 13-2, página 425.

\*\* Referencia 13-39.

† Referencia 13-40.

**Tabla 13-3. Efecto del contenido de cemento en la contracción por secado del concreto\***

Contenido de cemento, kg/metro cúbico	Composición del concreto por volumen absoluto*					Agua † aire	Relación agua/cemento en peso	Revenimiento, cm	Contracción ††
	Cemento	Agua	Aire	Total, pasta	Agregado				
278.3	0.089	0.202	0.017	0.308	0.692	0.219	0.72	8.4	0.0330
334.1	0.107	0.207	0.016	0.330	0.670	0.223	0.62	9.1	0.0330
389.3	0.124	0.210	0.014	0.348	0.652	0.224	0.54	9.7	0.0289
447.3	0.143	0.207	0.015	0.365	0.635	0.223	0.46	9.7	0.0300

\* Arena "American River" y grava graduada hasta un tamaño máximo de 25 mm (1").

† Promedio de 3 mezclas.

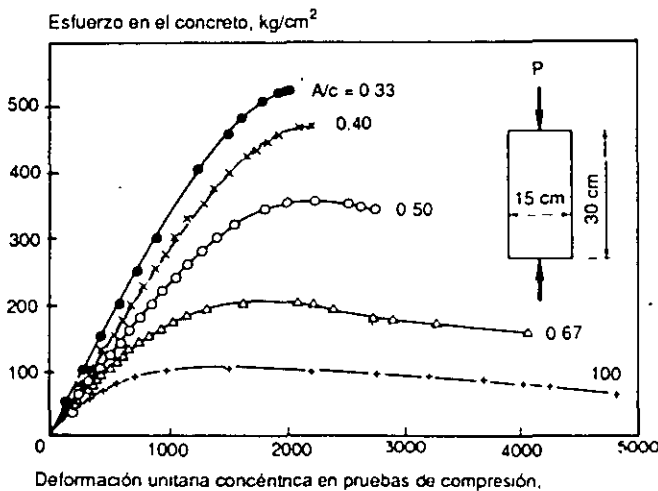
†† Promedio de nueve prismas de 7.5 x 7.5 x 25 cm con curado húmedo durante 7 días, y después curados durante 14 días.

El alabeo se puede reducir o eliminar mediante el empleo de técnicas de diseño y construcción que minimicen los diferenciales de contracción y mediante la utilización de las técnicas anteriormente descritas para reducir los cambios volumétricos que se relacionan con la temperatura y la humedad.\*

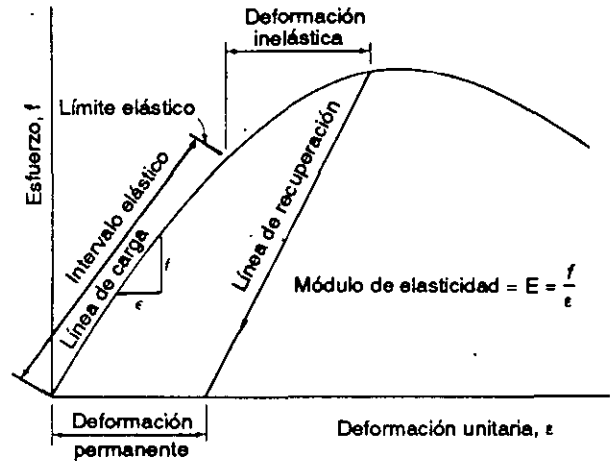
## DEFORMACION ELASTICA E INELASTICA

### Deformación unitaria por compresión

La serie de curvas de la Fig. 13-10 ilustra la cantidad de esfuerzo compresivo y de deformación unitaria que resulta instantáneamente debido a la carga del concreto simple. Con relaciones agua-cemento de 0.50 ó menores y deformaciones unitarias hasta 1500 millonésimas, las tres curvas superiores muestran que la deformación unitaria es estrechamente proporcional al esfuerzo; en otras palabras, que el concreto es casi elástico. Las porciones superiores de las curvas y más allá de éstas muestran que el concreto es inelástico. Las curvas para el concreto de alta resistencia tienen cúspides agudas, mientras que las curvas para concretos de resistencias menores tienen cúspides largas y relativamente llanas.



**Figura 13-10. Curvas esfuerzo-deformación unitaria para pruebas a compresión de cilindros de concreto de 15 x 30 cm a la edad de 28 días. Referencia 13-7.**



**Figura 13-11. Curva generalizada; esfuerzo-deformación unitaria para el concreto. Referencia 13-40.**

También la Fig. 13-10 muestra las características de falla súbita de los cilindros de concreto de resistencias superiores.

Cuando se libera de carga al concreto en la zona inelástica, la línea de recuperación normalmente no es paralela a la línea original para la primera aplicación de carga. Por lo tanto, la cantidad de deformación permanente puede diferir de la cantidad de deformación inelástica (Fig. 13-11).

El uso del término "elástico" no es muy favorecedor para las discusiones generales sobre el comportamiento del concreto porque con frecuencia la deformación unitaria se puede encontrar dentro del rango inelástico. Por esta razón, a menudo se utiliza el término "deformación unitaria instantánea".

### Módulo de elasticidad

La relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria dentro del intervalo elástico de una curva esfuerzo-deformación unitaria para el concreto define al módulo de elasticidad (E) de aquel concreto (Fig. 13-11). El concreto de peso normal tiene un módulo de elasticidad entre 140,620 y 421,860 kg/cm<sup>2</sup>, dependiendo de factores tales como la resistencia a

\* Consulte las Referencias 13-46 y 13-47 para mayor información.

la compresión y el tipo de agregado. Para los concretos de peso normal con resistencias a la compresión ( $f'_c$ ) entre 210 y 350 kg/cm<sup>2</sup>, el módulo de elasticidad puede estimarse como 15,114 veces la raíz cuadrada de  $f'_c$ . El módulo de elasticidad para el concreto ligero estructural se encuentra entre 70,310 y 175,775 kg/cm<sup>2</sup>. Se podrá determinar el valor de E para cualquier concreto en particular conforme a la norma ASTM C 469.

## Deflexión

La deflexión de las vigas y losas de concreto es uno de los movimientos más comunes y obvios en los edificios. Las flechas son resultado de las deformaciones por flexión que se desarrollan bajo la acción de la carga muerta y de las cargas vivas que podrían producir agrietamientos en la zona de tensión de los elementos de concreto. El diseño estructural del concreto reforzado previene estas grietas de tensión. La Sección 10.6. "Comentarios sobre los requisitos del reglamento de construcción para el concreto reforzado" del Reglamento ACI 318R-83, limita el ancho de grietas por flexión a 0.41 mm para los concretos en interiores y a 0.33 mm para concretos en exteriores. La Tabla 13-1 enlista los anchos de grieta tolerables para el concreto reforzado con respecto a varias condiciones de exposición.\*

Los miembros de concreto a menudo se contraflechean, es decir, se construyen con un arco hacia arriba, a fin de compensar la deflexión esperada.

## Relación de Poisson

Cuando un bloque de concreto se carga a compresión uniaxial, como se muestra en la Fig. 13-12, se acorta y al mismo tiempo desarrolla una deformación unitaria lateral o abombamiento. La relación entre la deformación unitaria lateral y la deformación unitaria axial se denomina relación

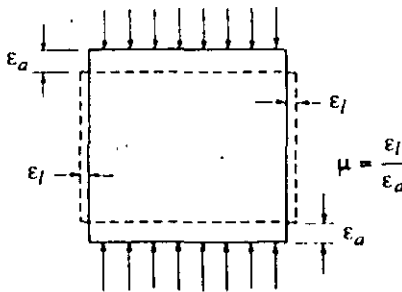


Figura 13-12. La relación existente entre la deformación unitaria lateral y la axial es la relación de Poisson,  $\mu$ . Referencia 13-40.

de Poisson. El valor que se utiliza comúnmente es 0.20 a 0.21, aunque puede variar desde 0.15 hasta 0.25 dependiendo del agregado, contenido de humedad, edad del concreto, y resistencia a la compresión. La relación de Poisson (ASTM C 469) generalmente no resulta de interés para el ingeniero estructural, aunque se utiliza en el análisis estructural avanzado de placas planas para pisos, cascarones para cubiertas, presas de arco y losas de cimentaciones.

## Deformación unitaria por cortante

El concreto, como otros materiales, se deforma bajo la acción de las fuerzas de cortante. La deformación unitaria por cortante que se produce es importante para determinar las trayectorias de carga o la distribución de fuerzas en las estructuras indeterminadas - por ejemplo, cuando tanto los muros de cortante como las columnas participan para resistir las fuerzas horizontales en un marco de concreto de un edificio. La cuantía del movimiento, aunque no grande, es de importancia

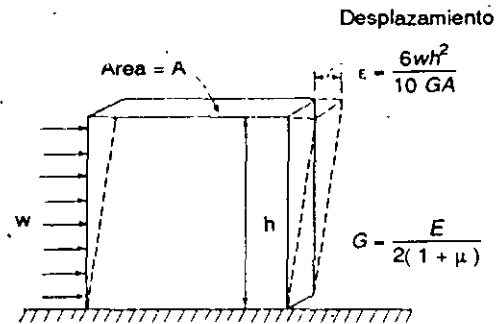


Figura 13-13. Deformación unitaria ocasionada por fuerzas cortantes en un cuerpo.  $G$ =módulo de cortante.  $\mu$ =relación de Poisson. No se muestra la deformación unitaria ocasionada por la flexión. Referencia 13-40.

en los miembros cortos; en los miembros de mayor tamaño pierde importancia ante las deformaciones unitarias por flexión.

El módulo de cortante (módulo de rigidez),  $G$ , en la Fig 13-13, varía con la resistencia y temperatura del concreto. Cuando la resistencia a la compresión se encuentra entre 280 y 350 kg/cm<sup>2</sup>,  $G$  a 24°C es aproximadamente un 42% del módulo de elasticidad,  $E$ .\*\*

## Deformación unitaria por torsión

Los miembros rectangulares de concreto simple también pueden fallar por torsión, es decir, por la acción de giro provocada al doblar alrededor de un eje paralelo a la cara más ancha e inclinada un ángulo de aproximadamente 45 grados del eje longitudinal de un miembro. A momentos torsionantes bajos se desarrollan microgrietas; sin embargo, el concreto se comporta de manera razonablemente elástica hasta el límite máximo del momento torsionante elástico.\*\*\*

## FLUENCIA

Cuando se carga al concreto, la deformación causada por la carga se puede dividir en dos partes: a) deformación que ocurre de manera inmediata (tal como la deformación unitaria elástica) y

\* En la Referencia 13-40 se muestran cálculos de flechas por flexión y de anchos de grietas.

\*\* Referencias 13-22 y 13-40.

\*\*\* Referencia 13-27.

b) deformación que depende del tiempo, es decir, que comienza inmediatamente pero continúa a una proporción decreciente durante el tiempo en que el concreto se encuentre cargado. Esta última deformación se conoce como fluencia.

La magnitud de la fluencia dependerá de (1) la magnitud del esfuerzo, (2) la edad y resistencia del concreto cuando se le aplique el esfuerzo, y (3) el periodo durante el cual el concreto se encuentre cargado. También la fluencia se ve afectada por otros factores que se relacionan con la calidad del concreto y las condiciones de exposición, como el tipo, cantidad, y tamaño máximo del agregado; tipo de cemento; cantidad de pasta de agregado; tamaño y forma del miembro de concreto; relación volumen a superficie; cantidad de acero de refuerzo; condiciones previas de curado; y la temperatura y humedad del ambiente.

Dentro de los rangos normales de esfuerzos, la fluencia es proporcional al esfuerzo. En los concretos de edad relativamente corta, el cambio de volumen o de longitud debido a la fluencia es en gran medida irrecuperable; en los concretos de mayor edad o más secos es en su mayor parte recuperable.

Las curvas de fluencia que se muestran en la Fig. 13-14 están basadas en los resultados de pruebas efectuadas bajo condiciones de laboratorio conformes con la norma ASTM C 512. Los cilindros estuvieron cargados hasta casi el 40% de su resistencia a la compresión. Los cilindros hermanos no sujetos a carga se emplearon para medir la contracción por secado que fue entonces sustraída de la deformación total de los especímenes cargados para determinar la fluencia. Se permitió que los cilindros se secaran mientras estuvieran bajo carga, a excepción de los cilindros marcados como "sellados".

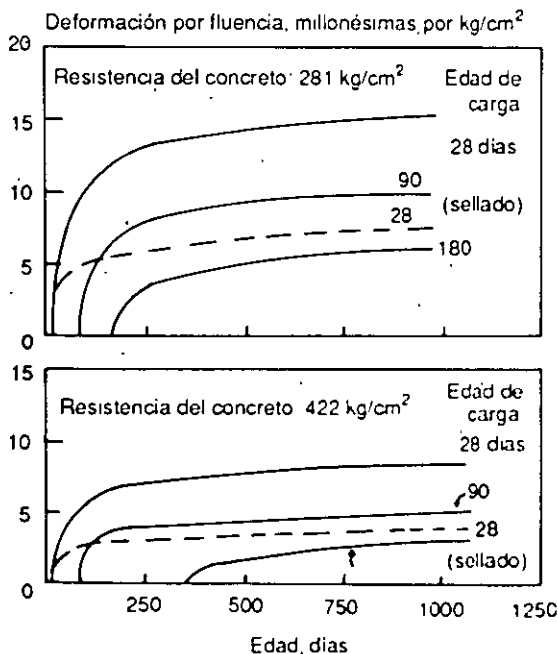


Figura 13-14. Relación entre el tiempo y edad de carga con la fluencia para dos concretos de resistencias distintas. Se permitió secar a los especímenes durante la carga, a excepción de los señalados como sellados. Referencia 13-34, actualizada.

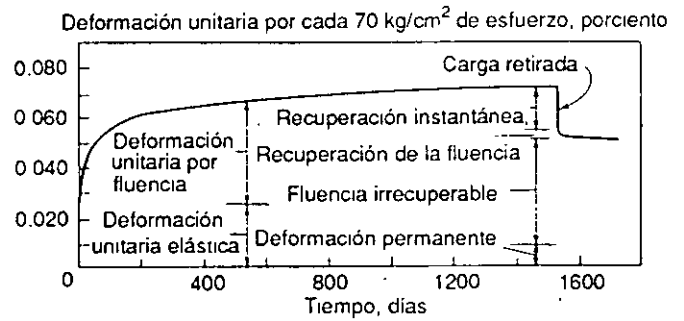


Figura 13-15. Curva combinada de deformaciones elásticas y fluencia mostrando la magnitud de recuperación. Los especímenes (cilindros) se cargaron a los 8 días inmediatamente después de su retiro del cuarto de curado y después se almacenaron a 21°C y 50% de humedad relativa. El esfuerzo aplicado fue igual al 25% de la resistencia a compresión a los 8 días. Referencias 13-24 y 13-40.

Las dos curvas a 28 días para cada resistencia del concreto en la Fig. 13-14 demuestran que la fluencia del concreto cargado bajo condiciones de secado es mayor que la fluencia del concreto sellado al que no se le permitió secarse. Los especímenes de concreto cargados a una edad tardía fluyen menos que los cargados a una mayor edad. Se puede notar que a medida que la resistencia del concreto disminuye, la fluencia aumenta. La Fig. 13-15 ilustra la recuperación de las deformaciones unitarias elástica y de fluencia después del retiro de la carga.

En la Fig. 13-16 se muestra una combinación de las deformaciones unitarias que ocurren en una columna reforzada. Las curvas representan deformaciones y cambios volumétricos en una columna del piso 14 de un edificio de concreto reforzado de 76 pisos mientras estuvo en construcción. La columna de 40 x 122 cm contenía 2.08% de refuerzo vertical y fue diseñada para concreto de 633 kg/cm<sup>2</sup>.

El método de curado anterior a la carga tiene un marcado efecto en la magnitud de la fluencia del concreto. Los efectos que tienen tres métodos de curado distintos sobre la fluencia se muestran en la Fig. 13-17. Note que ocurre muy poca fluencia en el concreto curado con vapor de alta presión (autoclave). Note también que el concreto curado al vapor a presión atmosférica tiene una fluencia considerablemente menor que el concreto con curado húmedo durante 7 días. Los dos métodos de curado al vapor mostrados en la Fig. 13-17 reducen la contracción por secado del concreto en aproximadamente la mitad de lo que reducen la fluencia.

## CAMBIOS QUÍMICOS Y SUS EFECTOS

Algunos cambios volumétricos del concreto son resultado de reacciones químicas que pueden tener lugar poco después del colado y acabado o por reacciones posteriores en el interior del concreto endurecido en presencia de agua o humedad.

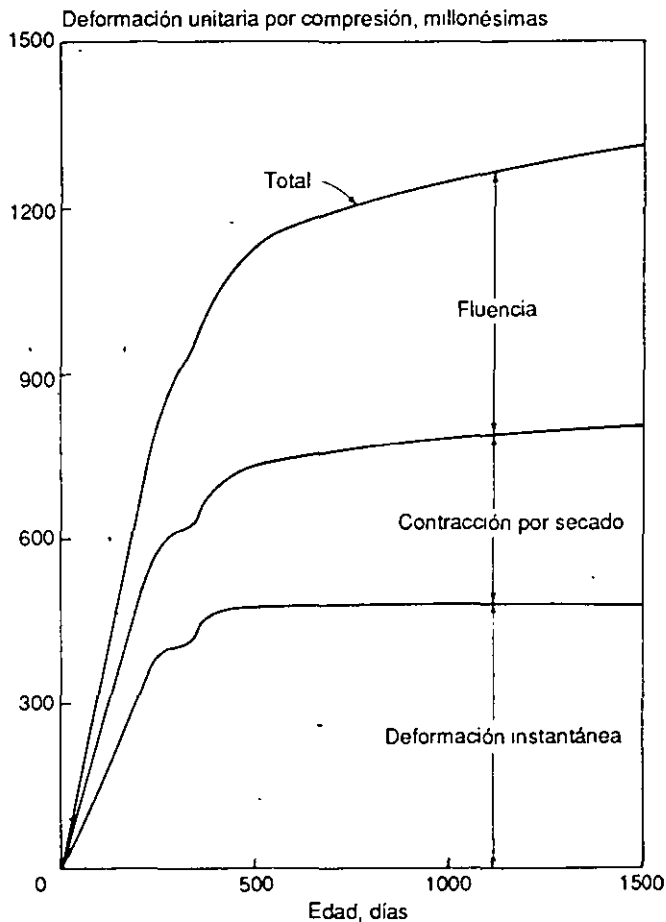


Figura 13-16. Suma de las deformaciones unitarias en una columna de concreto reforzado durante la construcción de un edificio elevado. Referencia 13-34.

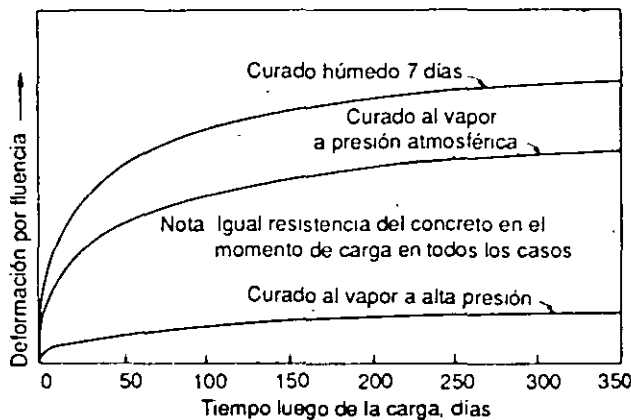


Figura 13-17. Efecto que tiene el método de curado en la cantidad de fluencia para un concreto típico de peso normal. Referencia 13-19.

### Carbonatación

Un concreto endurecido que contenga cierta humedad reaccionará con el bióxido de carbono, que se encuentre presente en el aire, en una reacción que produce una ligera

contracción del concreto. El efecto, conocido como carbonatación, no es destructivo sino que realmente incrementa la estabilidad química y la resistencia del concreto. Sin embargo, la carbonatación también reduce el PH de concreto y si se encuentra acero en el área carbonatada, podría ocurrir la corrosión del acero en ausencia de la película protectora de óxido que normalmente proporciona el elevado PH del concreto.

La formación expansiva de herrumbre produce expansiones, agrietamientos y descantilladuras en el concreto.\* La profundidad de la reacción de carbonatación es mínima (normalmente menos de 2.5 mm, dependiendo de la edad y de las condiciones de exposición) en los concretos densos y de buena calidad, aunque puede penetrar una gran profundidad en los concretos porosos y de calidad baja. Durante su manufactura algunas unidades de mampostería de concreto se someten deliberadamente al bióxido de carbono después de haber alcanzado el 80% de su resistencia estimada con el propósito de inducir la contracción por carbonatación y dar una mayor estabilidad dimensional a las unidades. La ulterior contracción por secado se ve reducida un 30% ó más.\*\*

Una causa de los agrietamientos irregulares en la superficie del concreto es la contracción que acompaña a la carbonatación natural del aire en los concretos frescos.

También puede ocurrir una carbonatación de otra clase en el concreto fresco, sin endurecer. Esta carbonatación, que produce como resultado una superficie suave y gredosa también conocida como levantamiento de polvo, normalmente tiene lugar durante las operaciones de colado en clima frío cuando existe una cantidad anormal de bióxido de carbono en el aire por el uso de calefactores sin ventilación o de equipo con motor de gasolina dentro de un recinto. No presenta acompañado de agrietamientos o movimientos importantes, y el peligro desaparece después de que el concreto ha cumplido 24 horas de edad.

### Ataque de sulfatos

Un concreto puede ser atacado por sulfatos cuando el suelo y el agua freática tienen un contenido elevado de sulfatos y cuando no se toman las medidas necesarias para reducir el ataque de estos elementos, las cuales pueden consistir en el uso de un cemento resistente a los sulfatos. El ataque es mayor en los concretos expuestos a la humedad, como los que se usan en las cimentaciones y losas sobre el terreno. Normalmente se produce una expansión en el concreto debido a la formación de sólidos resultantes de la acción química. A menudo la magnitud de la expansión bajo circunstancias severas ha sido mucho mayor que 0.1% y el efecto nocivo en el concreto puede provocar vastos agrietamientos y desintegraciones. No se puede predecir con exactitud la magnitud de la expansión. Los procedimientos a seguir cuando se anticipe un ataque por sulfatos se desarrollan en los Capítulos 2, 5 y 7.

\* Para mayor información vea las exposiciones referentes a carbonatación y corrosión del Capítulo 6.

\*\* Referencias 13-10, 13-11, 13-14 y 13-15.

## Reacciones álcali-agregado

En la mayoría de lugares de Norteamérica se considera que los agregados son más o menos químicamente estables dentro del concreto. No obstante, en ciertas regiones los agregados reaccionan con los álcalis del cemento, causando expansiones y agrietamientos luego de un cierto período. La reacción es mayor en las partes de la estructura que se encuentran expuestas a la humedad.

Resulta esencial el conocimiento de las características de los agregados locales. Existen dos tipos de agregados que reaccionan con los álcalis: silicosos y carbonatos. La expansión debida a la reacción álcali-sílice puede sobrepasar 1.5% en el mortero ó 0.5% en el concreto y causar que el concreto se fracture y se desintegre.

La cuantía de la expansión debida a las reacciones álcali-carbonato, las cuales se encuentran menos extendidas que las reacciones álcali-sílice, se ha medido alcanzando valores tan altos como 0.18% en 9 meses para prismas de concreto de 7.5 x 10 cm expuestos a una humedad relativa de 100% a 23°C.

Las técnicas de diseño estructural no pueden contrarrestar los efectos de la expansión álcali-agregado ni se puede controlar la expansión por medio de juntas. En las regiones donde se sepa que existan agregados con reacciones nocivas, se deberán seguir medidas especiales para evitar que las reacciones álcali-agregado se lleguen a presentar.†

† Consulte los Capítulos 4 y 6 y la Referencia 13-5.

## REFERENCIAS

- 13-1. Davis, R. E., "A Summary of the Results of Investigations Having to Do with Volumetric Changes in Cements, Mortars, and Concretes Due to Causes Other Than Stress," *Proceedings of the American Concrete Institute*, American Concrete Institute, Detroit, vol. 26, 1930, pages 407-443.
- 13-2. Carlos, Roy W., "Drying Shrinkage of Concrete as Affected by Many Factors," *Proceedings of the Forty-First Annual Meeting of the American Society for Testing and Materials*, vol. 38, part II, Technical Papers, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1938, pages 419-440.
- 13-3. Pickett, Gerald, *The Effect of Change in Moisture Content on the Creep of Concrete Under a Sustained Load*, Research Department Bulletin RX020, Portland Cement Association, 1947.
- 13-4. "Long-Time Study of Cement Performance in Concrete—Test of 28 Cements Used in the Parapet Wall of Green Mountain Dam," *Materials Laboratories Report No. C-345*, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, 1947.
- 13-5. Lerch, William, *Studies of Some Methods of Avoiding the Expansion and Pattern Cracking Associated with the Alkali-Aggregate Reaction*, Research Department Bulletin RX031, Portland Cement Association, 1950.
- 13-6. Jackson, F. H., *Long-Time Study of Cement Performance in Concrete—Chapter 9. Correlation of the Results of Laboratory Tests with Field Performance Under Natural Freezing and Thawing Condition*, Research Department Bulletin RX060, Portland Cement Association, 1955.
- 13-7. Hognestad, E.; Hanson, N. W.; and McHenry, D., *Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design*, Development Department Bulletin DX006, Portland Cement Association, 1955.
- 13-8. Malhotra, M. L., "The Effect of Temperature on the Compressive Strength of Concrete," *Magazine of Concrete Research*, Cement and Concrete Association, Wexham Spring, Slough, England, vol. 8., no. 23, August 1956, pages 85-94.
- 13-9. Philco, Robert, *Some Physical Properties of Concrete at High Temperatures*, Research Department Bulletin RX097, Portland Cement Association, 1958.
- 13-10. Verbeck, G. J., *Carbonation of Hydrated Portland Cement*, Research Department Bulletin RX087, Portland Cement Association, 1958.
- 13-11. Steinour, Harold H., "Some Effects of Carbon Dioxide on Mortars and Concrete—Discussion," *Proceedings of the American Concrete Institute*, vol. 55, American Concrete Institute, 1959, pages 905-907.
- 13-12. Roper, Harold, *Volume Changes of Concrete Affected by Aggregate Type*, Research Department Bulletin RX123, Portland Cement Association, 1960.
- 13-13. Monfore, G. E., and Lentz, A. E., *Physical properties of Concrete at Very Low Temperatures*, Research Department Bulletin RX145, Portland Cement Association, 1962.
- 13-14. Powers, T. C., *A Hypothesis on Carbonation Shrinkage*, Research Department Bulletin RX146, Portland Cement Association, 1962.
- 13-15. Toennies, H.T., and Shideler, J. J., *Plant Drying and Carbonation of Concrete Block—NCMA-PCA Cooperative Program*, Development Department Bulletin DX064, Portland Cement Association, 1963.
- 13-16. Monfore, G. E., *A Small Probe-Type Gage for Measuring Relative Humidity*, Research Department Bulletin RX160, Portland Cement Association, 1963.
- 13-17. Tremper, Bailey, and Spellman, D.L., "Shrinkage of Concrete—Comparison of Laboratory and Field Performance," *Highway Research Record Number 3, Properties of Concrete*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1963.
- 13-18. *Symposium on Creep of Concrete*, SP-9, American Concrete Institute, 1964.
- 13-19. Hanson, J. A., *Prestress Loss As Affected by Type of Curing*, Development Department Bulletin DX075, Portland Cement Association, 1964.
- 13-20. Abrams, M. S., and Orals, D. L., *Concrete Drying Methods and Their Effects on Fire Resistance*, Research Department Bulletin RX181, Portland Cement Association, 1965.



- 13-21. Brewer, H. W., *Moisture Migration—Concrete Slab-on-Ground Construction*, Development Department Bulletin DX089, Portland Cement Association, 1965.
- 13-22. Cruz, Carlos R., *Elastic Properties of Concrete at High Temperatures*, Research Department Bulletin, RX191, Portland Cement Association, 1966.
- 13-23. Lentz, A. E., and Monfore, G. E., *Thermal Conductivities of Portland Cement Paste, Aggregate and Concrete Down to Very Low Temperatures*, Research Department Bulletin RX207, Portland Cement Association, 1966.
- 13-24. Hansen, Torben C., and Mattock, Alan H., *Influence of Size and Shape of Member on the Shrinkage and Creep of Concrete*, Development Department Bulletin DX103, Portland Cement Association, 1966.
- 13-25. Petersen, R. H., "Resistance to High Temperature," *Significance of Test and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, STP 169-A, American Society for Testing and Materials, 1966.
- 13-26. Brewer, Harold W., "General Relation of Heat Flow Factors to the Unit Weight of Concrete," Development Department Bulletin DX114, Portland Cement Association, 1967.
- 13-27. Hsu, Thomas T.C., *Torsion of Structural Concrete—Plain Concrete Rectangular Sections*. Development Department Bulletin DX134, Portland Cement Association, 1968.
- 13-28. Hanson, J. A., *Effects of Curing and Drying Environments on Splitting Tensile Strength of Concrete*, Development Department Bulletin DX141, Portland Cement Association, 1968.
- 13-29. *Effect of Long Exposure of Concrete to High Temperature*, ST32, Portland Cement Association, 1969.
- 13-30. "Effect of High Temperature on Hardened Concrete," *Concrete Construction*, Concrete Construction Publications, Inc., Addison, Illinois, November 1971, pages 477-479.
- 13-31. *Temperature and Concrete*, Sp-25, American Concrete Institute, 1971.
- 13-32. *Concrete for Nuclear Reactors*, vol. 1, SP-34, American Concrete Institute, 1972.
- 13-33. Abrams, M. S., *Compressive Strength of Concrete at Temperatures to 1600 F*, Research and Development Bulletin RD016T, Portland Cement Association, 1973.
- 13-34. Russell, H. G., and Corley, W. G., *Time-Dependent Behavior of Columns in Water Tower Place*, Research and Development Bulletin RD052B, Portland Cement Association, 1977.
- 3-35. Kaar, P. H.; Hanson, N. W.; and Capell, H. T., *Stress-Strain Characteristics of High-Strength Concrete*, Research and Development Bulletin RD051D, Portland Cement Association, 1977.
- 13-36. Abrams, Melvin S., *Performance of Concrete Structures Exposed to Fire*, Research and Development Bulletin RD060D, Portland Cement Association, 1977.
- 13-37. Abrams, M. S., *Behavior of Inorganic Materials in Fire*, Research and Development Bulletin RD067M, Portland Cement Association, 1979.
- 13-38. Cruz, C. R., and Gillen, M., *Thermal Expansion of Portland Cement Paste, Mortar, and Concrete at High Temperatures*, Research and Development Bulletin RD074T, Portland Cement Association, 1980.
- 13-39. *Control of Cracking in Concrete Structures*, ACI 224R-80 ACI Committee 224 Report, American Concrete Institute, 1980.
- 13-40. *Building Movements and Joints*, EB086B, Portland Cement Association, 1982.
- 13-41. *Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures*, ACI 209R-82, ACI Committee 209 Report, American Concrete Institute, 1982.
- 13-42. Carette, G. G.; Painter, K. E.; and Malhotra, V.M., "Sustained High Temperature Effect on Concrete Made with Normal Portland Cement, Normal Portland Cement and Slag, or Normal Portland Cement and Fly Ash," *Concrete International*, American Concrete Institute, July 1982.
- 13-43. *Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structures* ACI 224.1R-84, ACI Committee 224 Report, American Concrete Institute, 1984.
- 13-44. Kosmatka, Steven H., "Floor-Covering Materials and Moisture in Concrete," *Concrete Technology Today*, PL853B, Portland Cement Associations, 1985.
- 13-45. *Temperature Effects on Concrete*, STP 858, American Society for Testing and Materials, 1985.
- 13-46. *Concrete Slab Surface Defects: Causes, Prevention, Repair*, IS177T, Portland Cement Association, 1987.
- 13-47. Ytnerberg, Robert F., "Shrinkage and Curling of Slabs on Grade, Part I—Drying Shrinkage, Part II—Warping and Curling, and Part III—Additional Suggestions," *Concrete International*, American Concrete Institute, April 1987, pages 22-31; May 1987, pages 54-61; and June 1987, pages 72-81.

## CAPITULO 14

# Pruebas para Controlar la Calidad del Concreto

Para que tanto las construcciones en que se emplea concreto como su posterior comportamiento resulten satisfactorios, se requiere que el concreto posea ciertas propiedades específicas. El control de calidad y las pruebas son parte indispensable del proceso constructivo porque confirman que se están obteniendo las propiedades antes mencionadas. La experiencia y el buen juicio deberán apoyarse en la evaluación de las pruebas y en la estimación de su importancia con respecto al comportamiento último del concreto.

### CLASES DE PRUEBAS

En general, las especificaciones para el concreto y para los materiales que lo componen dan requisitos detallados en cuanto a los límites de su aceptabilidad. Estos requisitos pueden afectar (1) las características de la mezcla, tales como el tamaño máximo del agregado o el contenido mínimo de cemento; (2) las características del cemento, agua, agregados y aditivos; y (3) las características del concreto fresco y del concreto endurecido, como la temperatura, el revenimiento, el contenido de aire o la resistencia a compresión.

Los cementos se prueban para verificar su conformidad con los estándares establecidos a fin de evitar cualquier comportamiento anormal como lo sería la presencia de endurecimientos prematuros, fraguados retrasados o resistencias bajas en el concreto.

La prueba de los agregados tiene dos objetivos fundamentales: Primero, determinar la adecuación del material para su uso en el concreto, incluyéndose las pruebas de abrasión, sanidad, peso específico, y análisis petrográficos y químicos; segundo, para asegurar la uniformidad, como son las pruebas para control de humedad y granulometría de los agregados. Algunas pruebas se emplean para ambos propósitos.

Las pruebas para concreto se hacen con la finalidad de evaluar el comportamiento de los materiales disponibles, establecer las proporciones de las mezclas, y controlar la calidad del concreto en el campo incluyen: revenimiento, contenido de aire, peso volumétrico y resistencia. Las pruebas de revenimiento, contenido de aire y resistencia se exigen normalmente en las especificaciones de proyecto para el control de calidad del concreto, en tanto que la prueba para

determinar el peso volumétrico se usa más para el proporcionamiento de mezclas.

En seguida se presenta un análisis referente a la frecuencia de las pruebas así como descripciones de las principales pruebas de control para asegurar la uniformidad de los materiales, la obtención de las propiedades esperadas en el concreto fresco y la resistencia requerida del concreto endurecido. También se describen pruebas especiales.

### FRECUENCIA DE LAS PRUEBAS

La frecuencia de las pruebas es un factor importante en la efectividad del control de calidad del concreto.

La frecuencia de las pruebas de los agregados y del concreto en las instalaciones típicas que trabajan por mezclas dependerá en gran medida de la uniformidad de los agregados, incluyendo su contenido de humedad. Al principio será recomendable realizar las pruebas varias veces al día, aunque muchas veces se podrá reducir la frecuencia conforme el trabajo vaya avanzando.

Normalmente las pruebas de humedad se efectúan una o dos veces por día. Por la mañana la primera carga de agregado fino a menudo se encuentra demasiado húmeda porque durante la noche la humedad se desplaza hasta el fondo del depósito de almacenamiento. A medida que el agregado fino se va sacando del fondo, el contenido de humedad se debe estabilizar en un nivel menor y se puede realizar la primera prueba de humedad. Luego de unas cuantas pruebas, los cambios en el contenido de humedad pueden juzgarse con exactitud razonable con la vista y la percepción. Las pruebas subsiguientes normalmente serán necesarios sólo cuando un cambio sea aparente a simple vista.

Las pruebas de revenimiento deberán efectuarse para la primera mezcla de concreto cada día, siempre que la consistencia del concreto parezca variar, y siempre que se fabriquen cilindros para pruebas a compresión en el sitio.

Las pruebas de contenido de aire deberán hacerse en el punto de entrega con la frecuencia suficiente para asegurarse que el contenido de aire sea el adecuado, particularmente cuando varíen la temperatura y la granulometría del agregado. Es deseable una prueba de contenido de aire para cada

muestra de concreto con la que se fabriquen cilindros; también se deberá llevar un registro de la temperatura de cada muestra de concreto.

El número de pruebas de resistencia que se haga dependerá de las especificaciones del trabajo y de la ocurrencia de variaciones. Las especificaciones del Reglamento de construcciones para concreto reforzado del ACI, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318)", indican que para cada clase de concreto colado por día deberán hacerse pruebas de resistencia no menos de una vez al día, no menos de una vez por cada 115 m<sup>3</sup> de concreto, y no menos de una vez por cada 465 m<sup>2</sup> de superficie de losas o muros. Para cada prueba se requiere tomar la resistencia promedio de dos cilindros. Se pueden llegar a necesitar especímenes adicionales cuando se trabaje con concretos de alta resistencia o cuando los requerimientos estructurales sean críticos. Los especímenes deberán curarse en el laboratorio. Las especificaciones pueden exigir que se fabriquen especímenes adicionales y se curen en campo, casi de igual manera que para el concreto en la estructura. Para proporcionar una indicación anticipada del desarrollo de la resistencia, a menudo se elabora y prueba un cilindro a 7 días, junto con los dos cilindros de prueba a 28 días. Como regla práctica, la resistencia a 7 días aproximadamente es 60 a 75% de la resistencia a los 28 días, dependiendo del tipo y cantidad de cemento, relación agua-cemento, temperatura de curado así como de otras variables.

## PRUEBAS DE LOS AGREGADOS

### Muestreo de agregados

Los métodos para obtener muestras representativas de agregados se presentan en la norma ASTM D 75. Es importante llevar a cabo un muestreo correcto. La reducción de las muestras de campo de gran tamaño hasta obtener cantidades pequeñas para las pruebas individuales se debe realizar con precaución a fin de que las muestras finales sean realmente representativas. Para los agregados gruesos, esto se hace normalmente por medio del método de cuarteo: La muestra, mezclada por completo, se extiende sobre una lona en una capa uniforme de 7.5 ó 10 cm de espesor. Se divide en cuatro partes iguales. Entonces se desechan dos partes opuestas. Este proceso se repite hasta que quede el tamaño deseado de la muestra. En ocasiones se utiliza un procedimiento similar para el agregado fino húmedo. Los cuarteadores de muestras se recomiendan para el agregado fino seco (Fig. 14-1).

### Impurezas orgánicas

Las impurezas orgánicas en el agregado fino deben determinarse de acuerdo con la norma ASTM C 40. Se coloca una muestra de agregado fino en una solución de hidróxido de sodio y se agita. Al día siguiente el color de la solución se compara con el color de una solución estándar. Si el color es más oscuro que el estándar, no se deberá usar el agregado fino para trabajos de importancia sin investigaciones posteriores. Algunos agregados finos contienen cantidades pequeñas de

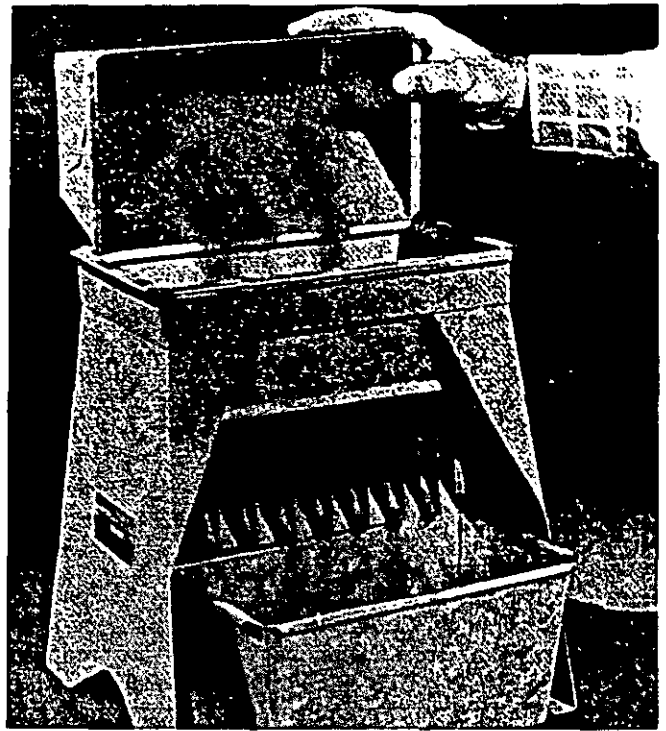


Figura 14-1. Cuarteador comúnmente usado para reducir muestras de arena.

carbón o de lignito que le dan un color oscuro al líquido. La cantidad podría ser insuficiente para reducir apreciablemente la resistencia del concreto y por otra parte el agregado fino podría ser aceptable. En tales casos, las pruebas de resistencia de morteros (ASTM C 87) que hagan uso del agregado fino en cuestión indicarán el efecto de las impurezas presentes. Deberá hacerse notar que las cantidades apreciables de carbón o lignito dentro de los agregados pueden llegar a causar erupciones y manchas en el concreto y reducir su durabilidad cuando esté expuesto al intemperismo. La experiencia local frecuentemente es el mejor indicador de la durabilidad de los concretos fabricados con tales agregados.

### Material fino objetable

Las grandes cantidades de arcilla y limo en los agregados pueden afectar de manera adversa la durabilidad, aumentar los requerimientos de agua e incrementar la contracción. Normalmente las especificaciones limitan la cantidad de material que pasa la malla de 0.080 mm (No.200) a 2 ó 3% del agregado fino y a 1% ó menos del agregado grueso. La prueba para el material que pasa la malla de 0.080 mm (No.200) deberá realizarse de acuerdo con la norma ASTM C 117. La prueba de terrones de arcilla deberá hacerse conforme a la norma ASTM C 142.

### Granulometría

La granulometría del agregado afecta fuertemente al proporcionamiento del concreto y su trabajabilidad. De aquí que las pruebas de granulometría sean un elemento importante para asegurar la calidad del concreto. La granulometría de agregado se determina mediante una prueba de análisis

mallas en la que las partículas se dividen según sus distintos tamaños por medio de mallas estándar. Se deberá hacer el análisis de conformidad con la norma ASTM C 136.

Los resultados de los análisis de mallas se emplean de tres formas: 1).- para determinar si los materiales satisfacen o no las especificaciones; 2).- para elegir el material más adecuado si se dispone de distintos agregados; y 3).- para detectar variaciones en la granulometría que sean suficientes para justificar mezclar tamaños seleccionados o algún ajuste en las proporciones de la mezcla de concreto.

Los requisitos en cuanto a la granulometría de los agregados para el concreto se muestran en el Capítulo 4 y en la norma ASTM C 33. Se deberá evitar el uso de materiales que contengan cantidades excesivas o demasiado pequeñas de cualquier tamaño. Algunas especificaciones demandan que se ajusten las proporciones de la mezcla si el módulo de finura promedio del agregado fino cambia en más de 0.20. Otras piden un ajuste en las proporciones de la mezcla si la cantidad retenida en dos mallas consecutivas cualesquiera cambia en más de 10% en peso del total de la muestra de agregado fino. Por trabajabilidad es deseable tener una cantidad pequeña de partículas limpias que pasen la malla de 0.150 mm (No. 100) pero que quede retenida en la malla de 0.080 mm (No. 200). Por esta misma razón la mayoría de las especificaciones permite la existencia de hasta 10% de este material en el agregado.

## Contenido de humedad de los agregados

Se pueden usar varios métodos para determinar la cantidad de humedad en las muestras de agregado. El contenido total de humedad para agregado fino o grueso puede probarse conforme a la norma ASTM C 566. Según este método una muestra medida de agregado húmedo se seca ya sea dentro de un horno, o sobre una plancha o al fuego directo. A partir de los pesos anterior y posterior al secado, se pueden calcular los contenidos de humedad total y de humedad superficial (libre). El contenido total de humedad se puede calcular como sigue:

$$P = 100 (W - D) / D$$

donde

- $P$  = contenido de humedad de la muestra, en porcentaje
- $W$  = peso de la muestra original
- $D$  = peso de la muestra seca

El contenido de humedad superficial es igual al contenido total de humedad menos la absorción. Se puede suponer que la absorción es de 1% para los agregados promedio o, para una mayor precisión, se debe determinar de acuerdo con los métodos dados en las normas ASTM C 127 para el agregado grueso y ASTM C 128 para el agregado fino. Únicamente la humedad superficial, y no la humedad absorbida, forma parte del agua de mezclado en el concreto.

Otro método para determinar el contenido de humedad, y que no es tan exacto, consiste en evaporar la humedad quemando alcohol. En este método, una muestra medida de agregado fino húmedo se coloca sobre una charola de poco

espesor; el alcohol (aproximadamente 325 ml por cada kilogramo) se vacía sobre la muestra; la mezcla se revuelve con una varilla y se extiende en una capa delgada sobre el fondo de la charola. Después se prende fuego al alcohol y se deja quemar hasta que la muestra esté seca. Luego de la quema, la arena se enfría durante unos cuantos minutos y se pesa. Entonces se calcula el porcentaje de humedad.

También se puede efectuar una prueba para la determinación de la humedad superficial (libre) en el agregado fino de acuerdo con la norma ASTM C 70. El mismo procedimiento se puede usar para agregados gruesos con los cambios apropiados en el tamaño de la muestra y en las dimensiones del contenedor. Esta prueba depende del desplazamiento del agua por un peso conocido de agregado húmedo; por lo tanto la densidad relativa (peso específico) del agregado deberá conocerse de manera precisa.

En muchas plantas dosificadoras de concreto se utilizan medidores eléctricos de humedad para revisar el contenido de humedad de los agregados finos. Operan basándose en el principio de que la resistencia eléctrica del agregado fino húmedo disminuye a medida que el contenido de humedad aumenta, dentro del intervalo de humedades que normalmente se encuentran. Los medidores registran la resistencia eléctrica del agregado fino entre electrodos proyectados dentro de la tolva de dosificación o depósito. Tales medidores necesitan calibrarse periódicamente y deberán recibir un mantenimiento apropiado. Miden el contenido de humedad con precisión y rapidez, aunque esto únicamente sea a nivel de los electrodos.

La Tabla 14-1 ilustra un método para ajustar por humedad los pesos base de los agregados.

## PRUEBAS PARA EL CONCRETO FRESCO

### Muestreo de concreto fresco

Se debe subrayar la importancia de obtener muestras de concreto fresco verdaderamente representativas para las pruebas de control. A menos que el muestreo sea representativo, los resultados de las pruebas pueden ser engañosos. Las muestras se deberán obtener y manejar de acuerdo con la norma ASTM C 172. A excepción de las pruebas de rutina para el revenimiento y para el contenido de aire, este método requiere que la muestra sea de por lo menos 28 litros, que se utilice dentro de los 15 minutos siguientes a su obtención, y que se proteja durante este periodo de la luz directa del sol, del viento, así como de otras fuentes de evaporación acelerada. No se deberá tomar la muestra ni de la primera ni de la última porción de descarga de la mezcla.

### Consistencia

La prueba de revenimiento, norma ASTM C 143, es el método de mayor aceptación que generalmente se utiliza para medir la consistencia del concreto (Fig. 14-2). El equipo de prueba consiste en un cono de revenimiento (un molde de metal de forma cónica de 30 cm de altura con diámetro de 20 cm en la base y de 10 cm en la parte superior) y una barra de acero (de 15.9 mm de diámetro, y 61 cm de largo) que tenga una punta

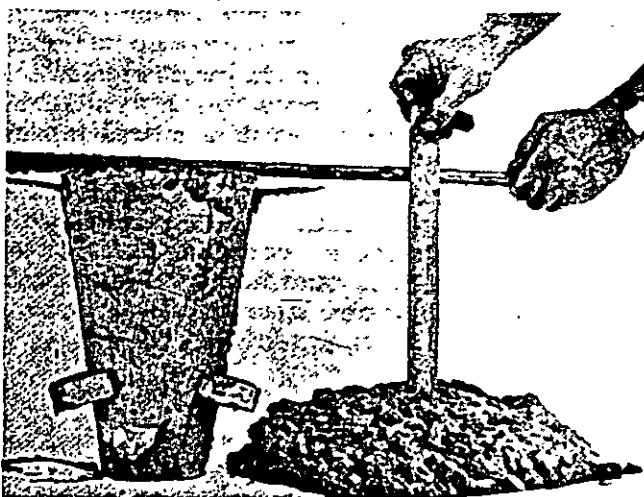
**Tabla 14-1. Ejemplo del ajuste en los pesos base por humedad en los agregados**

Ingredientes del concreto	Peso base (agregados en condición SSS),* kg	Contenido de humedad superficial (libre) de los agregados, porcentaje por encima de la condición SSS	Corrección por humedad superficial en los agregados, kg	Peso base ajustado, kg
Cemento	272	—	—	272
Agregado fino	544	6	+32	576
Agregado grueso	816	1	+8	824
Agua	136	—	-40	96
<b>Total</b>	<b>1768</b>			<b>1768</b>

\* Un agregado en condición saturada y superficialmente seca (SSS) es aquel cuyos vacíos permeables se encuentran llenos de agua y en cuya superficie no existe agua libre.



A



B

**Figura 14-2. Prueba de revenimiento para medir la consistencia del concreto. La Figura A muestra un revenimiento bajo, la Figura B un revenimiento elevado.**

de forma semiesférica. El cono de revenimiento humedecido, colocado a plomo sobre una superficie plana y sólida, deberá llenarse en tres capas de aproximadamente igual volumen. Por lo tanto, el cono deberá llenarse hasta una altura de aproximadamente 6.5 cm (después de *varillar*) para la primera capa, hasta aproximadamente 15 cm para la segunda capa, y sobrellenarse en la última capa. A cada capa se le aplican 25 golpes con la varilla. Luego del varillado, la última capa se enrasa y se retira el cono lenta y verticalmente, mientras el concreto se desploma o se asienta hasta alcanzar una nueva altura. El cono de revenimiento vacío se coloca en seguida junto al concreto asentado. El revenimiento es la distancia vertical que el concreto se ha asentado, midiéndolo con una precisión de medio centímetro desde la parte superior del cono de revenimiento (molde) hasta el centro original desplazado del concreto desplomado.

Un valor alto de revenimiento señala a un concreto húmedo o fluido. La prueba de revenimiento deberá iniciarse dentro de los siguientes 5 minutos a la obtención de la muestra y la prueba se deberá completar en 2 1/2 minutos, pues el concreto pierde revenimiento con el tiempo.

Otro método de prueba involucra el uso del Medidor K de revenimiento. Se trata de un instrumento de sondeo que se introduce dentro del concreto en cualquier lugar donde haya un mínimo de 15 cm de concreto alrededor del medidor. La cantidad de mortero que fluye dentro de las aberturas en el probador es una medida de la consistencia. La prueba no ha sido normalizada por la ASTM.

Pruebas adicionales de consistencia son la prueba británica del factor de compactación, la prueba de remoldeo de Powers, la prueba alemana de la mesa de flujo (DIN 1048), la prueba Vebe, la prueba de la esfera de penetración (ASTM C 360), y el cono invertido de revenimiento (ASTM C 995 para concreto reforzado con fibras). La prueba Vebe es aplicable en particular a las mezclas ásperas y extremadamente secas, y la mesa de flujo se aplica especialmente a los concretos fluidos.

### Medición de la temperatura

Debido a la importante influencia que la temperatura del concreto tiene sobre las propiedades del concreto fresco y endurecido, muchas especificaciones delimitan a la temperatura del concreto fresco. Se pueden conseguir termómetros de vidrio o con corazas (Figs. 14-3 y 12-12). El termómetro deberá tener una precisión de 1°C y deberá pe-

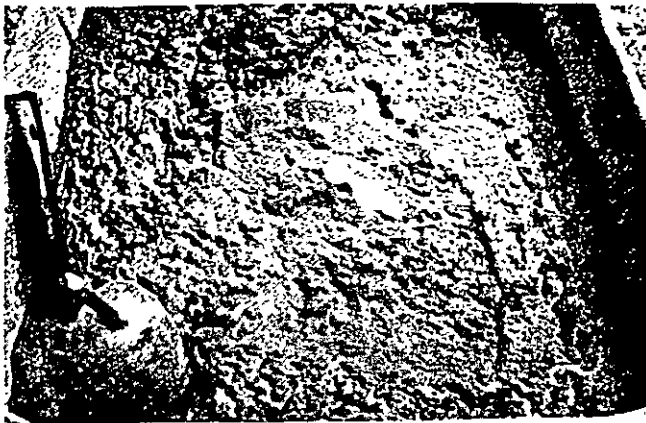


Figura 14-3. Empleo de un termómetro para medir la temperatura del concreto fresco.

manecer dentro de la muestra representativa un tiempo mínimo de 2 minutos o hasta que la lectura se estabilice. Una cantidad mínima de 7.5 cm de concreto deberá rodear la porción sensitiva del termómetro. También se puede disponer de medidores electrónicos de temperatura con pantallas digitales de precisión. La medición de la temperatura (norma ASTM C 1064) deberá completarse dentro de los 5 minutos siguientes a la obtención de la muestra.

### Peso volumétrico y rendimiento

El peso volumétrico y el rendimiento del concreto fresco se determinan de acuerdo con la norma ASTM C 138. Los resultados pueden ser suficientemente exactos para determinar la cantidad de concreto producida por mezcla (vea el Capítulo 7). La prueba también da cierta indicación del contenido de aire si se conocen los pesos específicos de los ingredientes. Se necesita una báscula o balanza con precisión de 50 g. El tamaño del recipiente usado para determinar el peso volumétrico y el rendimiento varía según el tamaño del agregado; el recipiente de 14 litros se utiliza normalmente con agregados de hasta 51 mm (2"). Se debe tener cuidado de consolidar correctamente el concreto y de enrasar la superficie de manera que el recipiente quede adecuadamente lleno. El recipiente deberá calibrarse periódicamente. El peso volumétrico se expresa en kilogramos por metro cúbico y el rendimiento (volumen de la mezcla) en metros cúbicos.

El peso volumétrico del concreto fresco así como el del concreto endurecido también se pueden determinar mediante métodos nucleares, norma ASTM C 1040.

### Contenido de aire

Se puede hacer uso de un gran número de métodos para medir el contenido de aire del concreto fresco. Las normas ASTM incluyen al método de presión (C 231), método volumétrico (C 173), y método gravimétrico (C 138). También se pueden emplear variaciones de los dos primeros métodos.

El método de presión (Fig. 14-4) se basa en la ley de Boyle, la cual relaciona a la presión con el volumen. Muchos medidores comerciales de aire de este tipo están calibrados para leer el contenido de aire directamente cuando se aplica

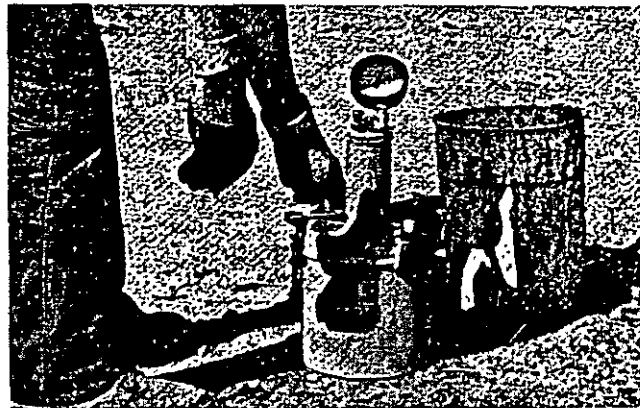


Figura 14-4. Medidor del tipo de presión para determinar el contenido de aire.

una carga predeterminada. La presión aplicada comprime el aire dentro de la muestra de concreto, incluyendo al que se encuentra en los poros de los agregados. Por esta razón, las pruebas con este método no son adecuadas para determinar el contenido de aire de los concretos hechos con algunos agregados ligeros u otros materiales porosos. Los factores de corrección para los agregados de peso normal son relativamente constantes y, aunque pequeños, deberán aplicarse para obtener la cantidad correcta de aire incluido. El instrumento deberá calibrarse para diversas alturas sobre el nivel del mar si se va a usar en lugares que tengan diferencias considerables de altitud. Algunos medidores utilizan el cambio de presión de un volumen conocido de aire y no resultan afectados por los cambios de altura. Los medidores de presión son usados ampliamente porque ni las proporciones de la mezcla ni los pesos específicos del material necesitan ser conocidos. También se puede realizar la prueba en menos tiempo del que requieren otros métodos.

El método volumétrico (Fig. 14-5) requiere la remoción del aire de un volumen conocido de concreto agitando el concreto dentro de un exceso de agua. Este método puede usarse para los concretos que contengan cualquier tipo de agregado, incluyendo los materiales ligeros o porosos. La prueba no es afectada por la presión atmosférica, y no se necesita conocer el peso específico de los materiales. Se deberá tener la precaución de agitar suficientemente la muestra para remover todo el aire.

Para el método gravimétrico se usa el mismo equipo de prueba que se emplea para la determinación del peso volumétrico del concreto. El peso volumétrico medido en el concreto se sustrae del peso volumétrico teórico determinado a partir de los volúmenes absolutos de los ingredientes, suponiendo que no exista aire. Esta diferencia, expresada como un porcentaje del peso volumétrico teórico, es el contenido de aire. Tanto las proporciones de la mezcla como los pesos específicos de sus ingredientes deberán conocerse con gran exactitud, ya que de otra manera los resultados serían erróneos. En consecuencia, este método solamente es adecuado cuando se practique un control similar al de laboratorio. Los cambios de importancia en el peso volumétrico pueden ser una manera conveniente para detectar las variaciones en el contenido de aire.

Un indicador de aire de bolsillo (AASHTO T 199) puede usarse para revisiones rápidas del contenido de aire, aunque

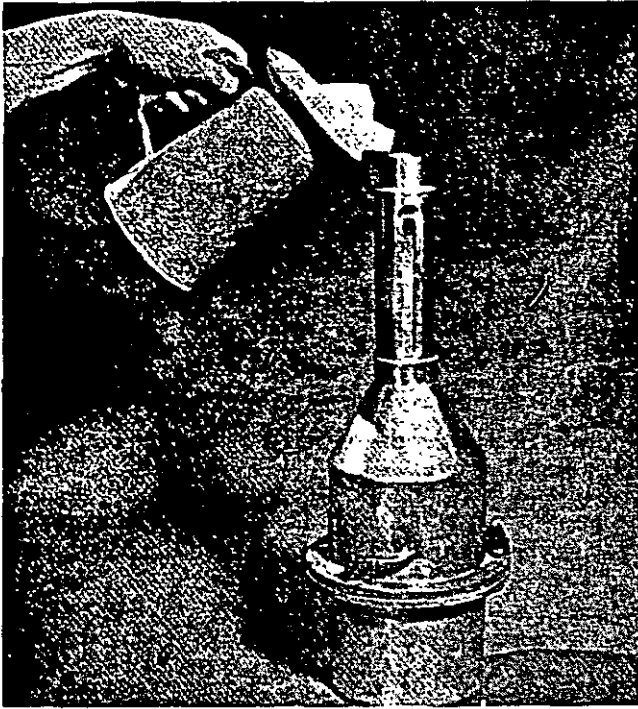


Figura 14-5. Medidor de aire volumétrico.

no se le puede considerar como sustituto de los demás métodos de mayor grado de precisión (Fig. 14-6). Se coloca una muestra representativa de mortero proveniente del concreto dentro del contenedor. El contenedor se llena entonces con alcohol y se balancea con el pulgar colocado sobre el extremo abierto a fin de retirar el aire del mortero. El contenido aproximado de aire se determina comparando la caída del nivel de alcohol con una gráfica de calibración. La prueba se puede desarrollar en unos cuantos minutos. Resulta particularmente útil para revisar los contenidos de aire en las zonas pequeñas cercanas a la superficie que pudieran haber sufrido reducciones en su contenido de aire ocasionadas por procedimientos defectuosos de acabado.\*

Con cualquiera de los métodos anteriores, las pruebas para determinar el contenido de aire deberán comenzar dentro de los cinco minutos que siguen a la obtención de la muestra.

Los estudios recientes relacionados con el efecto que la ceniza volante tiene sobre la estabilidad de los vacíos de aire han resultado en el desarrollo de la prueba del índice de espuma. La prueba se puede usar para medir los requerimientos relativos de aditivo inclusor de aire de las mezclas de concreto que contengan ceniza volante. La ceniza volante a probar se coloca dentro de un recipiente de boca ancha junto con el aditivo inclusor de aire y se agita vigorosamente. Siguiendo a un período de espera de 45 segundos, se realiza una determinación visual de la estabilidad de la espuma o de las burbujas.\*\*

## Resistencia

Los especímenes premoldeados para las pruebas de resistencia se deberán elaborar y curar de conformidad con la norma ASTM C 31 (especímenes de campo) ó con la norma ASTM C 192 (especímenes de laboratorio). El moldeado de los especímenes

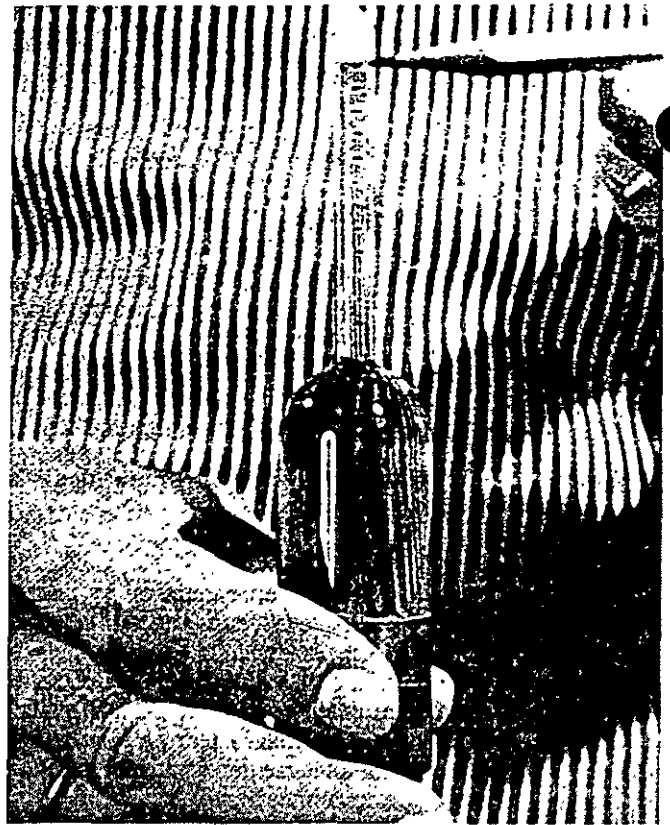


Figura 14-6. Indicador de aire para verificar el contenido aproximado de aire del concreto.

para pruebas de resistencia deberá comenzar dentro de los 1 minutos que siguen a la obtención de la muestra.

El espécimen estándar para las pruebas con que se determina la resistencia a compresión de concretos con tamaños máximos de agregado de 51 mm (2") ó menores es un cilindro de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura (Fig. 14- 7). Para agregados de mayor tamaño, el diámetro del cilindro deberá ser de por lo menos tres veces el tamaño máximo del agregado, y la altura deberá ser el doble del diámetro. No obstante que son preferibles los moldes rígidos de metal, se pueden usar moldes de cartón parafinado, plástico, u otros tipos de molde desechable que satisfagan la norma ASTM C 470. Deberán colocarse sobre una superficie lisa, nivelada y llenarse cuidadosamente para evitar su deformación.

Recientemente se han usado moldes de cilindros de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura para concreto que contiene agregado con tamaño máximo de 25 mm (1").† Los cilindros de 10 x 20 cm son más fáciles de colar, requieren de una menor muestra, pesan considerablemente menos que los cilindros de concreto y por lo tanto son más fáciles de manejar, y necesitan menos espacio de almacenamiento para su curado. Aunque los cilindros de 10 cm de diámetro tienden a fallar a una carga ligeramente mayor que los cilindros de 15 cm de diámetro, normalmente la diferencia es insignificante.

\* Referencia 14-18.

\*\* Referencia 14-21.

† \* Referencias 14-15 y 14-23.





**Figura 14-7. Preparación de especímenes estándar para la prueba de resistencia a compresión del concreto.**

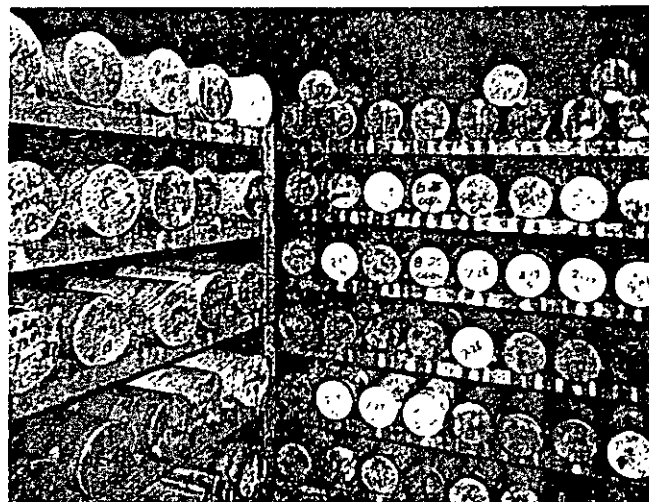
A menos que se especifiquen, no deberán usarse cilindros diferentes a los de 15 x 30 cm.

Las vigas para determinar la resistencia a la flexión deberán tener 15 x 15 cm de sección transversal para agregados hasta de 51 mm (2"). Para agregados mayores, la dimensión transversal mínima no deberá ser menor que tres veces el tamaño máximo del agregado. El largo de las vigas deberá ser por lo menos tres veces el peralte de la viga más 5 cm, o sea una longitud total de no menos de 50 cm para una viga de 15 x 15 cm.

Los cilindros de prueba deberán llenarse en tres capas aproximadamente iguales picando con una varilla cada capa 25 veces para los cilindros de 15 cm de diámetro; las vigas de hasta 20 cm de peralte deberán llenarse en dos capas iguales picando con una varilla de 15.9 mm de diámetro una vez cada capa por cada 13 cm<sup>2</sup> de superficie superior del espécimen. Si la acción con la varilla deja huecos, los lados del molde deberán recibir golpecitos leves con una maceta o simplemente con la mano. Las vigas con peraltes mayores de 20 cm y los cilindros de 30 a 45 cm de fondo que se vayan a vibrar deberán llenarse en dos capas; las vigas con peraltes de 15 a 20 cm que se vayan a vibrar se pueden llenar en una capa. Los concretos con revenimientos mayores de 7.5 cm deberán picarse con varilla; los concretos con revenimientos menores de 2.5 cm deberán vibrarse; los concretos con revenimientos entre 2.5 y 7.5 cm se pueden picar con varilla o vibrar. Los vibradores internos deberán tener un ancho máximo no mayor que 1/3 del ancho de las vigas ó 1/4 del diámetro de los cilindros. Inmediatamente después del colado, las partes superiores de los especímenes deberán (1) cubrirse con un vidrio o placa de acero aceitado, (2) sellarse con una bolsa de plástico, ó (3) sellarse con una cubierta de plástico.

La resistencia de un espécimen de prueba puede afectarse grandemente con los golpes, con los cambios de temperatura, y con la exposición al secado, en particular durante las 24 horas después del secado. Así, los especímenes de prueba deberán colarse en lugares donde sean innecesarios los movimientos subsecuentes y donde se encuentren protegidos. Tanto los cilindros como las vigas de prueba deberán protegerse contra manejos bruscos a cualquier edad.

Los procedimientos normalizados de prueba exigen que los especímenes sean curados bajo condiciones controladas, ya sea en el laboratorio (Fig. 14-8) o en el campo. El curado controlado en el laboratorio en un cuarto húmedo o en agua de cal da una indicación más precisa de la calidad del concreto al ser entregado. Los especímenes curados en el campo junto con la estructura que representan pueden dar una indicación más exacta de la resistencia real del concreto en la estructura en el momento de la prueba, pero dan pocos indicios respecto a que una deficiencia se deba a la calidad del concreto tal como se entrega o a un manejo y curado inadecuados. En algunas obras, se fabrican especímenes curados en campo además de los que reciben curado controlado en el laboratorio, especialmente cuando el clima es desfavorable, para determinar cuándo se pueden retirar las cimbras o



**Figura 14-8. Curado húmedo controlado en el laboratorio para especímenes estándar de prueba con una humedad relativa de 95% a 100% y una temperatura de 23.2°C (ASTM C 511).**

cuándo se puede poner en uso la estructura.\*

El desarrollo de la resistencia del concreto en el lugar también se puede evaluar por pruebas de madurez (ACI 306 y ASTM C 1074), tema que fue tratado en el Capítulo 12.

### Pruebas de curado acelerado

Las pruebas de resistencia acelerada se pueden usar para apresurar el control de calidad del concreto durante el proceso de construcción y para la aceptación del concreto estructural

Para mayor información, consulte "Pruebas de Resistencia para el concreto



cuando se disponga de datos adecuados, correlacionados con la prueba estándar de resistencia a compresión a los 28 días. Los métodos de curado acelerado con agua tibia ( $35 \pm 3^\circ\text{C}$ ), con agua hirviendo y el curado autógeno, que se utilizan para estos propósitos, se encuentran en la norma ASTM C 684.

## Contenido de cloruros

El contenido de cloruros del concreto y de sus ingredientes se deberá verificar asegurándose que se encuentre debajo del límite necesario para evitar la corrosión del acero de refuerzo. Una aproximación al contenido de cloruros solubles en agua del concreto fresco, de los agregados y de los aditivos se puede obtener por medio de un método iniciado por la Asociación Nacional del Concreto Premezclado de E.E.U.U. (National Ready Mixed Concrete Association, NRMCA).\* El método de la NRMCA proporciona una rápida aproximación y no debe usarse para afirmar definitivamente si se está cumpliendo con lo requerido. Consulte el Capítulo 7 para mayor información respecto a las limitaciones al ión cloruro soluble en agua para el concreto.

## Contenido de agua y de cemento

Existen métodos de prueba para determinar el contenido de agua y de cemento en el concreto fresco. Los resultados de estas pruebas pueden ayudar a tener una estimación de la resistencia y durabilidad potenciales antes del fraguado y endurecimiento del concreto y pueden confirmar que se haya cumplido con los contenidos descados de agua y de cemento. Los métodos de prueba ASTM C 1078 y C 1079 determinan el contenido de cemento y el contenido de agua, respectivamente. Además, la prueba Willis-Hime y la Máquina de Análisis Rápido (Rapid Analysis Machine) miden también el contenido de cemento.\*\*

## Contenido de aditivos minerales

No se dispone de métodos de prueba normalizados para determinar el contenido de aditivos minerales en el concreto endurecido. Sin embargo, la presencia de ciertos aditivos minerales tales como la ceniza volante se puede determinar lavando una muestra de mortero del concreto a través de una malla de 0.045 mm (No.325) y revisando el residuo retenido con un estereomicroscopio (150 a 250 X). Las partículas de ceniza volante, por ejemplo, aparecerían como esferas de distintos colores. El cribado del mortero a través de la malla de 0.150 mm (No.100) ó de 0.080 mm (No.200) es útil para retirar las partículas de arena.

## Sangrado del concreto

Las propiedades de sangrado del concreto fresco se pueden determinar por medio de dos métodos descritos en la norma ASTM C 232. Un método consolida al espécimen por apisonamiento sin perturbaciones posteriores; el otro método consolida al espécimen por vibración luego de la cual el espécimen es vibrado de manera intermitente durante la prueba. La cantidad de agua de sangrado en la superficie se expresa como el volumen de agua de sangrado por área

unitaria del concreto descubierto o como un porcentaje de la cantidad neta de agua de mezclado en el espécimen de prueba. La prueba de sangrado se emplea raramente en el campo. El sangrado se discutió en la parte referente a "Trabajabilidad" del Capítulo 1.

## PRUEBAS PARA EL CONCRETO ENDURECIDO

Los especímenes premoldeados (ASTM C 31, C 192, ó C 873),† así como las muestras de concreto endurecido obtenidas de la construcción (ASTM C 42, C 823, ó C 873), se pueden usar para las pruebas para el concreto endurecido. Se deberán obtener especímenes separados para las distintas pruebas pues el acondicionamiento de especímenes para ciertas pruebas puede volverlos inservibles para otras.

## Pruebas de resistencia para el concreto endurecido

Las pruebas de resistencia del concreto endurecido se pueden ejecutar en (1) especímenes curados moldeados de muestras de concreto fresco, normas ASTM C 31 ó C 192; (2) especímenes extraídos o aserrados provenientes de miembros de concreto endurecido de conformidad con la norma ASTM C 42; ó (3) especímenes fabricados con moldes de cilindros colados en el sitio, ASTM C 873 (Fig. 14-9). Los cilindros colados en el sitio se pueden obtener en concretos que tengan de 12.5 a 30 cm de profundidad. Para todos los métodos, las muestras cilíndricas deberán tener un diámetro de por menos tres veces el tamaño máximo del agregado grueso del concreto y una longitud lo más cercana posible a dos veces el diámetro. En la norma ASTM C 42 se encuentran factores de corrección para muestras con longitudes de 1 a 2 veces el diámetro. No deberán probarse los corazones y cilindros con una altura menor que el 95% del diámetro antes o después del cabeceo.

Los corazones no deberán extraerse sino hasta que el concreto se pueda muestrear sin dañar la unión entre el mortero y el agregado grueso. Para las superficies horizontales, los corazones deberán extraerse de manera vertical y no cerca de los bordes o juntas formadas. Para las caras verticales o inclinadas, los corazones deberán extraerse perpendicularmente a la porción central del elemento de concreto. Siempre que sea posible, se deberá evitar la extracción de corazones a través del acero de refuerzo. Se puede usar un pachómetro (dispositivo electromagnético) para localizar al acero. Los corazones que se extraigan de estructuras que normalmente se encuentren saturadas o húmedas durante su servicio deberán acondicionarse en estado húmedo y probarse húmedos, tal como lo describe la norma ASTM C 42. Aquellos que provengan de estructuras que durante su servicio normalmente se encuentren secas, deberán acondicionarse en

\* Referencia 14-31.

\*\* Referencias 14-1, 14-10 y 14-19.

† Vea la anterior sección, "Resistencia" en la parte de "Pruebas para concreto fresco".



**Figura 14-9.** Los cilindros de concreto colados en el lugar en moldes cilíndricos proporcionan un medio para determinar la resistencia a compresión del concreto en el lugar. El molde se llena durante la operación de colado normal, el espécimen se cura en el lugar de la misma manera que el resto de la sección de concreto (normalmente se utiliza en losas). El espécimen se retira de la sección de concreto y del molde inmediatamente antes de probarlo para determinar la resistencia del concreto en el lugar. Este método se aplica particularmente en colados en climas fríos, trabajos de postensado, o cualquier trabajo de concreto donde se tenga que alcanzar alguna resistencia mínima en el lugar antes de poder seguir con la construcción.

una atmósfera que se parezca a sus condiciones de servicio y probarse secos.

Los resultados de las pruebas se modifican en forma importante por la condición del espécimen. Los extremos de cilindros y corazones para la prueba a compresión deberán estar pulidos ó cabeceados de acuerdo con los requisitos de la norma ASTM C 617. Para cabecear los especímenes para las pruebas de compresión se pueden emplear varios materiales disponibles comercialmente. Se puede usar azufre y materiales granulares si se permite endurecer a las capas de cabeceo al menos dos horas antes de que los especímenes sean probados.\* El cabeceo deberá hacerse lo más delgado posible. La ASTM está considerando la normalización de las almohadillas reutilizables de neopreno.

La prueba de los especímenes se deberá realizar de acuerdo con (1) la norma ASTM C 39 para determinar la resistencia a la compresión (Fig. 1-6), (2) la norma ASTM C 78 para determinar la resistencia a la flexión usando carga en los tercios, (3) la norma ASTM C 293 para determinar la resistencia a la flexión usando carga en el punto central, y (4) la norma ASTM C 496 para determinar la resistencia a la tensión.

Tanto para el diseño de espesores de pavimentos como para el proporcionamiento de mezclas para pavimentos, el módulo de ruptura (resistencia a la flexión), deberá determinarse con la prueba usando carga en los tercios. Sin embargo, se puede usar el módulo de ruptura con carga en el centro (ASTM C 293) o con carga en voladizo para el control del trabajo, si se determinan relaciones empíricas con los resultados de pruebas con carga en los tercios antes de comenzar la construcción.

El contenido de humedad del espécimen tiene un efecto considerable sobre la resistencia resultante. Un espécimen saturado acusará una menor resistencia a la compresión y una mayor resistencia a la flexión que las de especímenes hermanos probados secos. Esto es un factor importante a considerar cuando los corazones extraídos del concreto endurecido en servicio se comparan con especímenes moldeados probados tal como son tomados del cuarto de curado.

La magnitud de la variación en la prueba de resistencia a compresión es mucho menor que en la prueba a flexión. A fin de evitar el cuidado extremo que se necesita en las pruebas de campo para determinar la resistencia a flexión; con el propósito de compensar esta desventaja, se pueden usar pruebas de resistencia a compresión para controlar la calidad del concreto, si se desarrolla en el laboratorio una relación empírica entre la resistencia a compresión y la resistencia a flexión del concreto empleado.\*\*

## Contenido de aire

El contenido de aire y los parámetros del sistema vacíos-aire del concreto endurecido se pueden determinar por medio de la norma ASTM C 457. La prueba de contenido de aire en el concreto endurecido se realiza con el fin de asegurarse que el sistema de vacíos-aire es apropiado para un medio ambiente particular. La prueba también se usa para determinar el efecto que tienen diferentes aditivos y métodos de consolidación y colocación en el sistema de vacíos-aire. La prueba se puede realizar en especímenes premoldeados o en muestras retiradas de la estructura. Utilizando una sección pulida de una muestra de concreto, el sistema de vacíos se revisa en el microscopio. La información obtenida de esta prueba incluye al volumen de aire incluido, su superficie específica y el factor de espaciamiento.

## Densidad relativa, peso específico, absorción y vacíos

La densidad relativa, el peso específico, la absorción y el contenido de vacíos del concreto endurecido se pueden determinar conforme a los procedimientos de la norma ASTM C 642. El procedimiento del método de ebullición puede inutilizar a los especímenes para ciertas pruebas adicionales, especialmente para las pruebas a compresión. La densidad relativa se puede obtener dividiendo el peso específico entre el peso específico del agua ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ).

El peso específico saturado y superficialmente seco (sss) a menudo se requiere para los especímenes que serán usados en otras pruebas. En este caso, el peso específico se puede determinar saturando al espécimen en agua durante 48 horas y entonces determinando su peso en el aire (cuando esté sss) además de sumergido en agua. El peso específico sss se calcula entonces como sigue:

\* En muchas plantas de prefuerzo se utilizan compuestos de fraguado rápido para cabecear cilindros a compresión con el propósito de determinar la resistencia para liberar la tensión. Tales cilindros se pueden probar media hora después de haber sido cabeceados si el material del cabeceo ha alcanzado resistencias comparables a las esperadas en los cilindros.

\*\* Referencia 14-28.

$$D_{SSD} = \frac{W_1 \rho}{W_1 - W_2}$$

en que

$D_{SSD}$  es el peso específico en condición SSD

$W_1$  es el peso SSD al aire

$W_2$  es el peso sumergido en agua

$\rho$  es el peso específico del agua, 1000 kg/m<sup>3</sup>

El peso específico sss proporciona una aproximación cercana al peso volumétrico del concreto fresco. La densidad del concreto endurecido también puede determinarse por medio de métodos nucleares (ASTM C 1040).

## Contenido de cemento

El contenido de cemento del concreto endurecido puede determinarse por medio de los métodos de las normas ASTM C 85 y C 1084 ó por la prueba de ácido maléico u otros procedimientos no estandarizados.\* Aunque no se llevan a cabo con frecuencia, las pruebas de contenido de cemento son de valor para determinar la causa de la falta de desarrollo de resistencia o de la baja durabilidad del concreto. El contenido de agregado también puede determinarse con estas pruebas. El usuario de estos métodos de prueba deberá estar enterado respecto a ciertos aditivos y tipos de agregado que pueden alterar los resultados. La presencia de aditivos minerales finamente divididos se reflejaría en los resultados de las pruebas.

## Contenido de aditivos minerales y aditivos orgánicos

La presencia y cantidad de ciertos aditivos minerales, como la ceniza volante, se puede determinar con técnicas petrográficas (ASTM C 856). Normalmente es necesaria una muestra del aditivo mineral usado en el concreto como referencia para determinar el tipo y la cantidad de aditivo mineral presente. La presencia y posiblemente la cantidad de aditivos orgánicos (tales como los reductores de agua), se pueden determinar por espectrofotometría infrarroja.\*\*

## Contenido de cloruros

La inquietud por la corrosión del acero de refuerzo ocasionada por cloruros ha llevado a controlar y limitar el contenido de cloruros del concreto reforzado. Los límites para el contenido de ión cloruro soluble en agua en el concreto reforzado endurecido se presentan en el Capítulo 7. El contenido de ión cloruro soluble en agua del concreto endurecido se puede determinar según los procedimientos delineados en el Reporte de la Administración Federal de Carreteras de los E.E.U.U., (Federal Highway Administration) FHWA-RD-77-85.† El contenido total de cloruros se puede determinar mediante las normas ASTM C 114 ó AASHTO T 260. Actualmente se encuentran en desarrollo procedimientos de prueba por parte de la ASTM para la determinación del contenido de ión cloruro soluble en el agua.

## Análisis petrográfico

El análisis petrográfico hace uso de las técnicas de microscopía descritas en la norma ASTM C 856 para determinar los componentes del concreto, la calidad del concreto, y la causa de comportamiento deficiente, falla o deterioro. Se puede facilitar la estimación del comportamiento futuro y la seguridad de los elementos de concreto. Algunos de los puntos que se pueden revisar por medio de un examen petrográfico son la pasta, el agregado, el aditivo mineral y el contenido de aire; el ataque de la congelación y de los sulfatos; la reactividad álcali-agregado; el grado de hidratación y de carbonatación; la relación agua-cemento; las características de sangrado; el daño por fuego; el descascaramiento; las erupciones; el efecto del aditivo; y varios aspectos distintos.††

## Cambios de volumen y longitud

En ocasiones, cuando se le da ciertos usos al concreto, se especifican límites para los cambios de volumen o de longitud. El cambio de volumen también resulta de interés al agregar un ingrediente nuevo al concreto para asegurarse que no origine efectos adversos de importancia. El cambio de longitud debido a la contracción por secado, a la reactividad química, a fuerzas distintas de las intencionalmente aplicadas y a los cambios de temperatura se pueden determinar por medio de la norma ASTM C 157 (métodos de almacenamiento en agua y en aire). La determinación del cambio volumétrico temprano del concreto antes del endurecimiento se puede desarrollar usando la norma ASTM C 827. La fluencia se puede determinar de acuerdo con la norma ASTM C 512. El módulo de elasticidad estático y la relación d. Poisson estática del concreto a compresión se pueden determinar por medio de los métodos de la norma ASTM C 469 y los valores dinámicos de estos parámetros se pueden determinar con la norma ASTM C 215.

## Carbonatación

La profundidad o grado de carbonatación se puede determinar por medio de técnicas petrográficas (ASTM C 856) a través de la observación del carbonato de calcio - producto químico primario que resulta de la carbonatación. Además se puede usar una prueba de color con fenolftaleína para estimar la profundidad de carbonatación probando el pH del concreto (la carbonatación reduce el pH). Después de la aplicación de la solución de fenolftaleína a la superficie de concreto recién fracturada, las zonas que no están carbonatadas adquieren un color rojo o púrpura, en tanto que las zonas carbonatadas permanecen sin color. Cuando se observa el indicador de fenolftaleína contra la pasta endurecida, cambia de color a un pH de 9.0 a 9.5. El pH de un concreto de buena calidad no carbonatado sin aditivos normalmente es mayor de 12.5.‡

\* Referencias 14-8 y 14-9.

\*\* Referencias 14-6 y 14-30.

† Referencia 14-12.

†† Referencia 14-30.

‡ Referencias 14-3 y 14-5.

## Durabilidad

La durabilidad se refiere a la capacidad del concreto para resistir el deterioro proveniente del medio ambiente o del servicio que reciba. Un concreto diseñado adecuadamente deberá perdurar sin fallas de importancia durante su vida de servicio. Para cubrir los requisitos del proyecto, asegurarse o verificar la durabilidad, o determinar el efecto de ciertos ingredientes o procedimientos de operación sobre la durabilidad, se pueden efectuar varias pruebas. La resistencia a la congelación y al deshielo se puede determinar de acuerdo con las normas ASTM C 666, C 671 y C 682. La resistencia a los descascaramientos provocados por el uso de productos descongelantes se puede determinar por medio de la norma ASTM C 672. La protección contra la corrosión y la determinación de la actividad de corrosión del acero de refuerzo se pueden probar según la norma ASTM C 876. La reactividad álcali-agregado se puede analizar con las normas ASTM C 227 (reacción álcali-sílice), C 289, C 342, C 441 (efectividad de los aditivos minerales inhibidores de la reacción álcali-sílice), y C 586 (reacción álcali-carbonato). La resistencia a los sulfatos se puede evaluar por medio de las normas ASTM C 452 y C 1012. La resistencia a la abrasión se puede determinar con la norma ASTM C 418 (limpieza con chorro de arena), C 779 (métodos de disco giratorio, de rueda rectificadora y de baleros de bolas), y C 944 (cortadora rotatoria).

## Contenido de humedad

El contenido de humedad en el lugar o humedad relativa del concreto endurecido a veces es útil para determinar si el concreto se encuentra suficientemente seco para la aplicación de materiales que recubran los pisos y de revestimientos. El contenido de humedad deberá ser también lo suficientemente bajo para evitar las descantilladuras de los concretos expuestos a temperaturas por arriba del punto de ebullición del agua.

El método más directo para determinar el contenido de humedad es cortar en seco un espécimen del elemento de concreto en cuestión, colocarlo en un recipiente a prueba de humedad, y transportarlo al laboratorio para su prueba. Después de obtener el peso inicial del espécimen, se le seca en un horno a aproximadamente 104°C hasta obtener un peso constante. La diferencia entre los dos pesos divididos por el peso seco y multiplicados por 100, dará el contenido de humedad en porciento. También se puede disponer de medidores para contenido de humedad o humedad relativa.

A pesar de que puede llegar a requerir de varios meses de secado al aire, frecuentemente es necesaria una humedad relativa de aproximadamente 80 % ó menos antes de colocar los materiales de recubrimiento sobre los pisos de concreto (ver Capítulo 13). Otra prueba útil es la prueba de la lámina de polietileno. Una lámina cuadrada de polietileno claro de 1.20 m de lado se pega con cinta de aislar sobre el piso; si bajo ella no se condensa humedad después de 24 a 48 horas, la losa se considera lo suficientemente seca para algunos revestimientos y materiales de piso.\*

## Permeabilidad

Se puede disponer de varios métodos de prueba para determinar la permeabilidad del concreto a distintas sustancias. Se hace uso tanto de métodos directos como indirectos. La resistencia a la penetración del ión cloruro, por ejemplo, se puede determinar embalsando una solución de cloruro sobre una superficie de concreto a profundidades particulares (AASHTO T259). La prueba de permeabilidad rápida a los cloruros (resistencia eléctrica) (AASHTO T277) se correlaciona satisfactoriamente con la permeabilidad y resistencia a la penetración del ión cloruro del concreto. También se emplean varios métodos de absorción. Se pueden obtener datos de permeabilidad directa al agua utilizando un método recomendado por el Instituto Norteamericano del Petróleo (American Petroleum Institute) para rocas. En la ASTM se encuentra en proceso de desarrollo un método estándar para la permeabilidad hidráulica del concreto.\*\*

## Métodos de prueba no destructivos

Varias pruebas no destructivas† se pueden usar para evaluar la resistencia relativa del concreto endurecido. Las pruebas más comúnmente usadas son las de esclerómetro, penetración, arranque (pullout) y dinámicas o de vibración. Entre las técnicas relativamente nuevas que se encuentran en desarrollo para probar la resistencia y otras propiedades del concreto endurecido se incluyen los rayos X, la radiografía gama, los medidores de humedad de neutrones, los medidores magnéticos de recubrimiento, la electricidad, la absorción de microondas y las emisiones acústicas. Cada método tiene limitaciones, y se deberá tener precaución en aceptar los resultados de pruebas no destructivas como si se tuviera una correlación constante con la prueba tradicional de compresión, es decir, deberán desarrollarse correlaciones empíricas antes de su uso.

**Método del esclerómetro.** El esclerómetro o martillo de Schmidt (Fig. 14-10), es en esencia, un medidor de la dureza de la superficie que contiene un medio rápido y simple para revisar la uniformidad del concreto. Mide el rebote de un émbolo cargado con un resorte después de haber golpeado una superficie plana de concreto. La lectura del número de rebote da una indicación de la resistencia a compresión del concreto.

Los resultados de la prueba con esclerómetro (norma ASTM C 805) se ven afectados por la lisura de la superficie, el tamaño, forma, y rigidez del espécimen; la edad y condición de humedad del concreto; el tipo de agregado grueso; y la carbonatación de la superficie de concreto. Cuando se reconocen estas limitaciones y el esclerómetro se calibra para los materiales particulares que se utilicen en el concreto (Fig. 14-11), entonces este instrumento puede ser útil para determinar la resistencia a la compresión relativa y la uniformidad del concreto en la estructura.

**Método de penetración.** El sondeo Windsor (ASTM C 803), como el esclerómetro, es básicamente un probador de

\* Referencia 14-27.

\*\* Consulte las Referencias 14-2, 14-4, 14-14, 14-16, 14-17 y 14-22 para mayor información.

† Referencias 14-11, 14-13, 14-24 y 14-25.

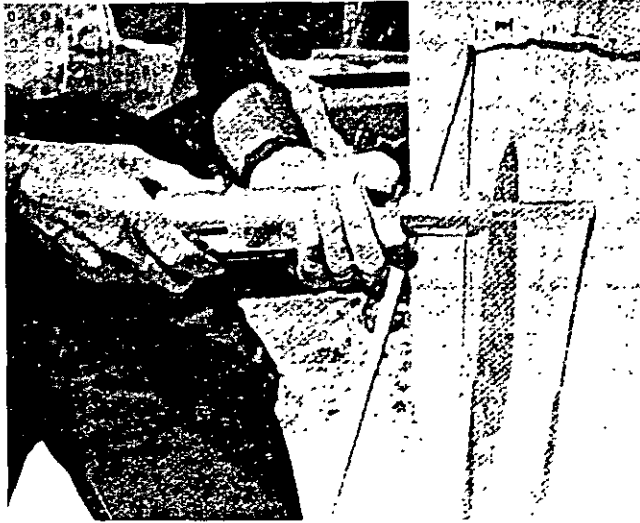
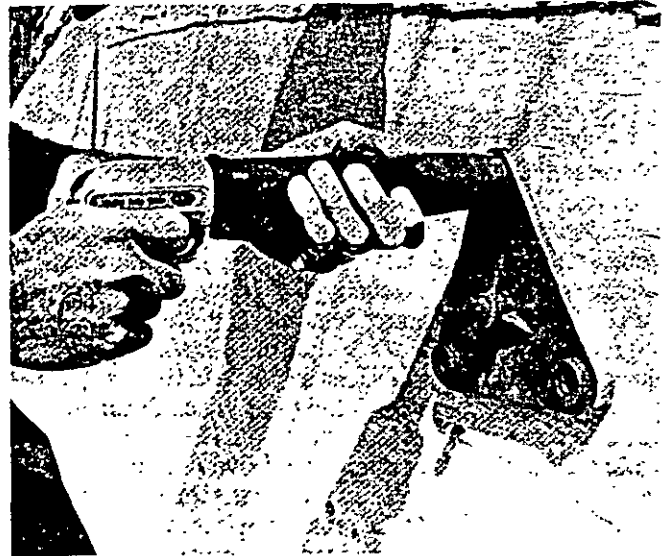


Figura 14-10. El esclerómetro proporciona una indicación de la resistencia a la compresión del concreto.



A. Una pistola accionada con pólvora clava una sonda de aleación acerada dentro del concreto.

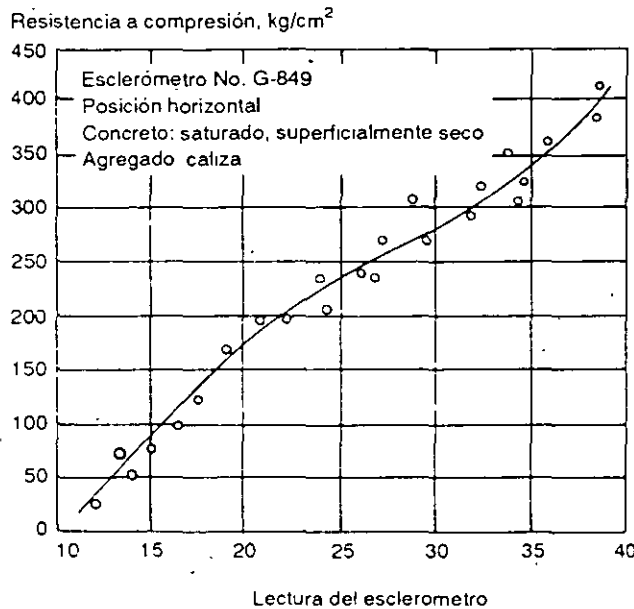
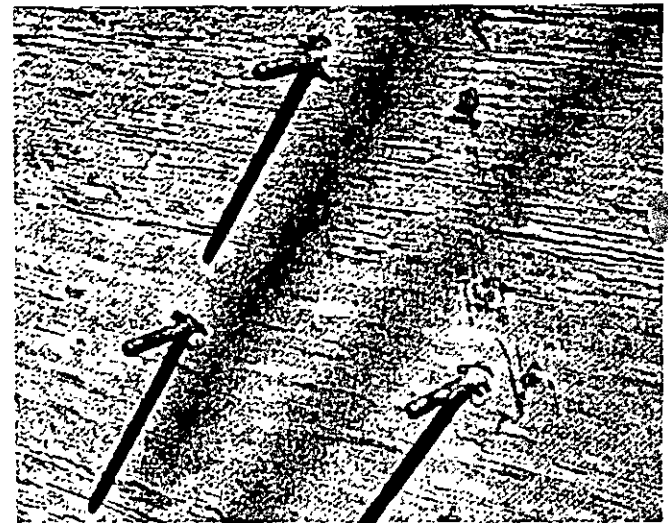


Figura 14-11. Ejemplo de una gráfica de calibración de un esclerómetro.

dureza que brinda un medio rápido para determinar la resistencia relativa del concreto. El equipo consiste de una pistola accionada con pólvora que clava una sonda de aleación acerada (aguja) dentro del concreto (Fig. 14-12). Se mide la longitud expuesta de la sonda y se relaciona con la resistencia a compresión del concreto por medio de una tabla de calibración.

Los resultados del sondeo Windsor se verán modificados por la lisura de la superficie del concreto y por el tipo y dureza del agregado usado. Por lo tanto, se deberá hacer una curva o tabla de calibración para el concreto particular por probar, normalmente a partir de corazones o especímenes colados, para mejorar la precisión.



B. Se mide la longitud expuesta de la sonda y entonces se determina la resistencia relativa a compresión del concreto por medio de una tabla de calibración.

Figura 14-12. Técnica del sondeo Windsor para determinar la resistencia relativa a compresión del concreto.

Tanto el esclerómetro como el sondeo de penetración dañan la superficie de concreto en cierto grado. El esclerómetro produce una pequeña muesca sobre la superficie; el sondeo de penetración deja un agujero pequeño y puede causar agrietamientos leves y cráteres minúsculos parecidos a las erupciones.

**Pruebas de arranque (pullout).** La prueba de arranque (norma ASTM C 900) implica colar el extremo alargado de una varilla de acero dentro del concreto por ensayar para luego medir la fuerza necesaria para arrancarla (Fig. 14-13). La prueba mide la resistencia del concreto - siendo la resistencia medida, la resistencia directa al cortante en el concreto.

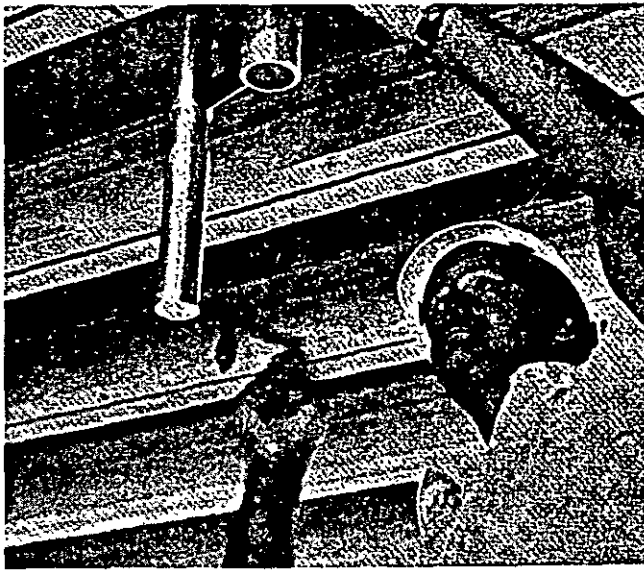


Figura 14-13. Uso del equipo de la prueba de arranque (pullout) para medir la resistencia del concreto.

Esta a su vez se relaciona con la resistencia a la compresión y de esta manera se efectúa una medida de la resistencia en el lugar.

**Pruebas dinámicas o de vibración.** Una prueba dinámica o de vibración (velocidad de pulso) (ASTM C 597) se basa en el principio de que la velocidad del sonido en un sólido se puede medir (1) determinando la frecuencia resonante de un espécimen ó (2) registrando el tiempo de recorrido de pulsos cortos de vibración a través de una muestra. Las velocidades elevadas indican que el concreto es de buena calidad, y las velocidades bajas indican concretos de calidad pobre.

Las técnicas microsísmicas que utilizan energía mecánica de baja frecuencia se pueden usar para detectar, localizar y registrar discontinuidades dentro de los sólidos. Se puede determinar el módulo de elasticidad así como la presencia y orientación de agrietamientos superficiales e internos. Las frecuencias fundamentales transversales, longitudinales y torsionales de especímenes del concreto se pueden determinar con la norma ASTM C 215, un método usado frecuentemente en las pruebas de durabilidad en el laboratorio tales como congelación y deshielo (ASTM C 666).

**Otras pruebas.** El uso de rayos X para ensayar las propiedades del concreto se encuentra limitado debido al elevado costo y peligro del equipo de alto voltaje necesario, así como por los riesgos de radiación.

Se puede usar en el campo equipo de radiografía gamma para determinar la ubicación del refuerzo, la densidad, y quizás los apanalamientos en los elementos de concreto estructural. Los procedimientos de la norma ASTM C 1040 hacen uso de la radiación gamma para determinar la densidad del concreto en el lugar sin endurecer y endurecido.

Se puede disponer de dispositivos de detección magnética que funcionan con baterías como el pachómetro o el medidor de recubrimiento con el propósito de medir la profundidad del refuerzo dentro del concreto y para detectar la posición de las barras. Se están desarrollando equipos de resistividad eléctrica para estimar los espesores de las losas de concreto para pavimentos.

Se ha desarrollado un método de absorción de microondas para determinar el contenido de humedad de materiales

porosos de construcción tales como el concreto. Las técnicas de emisión acústica dan muestra de esperanzas para el estudio de niveles de carga en estructuras y para localizar el origen de los agrietamientos.

La Tabla 14-2 enlista varios métodos de pruebas no destructivas junto con sus principales aplicaciones.\*

## Evaluación de los resultados de las pruebas de compresión

Los requisitos del Reglamento de construcción para concreto reforzado ACI 318 señalan que la resistencia a compresión del concreto puede considerarse satisfactoria si los promedios de todos los conjuntos de tres pruebas de resistencia consecutivas igualan o exceden la resistencia especificada a los 28 días y si ninguna prueba de resistencia individual (el promedio de dos cilindros) se encuentra más allá de  $35 \text{ kg/cm}^2$  debajo de la resistencia especificada.\*\*

Si la resistencia de cualquier cilindro curado en el laboratorio es inferior a la resistencia especificada ( $f'c$ ) menos  $35 \text{ kg/cm}^2$ , se deberá evaluar la resistencia del concreto en el lugar. También se deberá evaluar la resistencia si los cilindros curados en campo tienen una resistencia menor que el 85% de los cilindros compañeros curados en el laboratorio. El requisito del 85% puede ignorarse si la resistencia de los cilindros curados en campo rebasa a  $f'c$  en más de  $35 \text{ kg/cm}^2$ .

Cuando sea necesario, la resistencia en el lugar deberá determinarse ensayando tres corazones por cada prueba de resistencia en que los cilindros curados en el laboratorio hayan estado por debajo de  $f'c$  en más de  $35 \text{ kg/cm}^2$ . Si la estructura permanece seca durante su servicio, antes de la prueba deberán secarse los corazones 7 días a una temperatura de 16 a  $27^\circ\text{C}$  y a una humedad relativa de menos de 60%. Los corazones deberán sumergirse en agua por lo menos 40 horas antes de probarlos si la estructura va a estar en servicio con un grado de humedad mayor que en estado superficialmente húmedo.

Los métodos de prueba no destructivos no sustituyen a las pruebas de corazones (ASTM C 42). Si la resistencia promedio de tres corazones es de por lo menos 85% de  $f'c$  y si ningún corazón es menor que 75% de  $f'c$ , se considerará estructuralmente adecuado al concreto de la zona representada por el corazón. Si los resultados de las pruebas de corazones correctamente realizadas son tan bajos como para poner en duda la integridad estruc-

\* Consulte la Referencia 14-25 para contar con información adicional sobre éstos y sobre otros métodos de prueba

\*\* Además de los dos cilindros a 28 días, a menudo las especificaciones de la obra solicitan uno o dos cilindros a 7 días y uno o más cilindros de "reserva". Los cilindros a siete días controlan el desarrollo de resistencia a edad temprana. Los cilindros de reserva comúnmente se utilizan como respaldos en caso de que los cilindros a 28 días se dañen o de que no alcancen la resistencia. Cuando se den rupturas a 28 días bajas, el cilindro de reserva se ensayará a 56 días luego de un curado estándar.

† Refiérase al Capítulo 7 y a las Referencias 14-13, 14-20 y 14-29 para mayor información.

**Tabla 14-2. Métodos de evaluación no destructiva (END) para el concreto**

Propiedades del concreto	Métodos de END recomendados	Métodos de END posibles
Resistencia	Sondeo de penetración Esclerómetro Métodos de arranque (pullout)	
Calidad general y uniformidad	Sondeo de penetración Esclerómetro Velocidad de pulso ultrasónica Radiografía gamma	Eco de pulso ultrasónico
Espesor		Radar Radiografía gamma Eco de pulso ultrasónico
Rigidez	Velocidad de pulso ultrasónica	Carga de prueba (carga-deflexión)
Densidad	Radiografía gamma Velocidad de pulso ultrasónica	Indicador de densidad de neutrones
Tamaño de barras y ubicación	Medidor de recubrimiento (pachómetro) Radiografía gamma	Radiografía con rayos X Eco de pulso ultrasónico Radar
Estado de corrosión del acero de refuerzo	Medición del potencial eléctrico	
Presencia de vacíos subsuperficiales	Impacto acústico Radiografía gamma Velocidad de pulso ultrasónica	Inspección térmica Radiografía con rayos X Eco de pulso ultrasónico Radar
Integridad estructural de la estructura de concreto		Ensayo de prueba usando emisión acústica

Adaptada de la Referencia 14-25.

tural, se pueden llevar a cabo pruebas de carga tal como menciona el Capítulo 20 del Reglamento ACI 318.†

N. del T.: Los procedimientos de prueba y normas a los que este libro hace referencia son los especificados por la American Society for Testing Materials (ASTM), organismo regulador de pruebas en los E.E.U.U. En México, el organismo oficial que regula las pruebas es la Subdirección General de Normas de la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, que emite las Normas Oficiales Mexicanas (NOM). Se incluye un apéndice en el que se enlistan las principales normas NOM referentes al concreto, equivalentes a las normas ASTM.

## REFERENCIAS

14-1. Hime, W. G., and Willis, R. A., *A Method for the Determination of the Cement Content of Plastic Concrete*, Research Department Bulletin RX061, Portland Cement Association, 1955.

14-2. *Recommended Practice for Determining Permeability of Porous Media*, API RP 27, American Petroleum Institute, Washington, D.C., 1956.

14-3. Verbeck, G. J., *Carbonation of Hydrated Portland Cement*, Research Department Bulletin RX087, Portland Cement Association, 1958.

14-4. Tyler, I. L., and Erlin, Bernard, *A Proposed Simple Test Method for Determining the Permeability of Concrete*, Research Department Bulletin RX133, Portland Cement Association, 1961.

14-5. Steinour, Harold H., *Influence of the Cement on Corrosion Behavior of Steel in Concrete*, Research

Department Bulletin RX168, Portland Cement Association, 1964.

14-6. Hime, W. G.; Mivelaz, W. F.; and Connolly, J. D., *Use of Infrared Spectrophotometry for the Detection and Identification of Organic Additions in Cement and Admixtures in Hardened Concrete*, Research Department Bulletin RX194, Portland Cement Association, 1966.

14-7. Kelly, R. T., and Vail, J. W., "Rapid Analysis of Fresh Concrete," *Concrete*, The Concrete Society Palladian Publications, Ltd., London, vol. 2 no. 4, April 1968, pages 140-145; vol. 2, no. 5, May 1968, pages 206-210.

14-8. Tabikh, A. A.; Balchunas, M. J.; and Schaefer, D. M., "A Method Used to Determine Cement Content in Concrete," *Concrete*, Highway Research Report Number 370, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1971.

14-9. Clemena, Gerardo G., *Determination of the Cement Content of Hardened Concrete by Selective Solution*, PB-213 855, Virginia Highway Research Council, Federal Highway Administration, National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, Springfield, Virginia, 1972.

14-10. Forester J. A.; Black, B. F.; and Lees, T. P., *An Apparatus for Rapid Analysis Machine*, Technical Report, Cement and Concrete Association, Wexham Springs, Slough, England, April 1974.

14-11. Malhotra, V. M., *Testing Hardened Concrete, Non-destructive Methods*, ACI Monograph No. 9, American Concrete Institute-Iowa State University Press, Detroit, 1976.

14-12. Clear, K. C., and Harrigan, E. T., *Sampling and Testing for Chloride Ion in Concrete* FHWA-RD-77-85,



Federal Highway Administration, Washington, D.C., August 1977.

- 14-13. *In-Place Concrete Strength Evaluation—A Recommended Practice*, NRMCA Publication 133-79, revised 1979, National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland.
- 14-14. *Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration*, ASSHTO T259-80, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1980.
- 14-15. Forstie, Douglas A., and Schnormeir, Russell, "Development and Use of 4 by 8 Inch Concrete Cylinders in Arizona," *Concrete International*, American Concrete Institute, July 1981, pages, 42-45.
- 14-16. Whiting, D., *Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete*, FHWA-RD-81-119, Federal Highway Administration, 1981.
- 14-17. Pfeifer, D. W., and Scali, M.J., *Concrete Sealers for Protection of Bridge Structures*, NCHRP Report 244, Transportation Research Board, National Research Council, 1981.
- 14-19. "Rapid Analysis of Fresh Concrete," *Concrete Technology Today*, PL832B, Portland Cement Association, June 1983.
- 14-20. *Recommended Practice for Evaluation of Strength Test Results of Concrete*, ACI 214-77, reapproved 1983, ACI Committee 214 Report, American Concrete Institute.
- 14-21. Gebler, S. H., and Klieger, P., *Effects of Fly Ash on the Air-Void Stability of Concrete*, Research and Development Bulletin RD085T, Portland Cement Association, 1983.
- 14-22. *Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete*, AASHTO T277-831, American Association of State Highway and Transportation Officials, 1983.
- 14-23. Date, Chetan G., and Schonormeier, Russell H., "Day-to-Day Comparison of 4 and 6 Inch Diameter Concrete Cylinder Strengths," *Concrete International*, American Concrete Institute, August 1984, pages 24-26.
- 14-24. Malhotra, V.M., *In Situ/Nondestructive Testing of Concrete*, SP-82, American Concrete Institute, 1984.
- 14-25. Clifton, James R., "Nondestructive Evaluation in Rehabilitation and Preservation of Concrete and Masonry Materials," SP-85-2, *Rehabilitation, Renovation, and Preservation of Concrete and Masonry Structures*, SP-85, American Concrete Institute, 1985, pages 19-29.
- 14-26. *Permeability of Concrete and Its Control*, The Concrete Society, London, England, 1985.
- 14-27. Kosmatka, Steven H., "Floor-Covering Materials and Moisture in Concrete," *Concrete Technology Today*, PL853B, Portland Cement Association, September 1985.
- 14-28. Kosmatka, Steven H., "Compressive versus Flexural Strength for Quality Control of Pavements," *Concrete Technology Today*, PL854B, Portland Cement Association, 1985.
- 14-29. *Boulding Code Requirements for Reinforced Concrete*, ACI 318-83, revised 1986, ACI Committee 318 Report, American Concrete Institute.
- 14-30. Kosmatka, Steven H., "Petrographic Analysis of Concrete," *Concrete Technology Today*, PL862B, Portland Cement Association, 1986.
- 14-31. "Standard Practice for Rapid Determination of Water Soluble Chloride in Freshly Mixed Concrete, Aggregate and Liquid Admixtures," *NRMCA Technical Information Letter no. 437*, National Ready Mixed Concrete Association, March 1986.
- 14-32. Mor, Avi, and Revina, Dan, "The DIN Flow Table," *Concrete International*, American Concrete Institute, December 1986.
- 14-33. *Manual of Aggregate and Concrete Testing*, revised 1987, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.





## CAPITULO 15

# Concretos de Tipos Especiales

Los concretos de tipos especiales son aquellos concretos que tienen propiedades distintas a las ordinarias o aquellos que se producen mediante técnicas poco usuales. Por definición el concreto es un material compuesto que consiste esencialmente de un medio aglutinante y de partículas de agregado, y puede adoptar muchas formas. La Tabla 15-1 enlista muchos tipos especiales de concretos hechos con cemento portland y algunos con otros aglutinantes distintos del cemento portland. En muchos casos la terminología del listado describe el uso, propiedad o condición del concreto. No se anotan los nombres de marcas. Algunos de esos concretos se describen en este capítulo.

con una combinación de agregados de peso ligero y de peso normal. El término "peso ligero-arena" se refiere al concreto ligero fabricado con agregado de peso ligero y con arena natural.

El concreto ligero estructural tiene una densidad al aire en estado seco dentro del intervalo de 1360 a 1840 kg/m<sup>3</sup> y una resistencia a compresión a 28 días por encima de 175 kg/cm<sup>2</sup>. Algunas especificaciones de obra permiten densidades de hasta 1920 kg/m<sup>3</sup>. El concreto de peso normal que contiene arena, grava, o piedra triturada normales tiene una densidad seca dentro del intervalo de 2080 a 2480 kg/m<sup>3</sup>. El concreto ligero estructural se emplea principalmente para reducir el peso de la carga muerta en los elementos de concreto, como en el caso de las losas de edificios de gran altura.

### CONCRETO LIGERO ESTRUCTURAL

El concreto ligero estructural es similar al concreto de peso normal excepto por su menor densidad. Se fabrica con agregados de peso ligero (el concreto todo de peso ligero) o

### Agregados ligeros estructurales

Los agregados ligeros estructurales normalmente se clasifican según sea su proceso de producción, pues diversos procesos producen agregados con propiedades un tanto dis-

**Tabla 15-1. Algunos concretos especiales**

Concretos especiales fabricados con cemento portland		
Concreto con aire incluido	Concreto de gran peso	Concreto pretorzado
Concreto arquitectónico	Concreto de alta resistencia a edad temprana	Concreto compactado con rodillos
Concreto celular	Concreto de alta resistencia	Concreto con agregado de aserrín
Concreto colado centrifugamente	Concreto aislante	Concreto para blindaje
Concreto coloidal	Concreto modificado con látex	Concreto lanzado
Concreto coloreado	Concreto de baja densidad	Concreto compensador de contracción
Relleno de densidad controlada	Concreto masivo	Concreto con humo de sílice
Concreto ciclópeo	Concreto ligero de resistencia moderada	Suelo-cemento
Concreto consolidado por apisonado enérgico	Concreto para clavar	Concreto estampado
Concreto modificado con epóxicos	Concreto de revenimiento nulo	Concreto ligero estructural
Concreto con agregado expuesto	Concreto modificado con polímeros	Concreto superplastificado
Ferrocemento	Concreto poroso	Terrazo
Concreto reforzado con fibras	Concreto puzolánico	Concreto para tubo-embudo
Concreto para rellenos	Concreto prefabricado	Concreto tratado al vacío
Concreto fluido	Concreto pre-empacado	Concreto con vermiculita
Concreto con ceniza volante	Concreto con agregado pre-colocado	Concreto blanco
Concreto con granulometría discontinua		Concreto de revenimiento cero
Concretos especiales que no utilizan cemento portland		
Concreto acrílico	Concreto furano	Concreto de poliéster
Concreto de fosfato de aluminio	Concreto de yeso	Concreto de polímeros
Concreto asfáltico	Concreto de látex	Concreto de silicato de potasio
Concreto de aluminato de calcio	Concreto de fosfato de magnesio	Concreto de silicato de sodio
Concreto epóxico	Concreto de metacrilato de metilo (MMA)	Concreto de azufre

La mayoría de las definiciones de estos tipos de concreto aparecen en "Cement and Concrete Terminology", publicación ACI 116R-78 del Comité ACI 116, American Concrete Institute, 1978

tintas. Los agregados ligeros estructurales deberán cumplir con los requisitos de la norma ASTM C 330, que incluye

- Pizarras, esquistos y arcillas expandidas de horno rotatorio
- Pizarras y esquistos expandidos de parrillas de sinterización
- Ceniza volante peletizada o extruída
- Escorias expandidas

Los agregados ligeros estructurales también pueden producirse procesando otros tipos de material, como la piedra pómez y la escoria volcánica que se encuentran de manera natural.

Los agregados ligeros estructurales tienen densidades considerablemente menores a las de los agregados de peso normal, variando de 560 a 1120 kg/m<sup>3</sup> comparados contra 1200 a 1760 kg/m<sup>3</sup> para los agregados de peso normal. Pueden absorber agua en una cantidad de 5% a 20% del peso de material seco. Para controlar la uniformidad de las mezclas de concreto ligero estructural, los agregados se prehumedecen (pero sin que se saturen) antes de su dosificación.

### Resistencia a compresión

La resistencia a compresión del concreto ligero estructural generalmente está relacionada con el contenido de cemento para un cierto revenimiento y contenido de aire más que con la relación agua-cemento. Esto se debe a la dificultad para

determinar qué cantidad del agua de mezclado total se absorbe dentro de las partículas de agregado y por lo tanto que cantidad reacciona con el cemento. El Reporte ACI 211.2, "Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete" (Práctica estándar para seleccionar la proporciones para el concreto ligero estructural), brinda una guía sobre la relación entre la resistencia a compresión y el contenido de cemento. Las resistencias a compresión típicas varían desde 210 hasta 350 kg/cm<sup>2</sup>. También se puede fabricar concreto de alta resistencia con agregados ligeros estructurales.

En las mezclas bien proporcionadas la relación entre el contenido de cemento y la resistencia es razonablemente constante para una fuente particular de agregado ligero. Sin embargo, la relación variará conforme cambie la fuente o el tipo de agregado. Cuando no se disponga de información que provenga del fabricante sobre esta relación, se necesitarán llevar a cabo mezclas de prueba con contenidos de cemento variables para desarrollar un intervalo de resistencias a compresión, incluyendo la resistencia especificada. La Fig. 15-1 muestra la relación entre contenido de cemento y resistencia a la compresión. A continuación se presenta un ejemplo de mezcla ligera estructural de 280 kg/cm<sup>2</sup> con una densidad al aire en estado seco de aproximadamente 1800 kg/m<sup>3</sup> utilizando una combinación de arena y grava naturales y una arcilla particular expandida de horno

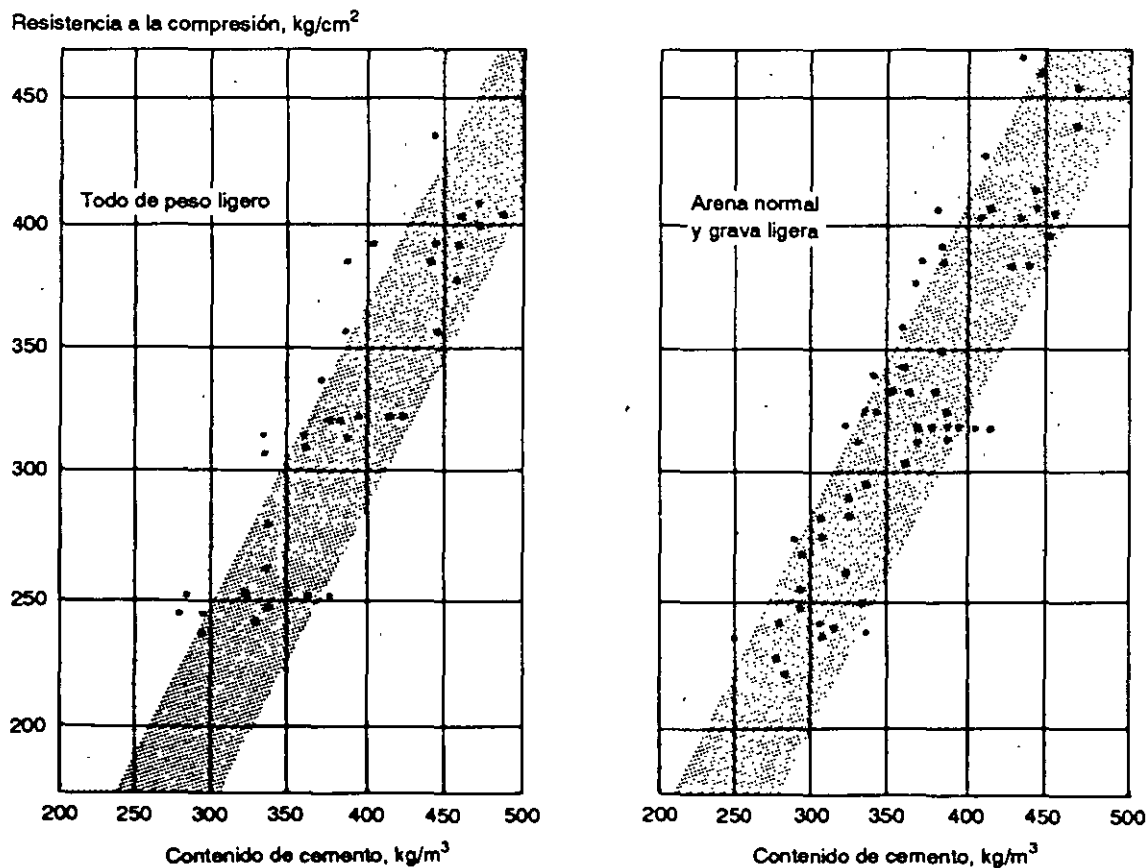


Figura 15-1. Relación entre la resistencia a compresión y el contenido de cemento de concretos ligeros estructurales colados en obra que utilizan tanto agregado fino como agregado grueso ligeros, o agregado grueso ligero y agregado fino de peso normal (los puntos representan los resultados reales del proyecto utilizando varias fuentes de cemento de agregados). Referencia 15-30.

rotatorio de peso ligero como agregado grueso (revenimiento: 7.5 cm; contenido de aire: 6%):

356 kg de cemento portland Tipo I  
534 kg de arena, seca al horno  
320 kg de grava (12.7 mm (1/2") a 2.5 mm (#8)), seca al horno  
356 kg de agregado ligero (9.5 mm (3/8") a 0.63 mm (#30)), seco al horno  
172 kg de agua de mezclado agregada  
774 cc de aditivo reductor de agua  
97 cc de aditivo inclusor de aire  
1 m<sup>3</sup> de rendimiento

Las proporciones de los materiales varían considerablemente para los distintos materiales y requisitos de resistencia.

## Aire incluido

Como sucede con el concreto de peso normal, la inclusión de aire en el concreto ligero estructural asegura una resistencia adecuada contra la congelación y deshielo, y contra las aplicaciones de productos descongelantes. También mejora la trabajabilidad, reduce el sangrado y la segregación, y puede llegar a compensar deficiencias leves en la granulometría del agregado.

La cantidad de aire incluido deberá ser la suficiente para dar una buena trabajabilidad al concreto plástico y una resistencia adecuada contra la congelación-deshielo en el concreto endurecido. El contenido de aire generalmente se encontrará entre 4.5 y 9%, dependiendo del tamaño máximo del agregado grueso que se emplee, así como de las condiciones de exposición. La prueba de contenido de aire deberá efectuarse por medio del método volumétrico (norma ASTM C 173). La durabilidad a la congelación-deshielo también se mejora en gran medida si se permite que el concreto ligero estructural se seque antes de quedar expuesto a los ambientes de congelación-deshielo.

## Especificaciones

Muchos proveedores de agregados ligeros que se emplean para concreto ligero estructural cuentan con información sobre las especificaciones sugeridas y las proporciones de mezclado referentes a su producto. Las especificaciones ordinarias para concreto estructural enuncian una resistencia mínima a compresión, una densidad máxima, un revenimiento máximo y un intervalo razonable para el contenido de aire.

El contratista deberá mantener también su interés respecto al sangrado, a la trabajabilidad, y a las propiedades de acabado cuando el concreto ligero estructural se encuentre en estado fresco.

## Mezclado

En general, los procedimientos para mezclar el concreto ligero estructural son similares a los usados para los concretos de densidad normal; no obstante, algunos de los agregados de mayor absorción podrían necesitar prehumedecerse antes de usarse. El agua agregada en la planta dosificadora deberá ser la suficiente para producir el revenimiento especificado en la obra. El revenimiento medido en la planta dosificadora

generalmente será mucho mayor que el que se mida en la obra.

## Trabajabilidad y capacidad de acabado

Las mezclas de concreto ligero estructural pueden ser proporcionadas para tener la misma trabajabilidad, capacidad de acabado y apariencia general que las mezclas de concreto de densidad normal con un buen proporcionamiento. Deberá existir suficiente pasta de cemento para cubrir cada partícula, y las partículas de agregado grueso no se deberán separar del mortero. Se necesita una cantidad suficiente de agregado fino para mantener cohesivo al concreto fresco. Si el material es deficiente en cuanto a la cantidad de material menor que la malla de 0.63 mm (No. 30), la capacidad de acabado se puede mejorar con el uso de una porción de arena natural, con un aumento en el contenido de cemento o con el uso de finos minerales satisfactorios. Como la inclusión de aire mejora la trabajabilidad, debería utilizarse sin importar el grado de exposición.

## Revenimiento

Debido a la menor densidad de los agregados, el concreto ligero estructural no se desploma tanto como un concreto de peso normal de igual trabajabilidad. Una mezcla con aire incluido que tenga un revenimiento de 5 a 7.5 cm se puede colocar en condiciones que requerirían un revenimiento de 7.5 a 12.5 cm para concretos de peso normal. Rara vez es necesario rebasar revenimientos de 12.5 cm para los colados normales de concreto ligero estructural. Con revenimientos mayores, las partículas grandes de agregado presentan la tendencia a flotar hacia la superficie, dificultando con ello las operaciones de acabado.

## Vibrado

Como con el concreto de peso normal, el vibrado puede usarse para consolidar de manera efectiva los concretos ligeros. Se recomiendan frecuencias mayores de 115 Hz, casi las mismas que las que comúnmente se usan para concretos de densidad normal. El período para lograr una consolidación adecuada varía, dependiendo de las características de la mezcla. Un vibrado excesivo provoca segregación al forzar las partículas de agregado de mayor tamaño hacia la superficie.

La vibración interna se recomienda para todas las losas con espesores mayores de 20 cm y para losas más delgadas que tengan acero de refuerzo o tubo-conductos. La cabeza del vibrador deberá quedar completamente sumergida durante la operación de vibrado. En las losas gruesas es posible insertar verticalmente la cabeza del vibrador; en las losas más delgadas deberá arrastrarse lentamente en el concreto de manera inclinada e incluso horizontalmente, y además a velocidad constante.

En las superficies planas, una plantilla vibratoria resulta efectiva para consolidar y para facilitar las operaciones de acabado.

## Colocación, acabado y curado

En general, el concreto ligero estructural es más fácil de manejar y colar que el concreto de peso normal. Para el acabado, un revenimiento de 5 a 10 cm produce resultados óptimos. Mayores revenimientos pueden causar segregación, retrasos en las operaciones de acabado, y producir superficies toscas y disparejas.

Si se considera bombear al concreto, quien dicte las especificaciones, así como los proveedores y el contratista deberán ser consultados sobre el desarrollo de una prueba de campo utilizando la bomba y la mezcla planeada para el proyecto. Podrían llegar a ser necesarios ciertos ajustes a la mezcla, pues la presión del bombeo causa que el agregado absorba una mayor cantidad de agua, reduciendo en consecuencia el revenimiento y aumentando la densidad del concreto. El agua absorbida por el agregado se evaporará eventualmente con el secado al aire del concreto.

Las operaciones de acabado deberán comenzar con mayor prontitud que en el caso de los concretos comparables de peso normal, aunque un acabado demasiado temprano puede ser perjudicial. Se deberá trabajar un mínimo de emparejado y alisado; para esta labor son preferibles las herramientas de aluminio o de magnesio.

Para los concretos ligeros se deberán seguir las mismas prácticas de curado que se utilizan para los concretos normales. Los dos métodos más comúnmente usados en las obras son el curado con agua (mediante inundación, rocío o utilizando cubiertas húmedas) y la prevención de la pérdida de humedad en las superficies descubiertas (cubriendo con papel a prueba de agua, láminas de plástico o sellando con compuestos líquidos formadores de membranas). En general, un curado de 7 días es adecuado para temperaturas ambiente desde 10 hasta 21°C y para temperaturas mayores de 21°C bastará con curar durante 5 días.\*

## CONCRETOS LIGEROS DE DENSIDAD BAJA Y DE RESISTENCIA MODERADA

El concreto de densidad baja - también conocido como concreto aislante - es un concreto ligero cuyo peso volumétrico seco en el horno es igual o menor que 800 kg/m<sup>3</sup>. Se fabrica con cemento portland, agua, aire y con o sin agregado y aditivos minerales. El peso volumétrico seco en el horno varía desde 240 hasta 800 kg/m<sup>3</sup> y la resistencia a compresión a los 28 días generalmente se encuentra entre 7 y 70 kg/cm<sup>2</sup>. El concreto de densidad baja colado en el sitio se utiliza principalmente para aislamientos térmicos y acústicos, cubiertas, rellenos para subbases de losas sobre el terreno, capas de nivelación para pisos o azoteas, muros a prueba de incendios, y revestimientos de conductos térmicos subterráneos. El concreto de densidad baja también se emplea en unidades prefabricadas de concreto reforzado para pisos, cubiertas y muros.

Un concreto ligero de resistencia moderada pesa aproximadamente de 800 a 1920 kg/m<sup>3</sup> seco al horno y tiene una resistencia a la compresión de aproximadamente 70 a 175 kg/cm<sup>2</sup>. Se fabrica con cemento portland, agua, aire y con o sin agregado y aditivos minerales. A densidades menores, se utiliza como relleno para aislamiento térmico y acústico de pisos, muros y cubiertas y se le conoce como concreto de

relleno. A densidades mayores se le utiliza para muros, pisos y cubiertas colados en el lugar y en paneles prefabricados para pisos y muros.\*\*

Para fines de la presente exposición, los concretos ligeros de densidad baja y de resistencia moderada se pueden agrupar como sigue:

**Grupo I**, fabricado con agregados expandidos, tales como perlita, vermiculita o esferas de tamaño pequeño de poliestireno expandido. Los pesos volumétricos secos al horno del concreto que hace uso de estos agregados varían generalmente entre 240 y 800 kg/m<sup>3</sup>. Este grupo se utiliza principalmente en concretos de densidad baja. Algunos concretos de resistencia moderada se pueden fabricar también con agregados de este grupo.

**Grupo II**, fabricado con agregados manufacturados al expandir, calcinar o sinterizar materiales tales como la escoria de alto horno, arcilla, diatomita, ceniza volante, esquisto, o pizarra, o mediante el procesamiento de materiales naturales como la piedra pómez, escoria volcánica o tufa. Los pesos volumétricos secos al horno utilizando estos agregados pueden variar de 720 a 1440 kg/m<sup>3</sup>. Los agregados de este grupo se usan en concretos ligeros de resistencias moderadas y algunos de estos materiales (escoria expandida, arcilla, ceniza volante, esquisto y pizarra) se utilizan también tanto en concretos de resistencia moderada como en concretos estructurales ligeros (hasta aproximadamente 1920 kg/m<sup>3</sup> secos al aire).

**Grupo III**, concretos fabricados incorporando dentro de una pasta de cemento o mortero de cemento-arena una estructura celular uniforme de vacíos-aire que se obtiene mediante espuma preformada (ASTM C 869), espuma formada en el lugar, o agentes espumantes especiales. Este concreto comúnmente se conoce como concreto celular. Los pesos volumétricos secos al horno que varían entre 240 y 1920 kg/m<sup>3</sup> se pueden obtener mediante la sustitución de algunas o todas las partículas de agregado por vacíos-aire; los vacíos-aire pueden llegar a constituir hasta el 80% del volumen. El concreto celular se puede fabricar para satisfacer los requisitos para los concretos de densidad baja y para los concretos ligeros de resistencia moderada simultáneamente.

Los agregados que se emplean en los Grupos I y II deben cubrir los requisitos de la norma ASTM C 332, "Standard Specification for Lightweight Aggregates for Insulating Concrete", (Especificación estándar para agregados ligeros para concretos aislantes). Estos agregados tienen pesos volumétricos en estado seco que varían desde 96 a 1120 kg/m<sup>3</sup> hasta 16 kg/m<sup>3</sup> que es el caso de las esferas de tamaño pequeño de poliestireno expandido.

## Proporciones de la mezcla

En la Tabla 15-2 aparecen ejemplos de proporciones de mezclas para los concretos de los Grupos I y II. En el Grupo I los contenidos de aire pueden llegar a alcanzar hasta un 25 a 35%. El agente inclusor de aire puede venir pre-empacado con el agregado o puede agregarse en el mezclador. Debido

\* Consulte las Referencias 15-17, 15-30 y 15-45 para mayor información.

\*\* Consulte las Referencias 15-32, 15-33 y otras referencias para mayor información.

**Tabla 15-2. Ejemplos de mezclas de concreto ligero aislante**

Tipo de concreto	Relación cemento portland: agregado en volumen	Densidad seca en el horno, kg/m <sup>3</sup>	Contenido de cemento portland Tipo I, kg/m <sup>3</sup>	Relación agua-cemento, en peso	Resistencia a compresión a los 28 días, kg/cm <sup>2</sup> , en cilindros de 15 x 30 cm
Perlita*	1:4	480 a 609	362	0.94	28
	1:5	415 a 577	306	1.12	23
	1:6	352 a 545	246	1.24	16
	1:8	320 a 513	234	1.72	14
Vermiculita*	1:4	497 a 593	380	0.98	21
	1:5	449 A 497	295	1.30	12
	1:6	368 a 465	246	1.60	9
	1:8	320 a 336	178	2.08	6
Poliestireno:** 0 kg de arena 74 kg de arena por metro cúbico 155 kg de arena por metro cúbico 200 kg de arena por metro cúbico	1:3:4	545#	445	0.40	23
	1.3:1	625#	445	0.40	28
	1.2:9	705#	445	0.40	33
	1:2:5	769#	445	0.40	39
Celular* (Cemento sin arena)	—	625	525	0.57	25
	—	545	469	0.56	15
	—	449	396	0.57	9
	—	368	317	0.65	4
Celular† (arenoso)††	1:1	929	430	0.40	32
	1:2	1250	374	0.41	58
	1:3	1602	357	0.51	154

\* Referencia 15-13.

\*\* Fuente. Referencia 15-24. La mezcla también contenía aire incluido y un agente reductor de agua.

† Fuente. Referencia 15-12.

†† Arena varillada en seco con un peso de 1602 kg/m<sup>3</sup>

# Densidad seca al aire a 28 días, 50% de humedad relativa

a la naturaleza absorbente del agregado, se deberá usar el método volumétrico (norma ASTM C 173) para determinar con precisión el contenido de aire.

Los requisitos de agua para los concretos aislantes y de relleno varían de manera considerable, dependiendo de las características del agregado, de la inclusión de aire, y de las proporciones de la mezcla. Se deberá realizar un esfuerzo adicional para evitar el uso de cantidades excesivas de agua evaporable en el concreto aislante que se emplee para rellenos de azoteas. El exceso de agua provoca una alta contracción por secado y grietas que podrían dañar la membrana a prueba de agua. Los acelerantes que contengan cloruro de calcio no deberán emplearse cuando el acero galvanizado se encuentre en contacto permanente con el concreto debido a los posibles problemas de corrosión.

Las proporciones de las mezclas de concretos del Grupo II normalmente se basan en volúmenes de materiales secos, sueltos aún cuando los agregados estén húmedos al dosificarse. Las proporciones satisfactorias pueden variar considerablemente para distintos agregados o combinaciones de agregados. Se pueden usar proporciones de mezclas que varían desde 0.250 hasta 0.875 m<sup>3</sup> de agregado por cada 100 kg de cemento en concretos ligeros fabricados con piedra pómez, esquisto expandido, y escoria expandida. Algunas mezclas, como las de los concretos sin finos, se fabrican sin agregado fino pero con un contenido total de vacíos de 20 a 35%. Los factores de cemento para concretos del Grupo II varían entre 120 y 360 kg por metro cúbico dependiendo del contenido de aire, de la granulometría del agregado y de las proporciones de la mezcla.

Los concretos sin finos que contengan piedra pómez, escoria expandida o esquisto expandido se pueden fabricar con 150 a 172 kg de agua por metro cúbico, con un total de vacíos de aire de 20 a 35%, y con un contenido de cemento de aproximadamente 280 kg por metro cúbico.

### Trabajabilidad

Debido a su elevado contenido de aire, los concretos ligeros que pesan menos de 800 kg/m<sup>3</sup> por lo general presentan una trabajabilidad excelente. Los revenimientos de hasta 25 cm normalmente son adecuados para concretos de los Grupos I y III; no obstante, la apariencia de la mezcla puede dar una indicación más confiable respecto a la consistencia. Los concretos celulares se manejan como líquidos y se vacían o se bombean hasta su lugar sin consolidación posterior.

### Mezclado y colocación

Todo concreto deberá mezclarse mecánicamente para producir una distribución uniforme de materiales con la consistencia adecuada y con la densidad requerida. Durante las maniobras de dosificación y mezclado, se pueden usar distintas secuencias para introducir los ingredientes, aunque la secuencia preferida consiste en introducir la cantidad requerida de agua dentro del mezclador, agregar después el cemento, el agente inclusor de aire o espumante, el agregado, la espuma preformada, y cualquier otro ingrediente.

Se deberán evitar mezclados y manejos excesivos porque tienden a romper las partículas de agregado, y con ello a

modificar la densidad y la consistencia. La segregación normalmente no constituye ningún problema (aunque podría serlo para el Grupo II), debido a las cantidades relativamente grandes de aire incluido.

El bombeo es el método de colocación más común, aunque también se pueden usar otros métodos. Las operaciones de acabado se deberán mantener en un mínimo; normalmente basta con alisar usando una llana. Los colados con concretos aislantes deberán ser realizados por trabajadores experimentados con estos concretos especiales.

Periódicamente se pueden efectuar pruebas de densidad húmeda (norma ASTM C 138) en la obra para revisar la uniformidad del concreto. En general, las variaciones de densidad no deberán exceder  $32 \text{ kg/m}^3$ . Se puede determinar una aproximación de la densidad seca al horno a partir del peso volumétrico del concreto fresco.

### Conductividad térmica

Para determinar los valores de conductividad térmica se utilizó la norma ASTM C 177, "Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus", (Método de prueba para las mediciones de flujo de calor en estado estable y propiedades de transmisión térmica por medio del aparato de placa caliente protegida). La Fig. 15-2 muestra una relación aproximada entre la conductividad térmica y la densidad. La conductividad térmica del concreto aumenta con los incrementos de contenido de humedad y de densidad.

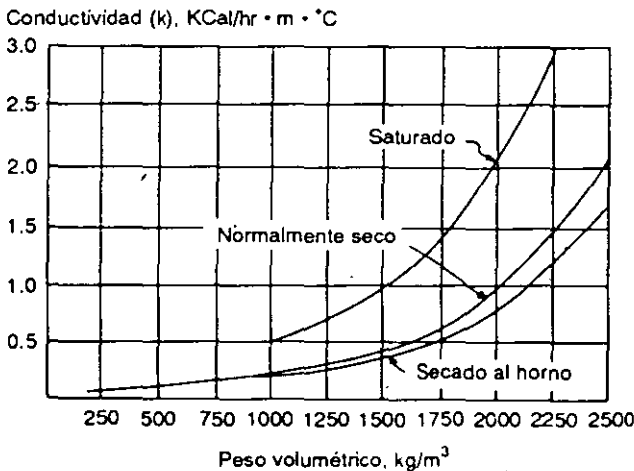


Figura 15-2. Relación aproximada entre el peso volumétrico y la conductividad térmica de concretos estructurales aislantes de peso ligero y de peso normal. Referencia 15-10.

### Resistencia

Los requisitos de resistencia dependerán del uso que se proponga dar al concreto. Por ejemplo, una resistencia a la compresión de  $7 \text{ kg/cm}^2$  ó aún menor podría ser satisfactoria para aislamiento de líneas subterráneas de vapor. El aislamiento de relleno de azoteas requiere de una resistencia

temprana suficiente para soportar el tránsito de peatones. Las resistencias a compresión de  $7$  a  $14 \text{ kg/cm}^2$  normalmente son adecuadas para rellenos de azoteas, aunque a veces se especifican resistencias de hasta  $35 \text{ kg/cm}^2$ . Por lo general, la resistencia del concreto aislante es de menos importancia. La resistencia a compresión de los concretos aislantes ligeros deberá determinarse por medio de los métodos especificados en las normas ASTM C 495 ó C 513.

La Tabla 15-2 y la Fig. 15-3 dan ejemplos de la relación entre la densidad y la resistencia para los concretos aislantes ligeros. La Fig. 15-4 muestra ejemplos para el concreto celular que contiene arena. Se pueden fabricar mezclas con resistencias fuera de los rangos mostrados variando las proporciones de las mezclas. Se obtendrían resistencias a 7 días comparables con las de 28 días usando cemento de alta resistencia a edad temprana. Las relaciones mostradas no son aplicables para los productos tratados con autoclave.

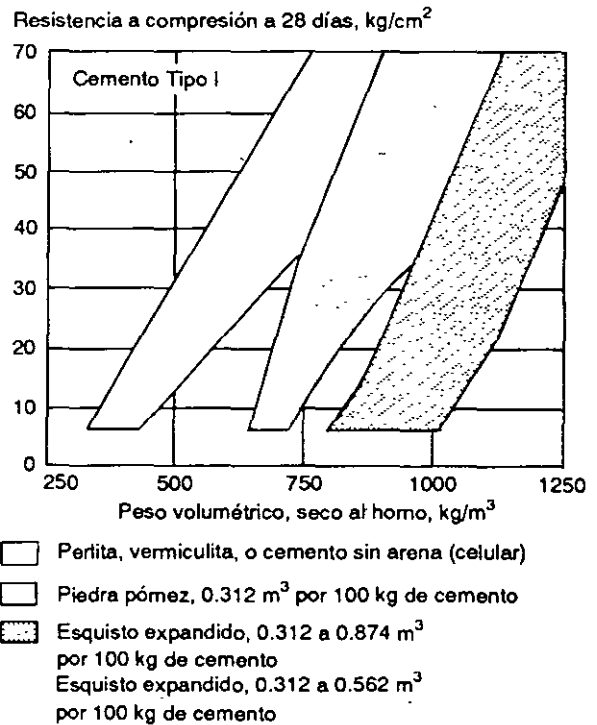


Figura 15-3. Relación aproximada entre el peso volumétrico seco en el horno y la resistencia a compresión de cilindros de  $15 \times 30 \text{ cm}$  probados en condiciones secas al aire para algunos concretos aislantes y de relleno. Para los concretos con perlita y vermiculita, las proporciones de la mezcla variaron desde  $0.187$  hasta  $0.624 \text{ m}^3$  de agregado por cada  $100 \text{ kg}$  de cemento. Todas las proporciones son volumétricas.

### Resistencia a la congelación y deshielo

Los concretos ligeros de baja densidad y de resistencia moderada normalmente no requieren soportar la exposición a la congelación-deshielo en condiciones de saturación. Por lo general, durante su servicio, se encuentran protegidos del clima. Consecuentemente, se han realizado muy pocas investigaciones relacionadas con su resistencia a la congelación-deshielo.

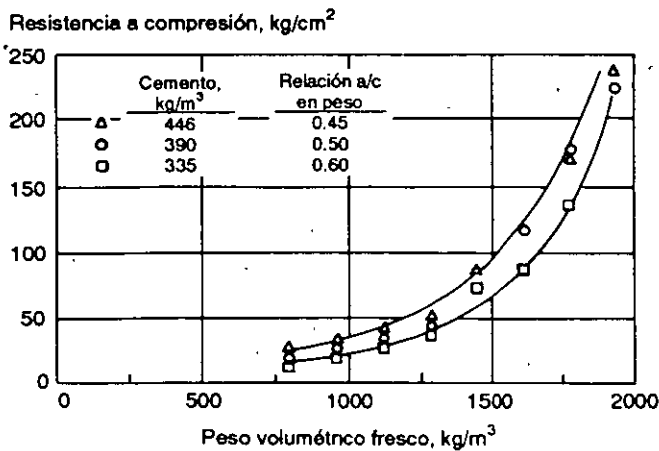


Figura 15-4. Peso volumétrico del concreto fresco contra resistencia a compresión de concretos celulares arenosos. La resistencia a compresión se determinó por medio de cilindros de 15 x 30 cm que tuvieron 21 días de curado en un cuarto 100% húmedo seguidos de 7 días al aire con una humedad relativa de 50%. Referencias 15-11 y 15-33.

### Contracción por secado

La contracción de los concretos ligeros de densidad baja o de resistencia moderada normalmente no es crítica cuando se les utiliza para aislamientos o rellenos; sin embargo, una contracción excesiva puede provocar combaduras. Para usos estructurales, la contracción deberá ser considerada. Los concretos celulares sin agregados y con curado húmedo tienen una elevada contracción por secado. Los concretos celulares fabricados con arena y con curado húmedo se pueden contraer desde 0.1 hasta 0.6%, dependiendo de la cantidad de arena usada. Los concretos celulares pasados por autoclave se contraen muy levemente al secarse. Los concretos aislantes fabricados con agregados de perlita o de piedra pómez se pueden contraer de 0.1 a 0.3% en seis meses de secado a una humedad relativa de 50%; los concretos con vermiculita se pueden contraer de 0.2 a 0.45% durante el mismo período. La contracción por secado de los concretos aislantes fabricados con escoria expandida o con esquistos expandidos varía desde aproximadamente 0.6 hasta 0.1% en seis meses.

### Juntas de expansión

Cuando se utilice concreto aislante en las cubiertas de azoteas, a menudo se especifica una junta de expansión de 2.5 cm en los pretiles y en todas las salientes de la azotea. Su propósito es el de dar alojamiento a la expansión causada por el calor del sol de manera que el concreto aislante se pueda expandir de manera independiente de la cubierta de azotea. Las juntas transversales de expansión se deberán colocar a un máximo de 30 m en cualquier dirección para una expansión térmica de 2.5 cm por cada 30 m lineales. Para formar las juntas generalmente se usa un material de fibra de vidrio que se comprime hasta la mitad de su espesor bajo un esfuerzo de 1.8 kg/cm<sup>2</sup>.

## CONCRETO DE GRAN PESO

El concreto de gran peso, como lo es el concreto de blindaje contra radiación, se produce con agregados especiales de gran peso y tiene una densidad de hasta aproximadamente 6400 kg/m<sup>3</sup>.

El concreto de gran peso se utiliza principalmente para blindajes contra radiaciones aunque también se le puede emplear para contrapesos y otras aplicaciones en que sea importante tener una densidad elevada. Como material de blindaje, el concreto de gran peso protege contra los efectos dañinos de los rayos X, rayos gamma y de la radiación de neutrones.\* La selección de un concreto para blindaje contra radiación dependerá de los requisitos de espacio y del tipo e intensidad de la radiación. Cuando las necesidades de espacio no sean importantes, el concreto de peso normal producirá generalmente el blindaje más económico; cuando el espacio esté limitado, el concreto de gran peso permitirá reducciones en el espesor del blindaje sin sacrificar su efectividad.

En general, el tipo e intensidad de la radiación determinarán los requisitos de densidad y contenido de agua del concreto para blindaje. La efectividad de un blindaje contra los rayos gamma es aproximadamente proporcional a la densidad del concreto, es decir, entre mayor peso tenga el concreto, más efectivo será el blindaje. Por otra parte, un blindaje efectivo contra la radiación de neutrones requiere tanto de elementos de gran peso como ligeros. El hidrógeno en el agua suministra un elemento ligero efectivo en los blindajes de concreto. Ciertos agregados contienen agua cristalizada, conocida como agua fija, como parte de su estructura. Es por esta razón que los agregados de gran peso con contenidos elevados de agua fija se utilizan a menudo si se tiene que atenuar la radiación de rayos gamma y de neutrones.

### Agregados de densidad elevada

Los agregados de densidad elevada como la baritina, ferrofósforo, goetita, hematita, ilmenita, limonita, magnetita, y las pepitas de punzonado de acero así como los perdigones de acero se utilizan para producir concretos de densidad elevada. Cuando se desee tener un contenido alto de agua fija, se podrán usar serpentina (que tiene un peso levemente mayor que los agregados de peso normal) o bauxita (consulte las normas ASTM C 637 y C 638).

La Tabla 15-3 proporciona pesos volumétricos, pesos específicos y porcentajes de agua fija para algunos de estos materiales. Los valores son una compilación de datos provenientes de una gran variedad de pruebas o proyectos reportados. Los perdigones y las pepitas de punzonado de acero se utilizan cuando se necesita un concreto con una densidad mayor que 4800 kg/m<sup>3</sup>.

En general, la selección de un agregado la determinan sus propiedades físicas, su disponibilidad y su costo. Los agregados de gran peso deberán estar razonablemente libres de material fino, aceite, y de sustancias extrañas que afecten la adherencia de la pasta a la partícula de agregado o la hidratación del cemento. Para una buena trabajabilidad, densidad máxima y

\* Consulte las Referencias 15-6 y 15-16.



**Tabla 15-3. Propiedades físicas típicas del concreto y de los agregados de gran peso**

Tipo de agregado	Agua fija* por ciento en peso	Peso específico relativo del agregado	Peso volumétrico del agregado, kg/m <sup>3</sup>	Densidad del concreto, kg/m <sup>3</sup>
Goetita	10-11	3.4-3.7	2082-2243	2883-3204
Limonita	8-9	3.4-4.0	2082-2403	2883-3364
Barita	0	4.0-4.6	2323-2563	3364-3684
Ilmenita	**	4.3-4.8	2563-2733	3524-3844
Hematita	**	4.9-5.3	2883-3204	3844-4165
Magnetita	**	4.2-5.2	2403-3044	3364-4165
Ferrofósforo	0	5.8-6.8	3204-4165	4085-5286
Perdigones y pepitas de punzonamiento de acero	0	6.2-7.8	3684-4645	4645-6087

\* Agua retenida o enlazada químicamente en los agregados.

\*\* No se encontraron datos de prueba disponibles. Los agregados se pueden combinar con limonita para producir contenidos de agua fija que varíen desde aproximadamente 0.5 hasta 5%.

economía, los agregados deberán ser de forma aproximadamente cúbica y libres de partículas planas o elongadas.

## Adiciones

En ocasiones se utilizan adiciones de boro como la colemanita, fritas de bórax con sílice y borocalcita para mejorar las propiedades de blindaje del concreto contra neutrones. Pueden afectar adversamente al fraguado y a la resistencia del concreto a edad temprana; por lo tanto, se deberán efectuar mezclas de prueba utilizando la adición bajo las condiciones de campo para determinar su conveniencia. Se pueden usar aditivos tales como la cal hidratada a presión con tamaños de arena gruesa para minimizar cualquier efecto retardante.

## Propiedades del concreto de gran peso

Las propiedades del concreto de gran peso, ya sea en estado fresco o endurecido, se pueden adecuar para satisfacer las condiciones de la obra y los requisitos de blindaje por medio de una selección apropiada de los materiales y de las proporciones de la mezcla.

A excepción de la densidad, las propiedades físicas del concreto de gran peso son similares a las del concreto normal. La resistencia es función de la relación agua-cemento; por lo tanto, para cualquier conjunto de materiales en particular, se pueden lograr resistencias comparables a las de los concretos de peso normal. Las densidades típicas de los concretos fabricados con algunos agregados de densidad elevada de mayor uso se muestran en la Tabla 15-3. Como cada blindaje contra radiación presenta requisitos especiales, se deberán llevar a cabo mezclas de prueba con los materiales y bajo las condiciones de obra a fin de determinar las proporciones adecuadas para la mezcla.

## Proporcionamiento, mezclado y colocación

Los procedimientos para seleccionar las proporciones de las mezclas de concreto de gran peso son los mismos que se utilizan para el concreto de peso normal. Sin embargo, en el Reporte ACI 211.1 aparece información adicional sobre las mezclas así como cálculos ilustrativos. A continuación

aparecen los métodos más comunes de mezclado y colocación de concreto de densidad elevada:

Los métodos *convencionales* de mezclado y colocación se utilizan frecuentemente, aunque se debe tener el cuidado especial de evitar sobrecargar el mezclador, especialmente con agregados muy pesados como lo son los perdigones de acero. Las mezclas deberán reducirse hasta aproximadamente el 50% de la capacidad estimada del mezclador. Como algunos agregados de gran peso son bastante desmenuzables, se deberá evitar el mezclado excesivo para prevenir que el rompimiento de los agregados ocasionen efectos adversos sobre la trabajabilidad y el sangrado.

Los métodos *con agregado precolocado* se pueden utilizar para colocar concretos de densidad normal y alta en zonas confinadas y alrededor de artículos insertos con el propósito de minimizar la segregación del agregado grueso, especialmente de perdigones o pepitas de punzonado de acero. El método también reduce la contracción por secado y produce concretos de composición y densidad uniforme. Los agregados gruesos se precolocan dentro de las cimbras y un mortero fabricado con cemento, arena y agua se bombea a través de tuberías para rellenar los vacíos entre agregados.

El *bombeo de concreto* de gran peso a través de tuberías puede ser ventajoso en los lugares donde el espacio se encuentre limitado. Los concretos pesados no pueden bombearse tan lejos como los concretos de peso normal debido a sus mayores densidades.

El *amasado* es un método en que se colocan 5 cm o más de mortero dentro de las cimbras y se cubren después con una capa de agregado grueso que se varilla o se vibra internamente en el mortero. Se debe tener el cuidado de asegurar una distribución uniforme del agregado a través del concreto.

## CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

Generalmente se define al concreto de alta resistencia como al concreto que tiene una resistencia a compresión de 420 kg/cm<sup>2</sup> ó mayor. En edificios se han llegado a usar concretos con resistencias de 1400 kg/cm<sup>2</sup>. La resistencia tradicionalmente especificada del concreto se basa en resultados de pruebas a 28 días. Sin embargo, en las estructuras de gran altura que requieren concreto de alta resistencia, el proceso de construcción es tal que los elementos estructurales de los pisos inferiores no se cargan totalmente durante períodos un año o más. Por esta razón, comúnmente se especifica

resistencias a compresión basadas en resultados de pruebas a 56 ó 90 días, a fin de obtener un importante ahorro en los costos de los materiales.

Con el uso de mezclas ricas de bajo revenimiento o de revenimiento nulo, se produce concreto de alta resistencia a compresión en forma rutinaria teniendo un control cuidadoso dentro de las plantas de concreto prefabricado y presforzado. Estas mezclas ásperas se colocan en el interior de cimbras robustamente erigidas y se consolidan usando una vibración prolongada o mediante métodos de golpeo. Sin embargo, el concreto colado en el lugar hace uso de cimbras más frágiles que no permiten los mismos procedimientos de compactación, y por lo tanto se necesitan concretos más trabajables para lograr la compactación deseada evitando así segregaciones y apanalamientos. Frecuentemente se agregan aditivos superplastificantes al concreto para producir mezclas trabajables y en ocasiones fluidas.

### Selección de los materiales

La producción de concretos de alta resistencia puede requerir o no de la adquisición de materiales especiales. El productor debe conocer los factores que afectan a la resistencia a compresión y saber cómo variar esos factores para lograr resultados óptimos. Al desarrollar el diseño de la mezcla, deberá analizarse por separado cada variable. Cuando se establezca un punto óptimo o cercano a éste, se deberá incorporar conforme se vayan estudiando las variables restantes. Entonces se desarrolla un diseño óptimo de la mezcla, teniendo en mente las ventajas en economía al usar materiales disponibles localmente.

**Cemento.** La selección del cemento portland para los concretos de alta resistencia no se debe basar exclusivamente en las pruebas de cubos de mortero, sino que también debe incluir resistencias comparativas de concretos a 28, 56 y 90 días. El cemento que dé la mayor resistencia a compresión del concreto a edades prolongadas (90 días), será sin lugar a dudas el preferible. El cemento a usar en concretos de alta resistencia deberá producir una resistencia mínima en cubos de mortero a 7 días de aproximadamente 295 kg/cm<sup>2</sup>.

Las mezclas de prueba deberán fabricarse con contenidos de cemento entre 380 y 560 kg por metro cúbico para cada cemento, dependiendo las cantidades de las resistencias deseadas. Además de los decrementos en el contenido de arena a medida que aumente el contenido de cemento, las mezclas de prueba deberán ser lo más parecidas posible teniendo un revenimiento entre 7.5 y 10 cm.

**Puzolanas.** La ceniza volante o el humo de sílice son frecuentemente de uso obligatorio al producir concretos de alta resistencia, pues el desarrollo de resistencia obtenido con estas puzolanas no se puede obtener con el mero uso de cantidades adicionales de cemento. Sin embargo, la ceniza volante o el humo de sílice deberá usarse como adición de la cantidad regular de cemento, y no como un sustituto parcial de éste. Comúnmente estas puzolanas se agregan en dosis de 5 a 20% del peso de cemento. La relación agua-cemento-más-puzolana deberá ajustarse de manera que una misma trabajabilidad se vuelva la base de comparación. Para cada conjunto de materiales existirá un contenido óptimo de cemento-más-puzolana en el cual la resistencia no continuará aumentando con cantidades mayores y la mezcla se volverá

demasiado pegajosa para poder ser manejada adecuadamente. La escoria de alto horno granulada molida también puede usarse en la producción de concretos de alta resistencia, aunque su uso con tal propósito es bajo en los Estados Unidos. También se pueden usar ciertos cementos mezclados en vez del cemento portland más la puzolana porque ya de por sí contienen esos materiales puzolánicos.

**Agregados.** Se debe dedicar una esmerada atención al tamaño, forma, textura superficial, mineralogía y limpieza de los agregados. Para cada fuente de agregado y nivel de resistencia del concreto existe un tamaño óptimo de agregado que producirá la mayor resistencia a compresión por kilogramo de cemento (Fig. 15-5). Para encontrar el tamaño óptimo, se deberán hacer mezclas de prueba con agregados

Eficiencia de resistencia, kg/cm<sup>2</sup> por kg de cemento

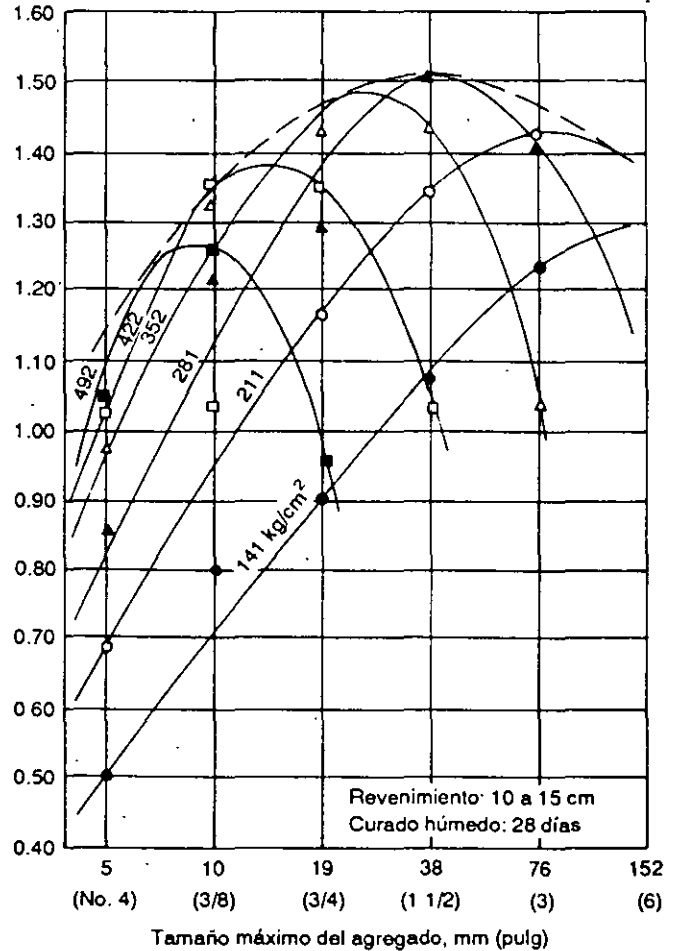


Figura 15-5. Tamaño máximo de agregado para la envolvente de eficiencia de resistencias. Referencia 15-7.

gruesos de 19 mm (3/4") y menores, y contenidos variables de cemento. Muchos estudios han descubierto que los agregados con tamaños máximos de 9.5 mm (3/8") a 12.7 mm (1/2") parecen dar una resistencia óptima. También se han usado con éxito tamaños máximos de 19 mm (3/4") y de 25.4 mm (1"). La Fig. 15-6 muestra el efecto que el tamaño máximo del agregado tiene sobre la resistencia a compresión del concreto a 28 y 90 días para varios tipos de concreto. El efecto del tamaño máximo en las mezclas ricas es más importante a 90 días que a 28 días.

Resistencia a compresión, kg/cm<sup>2</sup>

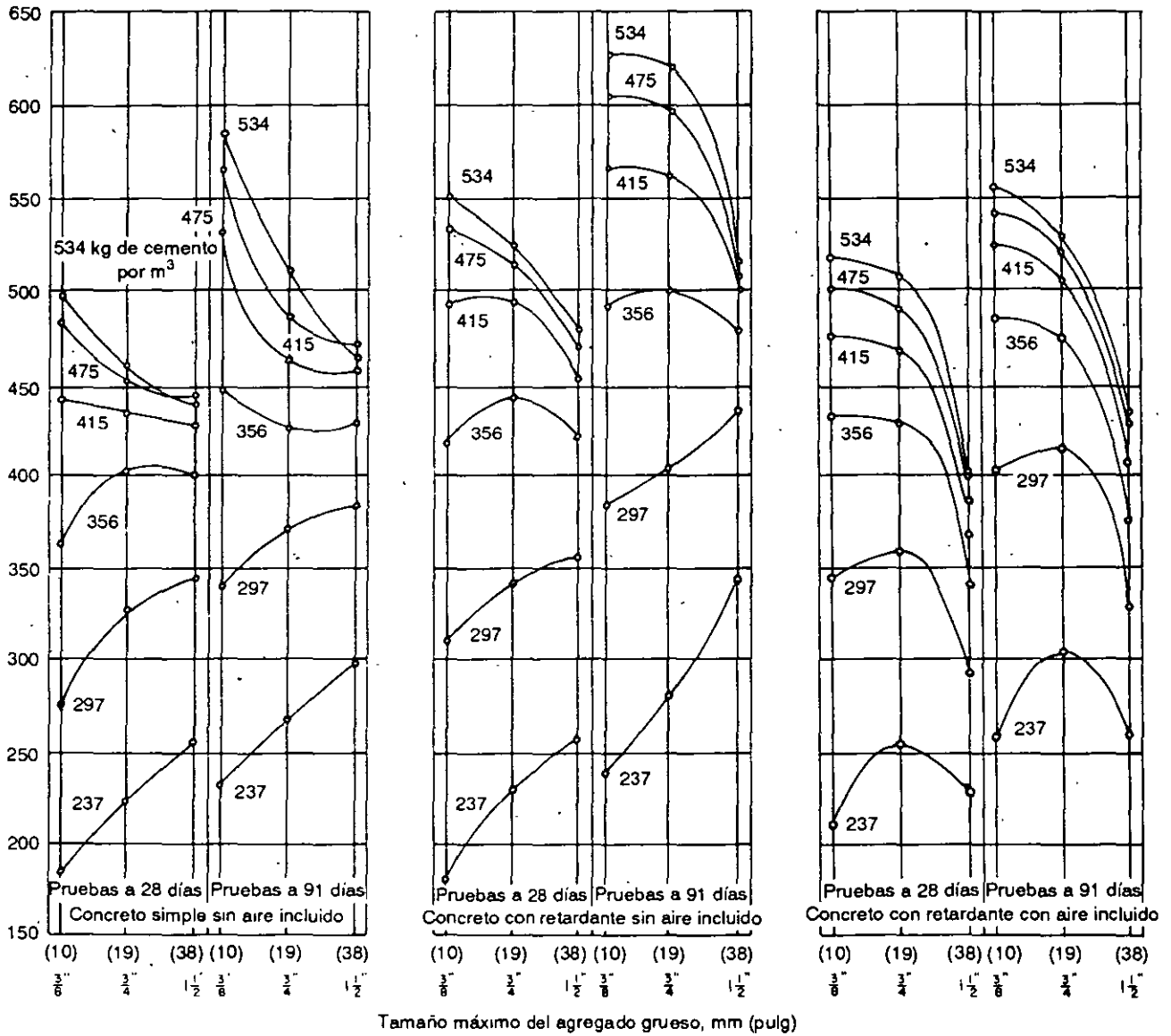


Figura 15-6. Efecto que tiene el tamaño del agregado grueso sobre la resistencia a compresión de concretos de distintos tipos. Referencia 15-5.

En los concretos de alta resistencia, la resistencia del mismo agregado y la unión o adhesión entre la pasta de cemento y el agregado se vuelven factores de importancia. Se ha demostrado mediante pruebas que los agregados triturados producen una mayor resistencia a compresión en el concreto que los agregados de grava natural usando el mismo tamaño de agregado y el mismo contenido de cemento, probablemente debido a una superior adherencia entre el agregado y la pasta cuando se emplean materiales ásperos, angulares y triturados.

Los agregados gruesos empleados en los concretos de alta resistencia deberán estar limpios, es decir, libres de recubrimientos perjudiciales de polvo y arcilla. La remoción del polvo es importante porque puede afectar la cantidad de finos y, en consecuencia, la demanda de agua. La arcilla puede afectar la unión entre la pasta y el agregado. El lavado de los agregados gruesos podría llegar a ser necesario.

La cantidad de agregado grueso en el concreto de alta resistencia deberá ser la máxima compatible con la trabajabilidad necesaria. A causa del alto porcentaje de

material cementante en el concreto de alta resistencia, es necesario y permisible un incremento en el contenido de agregado grueso por encima de los valores recomendados en las especificaciones para mezclas de resistencia normal.

Debido a la elevada cantidad de material cementante en los concretos de alta resistencia, el papel del agregado fino (arena) para otorgar trabajabilidad y buenas propiedades de acabado no es tan relevante como ocurre en las mezclas de concreto convencional. Se ha encontrado que las arenas con un módulo de finura (MF) de aproximadamente 3.0 - mismas que se consideran arenas gruesas - resultan satisfactorias para producir buenas trabajabilidades y resistencias a compresión elevadas. Las arenas más finas, digamos con un módulo de finura de 2.5 a 2.7, pueden producir mezclas pegajosas de menor resistencia.

**Aditivos.** La mayoría de los productores de concreto premezclado cree que el empleo de aditivos químicos tales como reductores de agua, retardantes reductores de agua reductores de agua de alto rango (superplastificantes) o combinaciones de éstos, es necesario para hacer un uso eficiente

de la gran cantidad de material cementante presente en el concreto de alta resistencia y ayudar a obtener la menor relación agua-cemento práctica. La eficiencia química del aditivo se debe evaluar comparando las resistencias obtenidas en mezclas de prueba. También ciertos factores tales como la compatibilidad entre el cemento y la puzolana, la reducción de agua, los tiempos de fraguado, la trabajabilidad y la dosificación de aditivo, así como el momento de efectuar la adición, se deberán determinar por medio de mezclas de prueba.

El uso de aditivos inclusores de aire no es necesario ni deseable en los concretos de alta resistencia que se encuentren protegidos de los efectos del medio ambiente, como ocurre en las columnas y muros de cortante interiores de edificios de gran altura. Sin embargo, para proyectos como puentes, pilas de concreto, estribos o estructuras para estacionamientos, en que se requiera durabilidad en un ambiente expuesto a la congelación y deshielo, la inclusión de aire será obligatoria. Como la inclusión de aire disminuye la resistencia de las mezclas de concreto ricas en cemento, puede ser necesaria la elaboración de pruebas para establecer los contenidos de aire óptimos.

## Proporcionamiento

El enfoque que consiste en realizar mezclas de prueba es el mejor para seleccionar los proporcionamientos de los concretos de alta resistencia. Para obtener una resistencia elevada es necesario usar la menor relación agua-cemento posible (generalmente de 0.30 a 0.40) así como un contenido elevado de cemento.

La resistencia unitaria en kilogramos por centímetro cuadrado que se obtenga por cada kilogramo de cemento utilizado en un metro cúbico de concreto se puede graficar como eficiencia de resistencia, tal como se muestra en la Fig. 15-5. La gráfica confirma que los agregados de menor tamaño máximo dan un uso más eficiente de cemento conforme se incrementa el contenido de cemento hasta aproximadamente 415 kg/m<sup>3</sup>.

El requerimiento de agua para el concreto se incrementa a medida que el contenido de agregado fino aumenta para cualquier tamaño de agregado grueso. Debido al elevado contenido de cemento de estos concretos, se puede mantener bajo el contenido de agregado fino. Sin embargo, aún con agregados de buena granulometría, una relación agua-cemento baja puede producir un concreto que no sea suficientemente trabajable. Si de por sí no se estuvieran usando superplastificantes, éste podría ser el momento para considerar su empleo. Un revenimiento de 10 cm dará por lo general una trabajabilidad adecuada.

Un diseño típico para una mezcla de concreto de 630 kg/cm<sup>2</sup> a 56 días de edad (560 kg/cm<sup>2</sup> a 28 días), que vaya a ser suministrado por varios premezcladores, podría ser el siguiente:

Cemento Tipo I	502 kg/m <sup>3</sup>
Ceniza volante	59 kg/m <sup>3</sup>
Arena	629 kg/m <sup>3</sup>
Piedra, máximo 12.7 mm (1/2")	1015 kg/m <sup>3</sup>
Agua, neto	188 kg/m <sup>3</sup>
Reductor de agua - retardante	1470 cc/m <sup>3</sup>

**Tabla 15-4. Ejemplo de una mezcla de concreto de alta resistencia con humo de sílice**

Proporciones y características de la mezcla		
Cemento Tipo I		593 kg/m <sup>3</sup>
Aditivo de humo de sílice*		119 kg/m <sup>3</sup>
Arena (Módulo de Finura: 2.90)		537 kg/m <sup>3</sup>
Caliza (Tamaño máximo: 12.7 mm (1/2"))		998 kg/m <sup>3</sup>
Agua		158 kg/m <sup>3</sup>
Relación agua-(cemento + humo de sílice)		0.22
Revenimiento (promedio)		12 cm
Contenido de aire (promedio)		1.5%
Edad, días	Resistencia a la compresión, kg/cm <sup>2</sup> **	Resistencia a la flexión, kg/cm <sup>2</sup>
0.5	440	—
1	663	—
3	795	114
7	965	126
14	1049	—
28	1137	145
60	1143	—
90	1174	—
128	1267	—
365	1291	—

\* Incluye un reductor de agua de alto rango.

\*\* Cilindros de 10 x 20 cm, con curado húmedo.

Adaptada de la Referencia 15-47.

En la Tabla 15-4 se ilustra un ejemplo de mezcla de concreto de alta resistencia que utiliza humo de sílice. Los niveles de resistencia que se llegan a desarrollar en las mezclas de prueba de laboratorio pueden ser difíciles de lograr en el campo. Por lo tanto todas las mezclas que se proponga emplear deberán probarse con mezclas de tamaño normal bajo las condiciones típicas de la obra.

## Colocación, consolidación y curado

Deberá existir una estrecha colaboración entre el contratista y el productor de concreto con el propósito de descargar rápidamente al concreto después de llegar al sitio de colado. Los ajustes finales al concreto deberán ser supervisados por los técnicos del productor de concreto en la obra, por un laboratorio de concreto, o por algún consultor familiarizado con la ejecución y uso del concreto de alta resistencia.

Se deberán eliminar los retrasos en la entrega y en la colocación y, en ocasiones, deberá ser necesario reducir los tamaños de las mezclas si los procedimientos de colocación son más lentos de lo anticipado. Se deberá ejercer una fuerte vigilancia en la obra para controlar cualquier adición de agua para retemplar. El contratista deberá estar listo para recibir el concreto y comprender las consecuencias que acarrearía el hecho de rebasar el revenimiento y la relación agua-cemento especificados.

La consolidación es de gran importancia para lograr las resistencias potenciales en los concretos de alta resistencia. Después de su colocación en las cimbras, el concreto deberá vibrarse lo más rápido que sea posible. Los vibradores de alta frecuencia deberán ser lo bastante pequeños como para dejar el suficiente espacio libre entre

la cabeza del vibrador y el acero de refuerzo. Demasiada vibración en una mezcla trabajable de concreto de resistencia normal a menudo produce segregación, pérdida de aire incluido, o ambos efectos. El concreto de alta resistencia, por su parte, por lo general será relativamente áspero y contendrá poco aire. En consecuencia, los supervisores deberán estar más interesados en la falta de vibración antes que en un vibrado excesivo.

El curado es de importancia suprema para que un concreto de alta resistencia alcance su resistencia potencial. Es preciso suministrar la humedad adecuada así como las condiciones favorables de temperatura durante un periodo prolongado, particularmente cuando se especifiquen resistencias para el concreto a 56 ó a 90 días.

## Control de calidad

Se necesita contar con un programa completo de control de calidad tanto en planta como en obra para garantizar una producción y colocación convenientes de este tipo de concreto. La inspección de las operaciones, desde el apilamiento del agregado hasta la terminación del curado, es de gran importancia. Se necesita contar con un control de producción más estricto que el que normalmente se tenga en la mayoría de proyectos. También los muestreos y pruebas de rutina de todos los materiales serán particularmente necesarios para controlar la uniformidad del concreto.

Al probar concretos de alta resistencia, se requerirá de ciertos cambios y de una mayor atención particular. Por ejemplo, los moldes cilíndricos de cartón se deberán reemplazar por moldes reusables de acero o plástico o por moldes desechables de hojalata porque podrían ser causa de menores resistencias en las pruebas. El cabeceo de los cilindros se deberá efectuar con mucho cuidado utilizando únicamente compuestos de cabeceo de alta resistencia, según la norma ASTM C 670.

El Reglamento de Construcciones ACI 318 exige que la resistencia promedio de todos los conjuntos de tres pruebas consecutivas de concreto entregado en un proyecto iguale o rebase el valor especificado, sin que ningún ensayo individual (el promedio de dos cilindros) caiga en más de  $35 \text{ kg/cm}^2$  por debajo de ese valor. Para satisfacer estos requisitos, es necesario aspirar a una resistencia promedio mayor que la mínima especificada. El nivel de la resistencia de diseño dependerá del control que se ejerza sobre las variables que influyen en la resistencia del concreto. Entre menos efectivo sea este control, mayor será la resistencia promedio necesaria para satisfacer los requisitos dados en las especificaciones.

La producción de concreto con una resistencia alta a compresión implica obtener una variación baja en los resultados de las pruebas, porque en la mayoría de los casos no será posible producir concreto con una resistencia promedio significativamente mayor que la resistencia especificada. La menor desviación estándar que se necesita en los proyectos con concretos de alta resistencia, sólo se obtendrá mediante una estricta vigilancia en todos los aspectos del control de calidad por parte del productor y de las pruebas para verificar la calidad por parte del laboratorio.\*

## CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA A EDAD TEMPRANA

El concreto de alta resistencia a edad temprana es un concreto que alcanza su resistencia especificada a una edad más temprana que la que requiere un concreto normal. El período en el que se tenga que obtener una resistencia especificada puede variar desde unas cuantas horas (e incluso minutos) hasta varios días. Se puede lograr un concreto de alta resistencia a edad temprana haciendo uso de los ingredientes y de las prácticas de colado tradicionales para el concreto, aunque a veces se necesitan materiales o técnicas especiales.

La alta resistencia temprana se puede obtener por medio de uno o de alguna combinación de los puntos siguientes, dependiendo de la edad a la cual la resistencia especificada se tenga que alcanzar y de las condiciones de la obra:

1. El uso de cemento de alta resistencia a edad temprana Tipo III
2. Un contenido elevado de cemento ( $356$  a  $593 \text{ kg/m}^3$ )
3. Una baja relación agua-cemento ( $0.20$  a  $0.45$  en peso)
4. Una mayor temperatura del concreto fresco
5. Una mayor temperatura de curado (consulte el Capítulo 11)
6. El uso de aditivos químicos
7. El uso de humo de sílice (vea la Tabla 15-4)
8. Un curado al vapor o en autoclave (consulte el Capítulo 10)
9. Usando aislamientos para retener el calor de hidratación
10. El uso de cementos de fraguado regulado o de otros cementos especiales

El concreto de alta resistencia a edad temprana se utiliza en los concretos presforzados para permitir que se puedan cargar rápidamente; en concretos prefabricados para tener una rápida producción de elementos; en las construcciones de alta velocidad coladas en el lugar; para contar con una reutilización rápida de las cimbras; para las construcciones en climas fríos; para reparaciones rápidas con el propósito de reducir los periodos de paralización del tránsito; para pavimentaciones rápidas de caminos y para varios otros usos.

En las pavimentaciones rápidas de caminos, el uso de mezclas de alta resistencia a edades tempranas permite que se puedan abrir al tránsito 24 horas después de haber colado. Una mezcla de concreto rápido que se colocó en una capa superpuesta para una autopista consistió de  $380 \text{ kg}$  de cemento Tipo III,  $42 \text{ kg}$  de ceniza volante Clase C,  $6.5\%$  de aire, de un aditivo reductor de agua y de una relación agua-cemento-más-ceniza volante igual a  $0.4$ . Los datos de la resistencia de este concreto, con un revenimiento igual a  $4 \text{ cm}$ , fueron los que siguen:\*\*

\* Para mayor información, consulte las Referencias 15-8, 15-14, 15-18, 15-23, 15-42, 15-50 y 15-57.

\*\* Referencia 15-57.

Edad	Resistencia a la compresión, kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia a la flexión (carga en el de centro) kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia adherencia, kg/cm <sup>2</sup>
4 horas	18	9	8
6 horas	72	20	11
8 horas	132	28	14
12 horas	179	34	16
18 horas	205	40	18
24 horas	244	42	21
7 días	349	51	22
14 días	372	58	23
28 días	415	58	25

Varios departamentos estatales de carreteras de E.E.U.U. han empleado para bachear concretos de alta resistencia a edad temprana capaces de soportar el tránsito en 4 horas. Las mezclas tenían una relación agua-cemento baja y contenían de 326 a 445 kg de cemento Tipo III además de un acelerante. Se utilizó aislamiento para retener el calor de hidratación.†

## CONCRETO MASIVO

El Comité ACI 116 define al concreto masivo como "Cualquier volumen cuantioso de concreto colado en el lugar con dimensiones lo suficientemente grandes que obliguen a tomar medidas para enfrentar la generación de calor y el cambio volumétrico que le acompaña a fin de minimizar los agrietamientos". Como concreto masivo no sólo se incluye a los concretos con bajo contenido de cemento que se utilizan en las presas y en otras estructuras masivas, sino también a los concretos con un contenido de cemento moderado a alto usados en miembros estructurales que requieren de la adopción de consideraciones especiales para manejar el calor de hidratación y el aumento de temperatura.

En el concreto masivo, el aumento de temperatura es

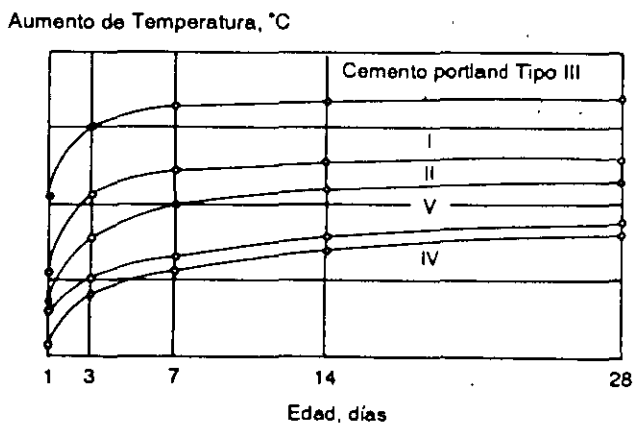


Figura 15-7. Aumento de temperatura para concreto masivo con agregado de tamaño máximo de 11.4 cm (4 1/2") y con 223 kg de cemento por metro cúbico. Los especímenes fueron cilindros de 43 x 43 cm, sellados y curados en cuartos con calorímetro adiabático. El aumento de temperatura para concretos con mayores contenidos de cemento sería superior en forma proporcional. Referencia 15-29.

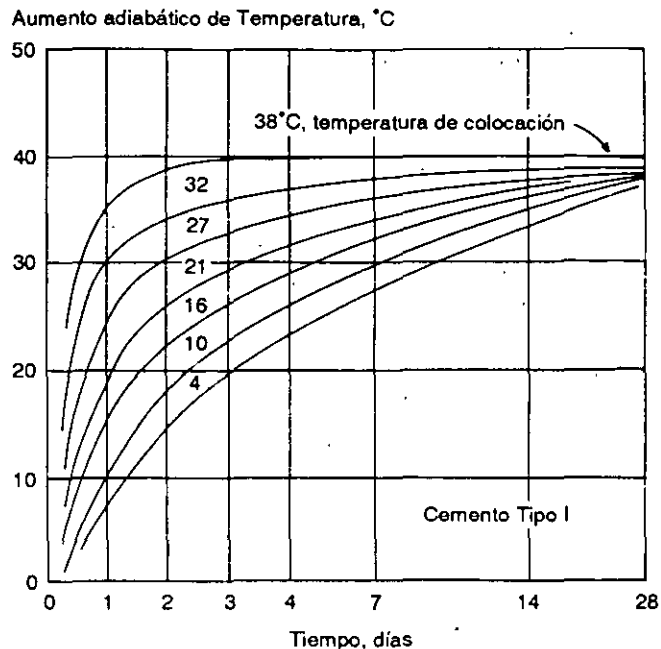


Figura 15-8. Efecto de la temperatura de colado del concreto sobre el aumento de temperatura en un concreto masivo con 223 kg de cemento por metro cúbico. Las temperaturas superiores de colado aceleran el aumento de temperatura. Referencia 15-52.

provocado por el calor de hidratación, tal como se muestra en la Fig. 15-7. A medida que el concreto del interior aumenta su temperatura, el concreto de la superficie puede estar enfriándose y contrayéndose. Esto produce esfuerzos de tensión y grietas en la superficie si el diferencial de temperatura es demasiado grande. El ancho y la profundidad de las grietas dependerán del gradiente de temperatura entre el concreto caliente del interior y la superficie de concreto más fría.

No se dispone de un tamaño de elemento definido más allá del cual se deba clasificar una estructura de concreto como concreto masivo. Sin embargo, el Reporte del Comité ACI 211.1 señala que "Muchos elementos estructurales grandes pueden ser lo suficientemente masivos como para considerar la generación de calor, en particular cuando las dimensiones transversales mínimas de un elemento sólido de concreto se acerquen o sobrepasen de 60 a 90 cm o cuando se hayan considerado contenidos de cemento superiores a 355 kg por metro cúbico". El aumento de temperatura en el concreto masivo se relaciona con la temperatura inicial del concreto (Fig. 15-8), con las temperaturas ambientales, con el tamaño del elemento de concreto (relación volumen a superficie) y con la cantidad de refuerzo. Los elementos de concreto pequeños son de poco interés pues el calor generado se disipa rápidamente.

Para evitar agrietamientos en los concretos masivos para presas y para otras estructuras sin reforzar que tengan resistencias a compresión relativamente bajas, no se deberá per-

† Consulte las Referencias 15-3, 15-47, 15-57, 15-58 y la norma ASTM C 928 para mayor información.

\* Referencia 15-51, página 10.

mitir que su temperatura interna se eleve en más de 11 a 14°C por encima de la temperatura ambiental media anual.\* El desarrollo de la temperatura interna del concreto se puede controlar usando (1) un contenido bajo de cemento - 120 a 270 kg por metro cúbico, un tamaño grande de agregado - 76.2 mm (3") a 152.4 mm (6"), y un contenido elevado de agregado grueso - hasta 80% de la cantidad total de agregado; (2) cemento portland de bajo calor de hidratación o cemento mezclado; (3) puzolanas - el calor de hidratación de la puzolana es aproximadamente 25 a 50% el del cemento; (4) reducciones en la temperatura inicial del concreto hasta aproximadamente 10°C enfriando los ingredientes del concreto - consulte el Capítulo 11; (5) enfriando al concreto por medio de la inserción de tuberías de enfriamiento; (6) cimbras de acero para tener una rápida disipación de calor; (7) curado con agua; y por último (8) coladas pequeñas —1.5 m ó menos— durante la colocación.

En las estructuras masivas que tengan una relación volumen-superficie grande, con la siguiente ecuación se puede obtener una estimación del aumento de temperatura adiabática:

$$T = \frac{CH}{S}$$

donde

- T = aumento de temperatura en el concreto, en grados Centígrados, provocado por la generación de calor del cemento en condiciones adiabáticas
- C = proporción de cemento en el concreto, en peso
- H = generación de calor debida a la hidratación del cemento, kCal por kilogramo
- S = calor específico del concreto, kCal por kilogramo por grado Centígrado

Ejemplo: Suponga un concreto que pesa 2373 kg/m<sup>3</sup> y que contiene 178 kg de cemento portland Tipo II y 59 kg de puzolana por metro cúbico. Suponga que el calor de

kCal por kg de cemento portland

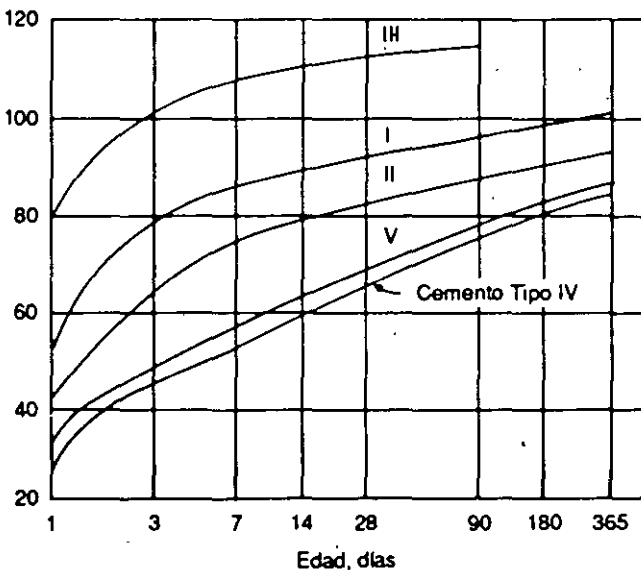


Figura 15-9. Curvas típicas de calor de hidratación para diversos tipos de cemento. Referencias 15-9 y 15-56.

hidratación de la puzolana es igual a 40% del que tiene el cemento.

$$C = \frac{178 + (0.4 \times 59)}{2373} = 0.085$$

De la Fig. 15-9, el calor de hidratación del cemento, H, a siete días es igual a 76 kCal por kg. Suponga que el calor específico del concreto, S, es igual a 0.24 (el calor específico del concreto varía de 0.20 a 0.28 kCal por kg por grado Centígrado). El aumento de temperatura sería:

$$T = \frac{CH}{S} = \frac{0.085 \times 76}{0.24} = 27^\circ\text{C a 7 días}$$

Por lo tanto, si el concreto se coloca a 21°C, se puede esperar que tenga una temperatura a 7 días de aproximadamente 48°C (21° + 27°C) en el interior del elemento si no hay pérdida de calor.\* Un diferencial de temperatura de 27°C en estructuras masivas (suponiendo que la temperatura superficial caiga hasta 21°C) es suficiente para producir agrietamientos.\*\*

El concreto reforzado estructural masivo con contenidos elevados de cemento (300 a 600 kg/m<sup>3</sup>) no puede hacer uso de muchas de las técnicas de colado ni de muchos de los factores de control antes mencionados para mantener las temperaturas bajas a fin de controlar los agrietamientos. Para estos concretos (usados a menudo en losas de cimentación y en centrales de energía), una buena técnica consiste en (1) colar la sección completa de concreto en una vaciada continua, (2) evitar restricciones externas de los elementos de concreto adyacentes, y (3) controlar las deformaciones térmicas internas evitando que el concreto experimente un diferencial de temperatura excesivo entre el concreto interno y la superficie. Esto se hace manteniendo caliente al concreto por medio de aislamientos (toldos, mantas acolchadas o arena sobre láminas de polietileno). La experiencia y algunos estudios han mostrado que para evitar los agrietamientos superficiales, el diferencial máximo de temperatura entre el concreto del interior y el del exterior no debe sobrepasar 20°C. También se reducen los agrietamientos internos.† Algunas fuentes indican que el diferencial máximo de temperatura (MTD) para un concreto que contenga granito o caliza (es decir, agregados de bajo coeficiente térmico) deberá ser de 25 y 31°C, respectivamente.†† Sin embargo, se debe presuponer un diferencial máximo de temperatura de 20°C, a no ser que pruebas con la mezcla real de concreto por usar demuestren que otros valores de diferenciales máximos de temperatura sean permisibles.

Si se reduce el diferencial de temperatura a 20°C ó menos, el concreto se enfriará lentamente hasta alcanzar la temperatura ambiental con poco o ningún agrietamiento superficial siempre y cuando no se encuentre restringido por

\* Referencias 15-9 y 15-56.

\*\* El aumento de temperatura también se puede calcular por medio del uso de las ecuaciones y tablas dadas en las Referencias 15-46 y 15-52, las cuales tienen en cuenta el efecto que las relaciones volumen-a-superficie y las temperaturas de colado tienen sobre el aumento de temperatura.

† Referencias 15-21 y 15-22.

†† Referencia 15-31.

refuerzo continuo que atraviese la superficie de contacto de secciones adyacentes u opuestas de concreto endurecido. El concreto restringido se agrietará debido a la posible contracción térmica después del enfriamiento. El concreto sin restringir no se agrietará si se siguen los procedimientos adecuados y si se revisa y controla el diferencial de temperatura. Si existe cierto interés respecto a los diferenciales de temperatura excesivos en un elemento de concreto, se deberá considerar al elemento como de concreto masivo y se deberán tomar las precauciones apropiadas.

La Fig. 15-10 ilustra la relación entre el aumento de temperatura, enfriamiento y diferenciales de temperatura para una sección de concreto masivo. Como se puede observar, si se retiran demasiado pronto las cimbras (que en este caso brindan un aislamiento adecuado), se presentarán agrietamientos una vez que la diferencia entre las temperaturas del concreto del interior y de la superficie rebasa el diferencial crítico de temperatura de 20°C.

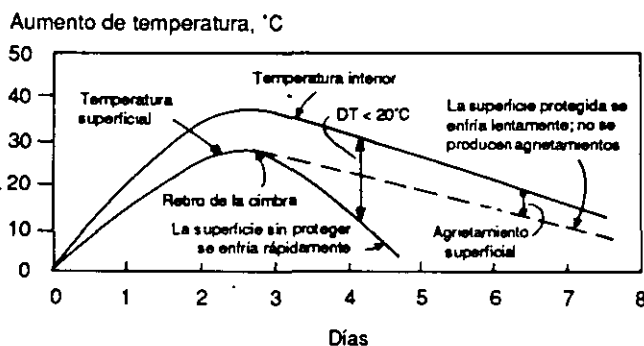


Figura 15-10. Potencial de agrietamiento en la superficie después de retirar la cimbra, suponiendo un diferencial crítico de temperatura,  $D_t$ , de 20°C. No deberá ocurrir agrietamiento alguno si el concreto se enfría lentamente y si  $D_t$  es menor que 20°C. Referencias 15-22 y 15-56.

El aumento máximo de temperatura se puede estimar mediante los métodos antes mencionados o por medio de una aproximación si el concreto contiene de 300 a 600 kg de cemento por metro cúbico y si la dimensión mínima del elemento es de 1.80 m ó mayor. Esta aproximación (bajo condiciones normales, no adiabáticas) sería de 12°C por cada 100 kg de cemento por metro cúbico. Por ejemplo, la temperatura máxima de tal elemento hecho con un concreto que contenga 534 kg de cemento por metro cúbico y colado a 16°C sería de aproximadamente:

$$16^{\circ}\text{C} + (12^{\circ}\text{C} \times \frac{534}{100}) = 80^{\circ}\text{C}$$

La baja velocidad de intercambio de calor entre el concreto y sus alrededores es provocada por su baja conductividad térmica. El calor escapa del concreto a una velocidad que es inversamente proporcional al cuadrado de su dimensión mínima. A un muro de 15 cm de espesor que se esté enfriando por ambos lados le tomará aproximadamente 1 1/2 hora para disipar el 95% de su calor desarrollado. A un muro de 1.50 m

de espesor le llevará toda una semana disipar la misma cantidad de calor desarrollado.\*

## CONCRETO CON AGREGADO PRECOLOCADO

El concreto con agregado precolocado es un concreto que se produce colocando el agregado grueso dentro de una cimbra y posteriormente inyectando un mortero cemento-arena, normalmente con aditivos, para rellenar los vacíos. Las propiedades del concreto resultante son similares a las de un concreto comparable colocado por medio de métodos convencionales; sin embargo, se puede esperar una contracción por secado y térmica considerablemente inferior debido al contacto punta-a-punta entre las partículas del agregado.

Los agregados gruesos deberán satisfacer los requisitos de la norma ASTM C 33. Además, la mayoría de las especificaciones limita los tamaños máximos y mínimos; por ejemplo, 76.2 mm (3") máximo y 12.7 mm (1/2") mínimo. Generalmente los agregados están graduados para producir un contenido de vacíos de 35 a 40%. El agregado fino que se emplea en el mortero por lo general está graduado para tener un módulo de finura de entre 1.2 y 2.0, pasando casi todo el material a través de la malla de 1.25 mm (No. 16).

Aunque el método del agregado precolocado se ha empleado principalmente en trabajos de restauración y en la construcción de blindajes para reactores, estribos de puentes y estructuras bajo el agua, también ha sido usado en edificios para lograr efectos arquitectónicos poco comunes. Como las cimbras se llenan completamente con agregado grueso antes de inyectar el mortero, se obtiene un acabado denso y uniforme con agregado expuesto al limpiar la superficie con chorro de arena, o al labrarla, o cuando se le trata con un retardante y se le cepilla con cerdas de alambre a edad temprana.

Las pruebas para el concreto con agregado precolocado se describen en las normas ASTM C 937 a C 943. El concreto con agregado precolocado se trata con más detalle en la guía del Comité ACI 304, "Guide for Measuring, Transporting, and Placing Concrete" (Guía para medir, transportar y colocar concreto).

## CONCRETO DE REVENIMIENTO NULO

El Comité ACI 116 define al concreto de revenimiento nulo como aquel concreto cuya consistencia corresponde a la de un revenimiento de 0.5 cm o menor. Tal concreto, a pesar de ser muy seco, deberá ser lo suficientemente trabajable para poder colocarse y consolidarse con el equipo que se utilice en la obra. Los métodos a los que aquí se hace referencia no se aplican forzosamente a las mezclas para unidades de mampostería de concreto o para compactación por medio de técnicas de rotación.

\* Referencia 15-26, página 26. Para mayor información sobre concreto masivo consulte las Referencias 15-4, 15-9, 15-15, 15-21, 15-22, 15-26, 15-31, 15-41, 15-46, 15-52, 15-53, 15-56 y 15-59.



Muchas de las leyes básicas que rigen las propiedades de los concretos de revenimientos mayores se aplican al concreto de revenimiento nulo. Por ejemplo, las propiedades del concreto endurecido dependen principalmente de la relación agua-cemento, siempre y cuando la consolidación del concreto haya sido satisfactoria.

La medición de la consistencia de los concretos de revenimiento nulo es diferente de la de los concretos de revenimientos mayores porque el uso del cono de revenimiento resulta poco práctico para consistencias más secas. En el Reporte ACI 211.3, "Standard Practice for Selecting Proportions for No-Slump Concrete" (Práctica estándar para seleccionar los proporcionamientos para concretos de revenimiento nulo), se describen tres métodos para medir la consistencia de los concretos de revenimiento nulo, a saber: el aparato Vebe, la prueba del factor de compactación, y la mesa de caída Thaulow. A falta del equipo antes mencionado, la trabajabilidad se puede juzgar de manera adecuada por medio de una mezcla de prueba que se cuele y se compacte con el equipo y con los métodos que se vayan a utilizar en el trabajo.

Se recomienda la inclusión intencional de aire en los concretos de revenimiento nulo cuando se necesite una cierta durabilidad. La cantidad de aditivo inclusor de aire que normalmente se recomienda para los concretos de revenimientos mayores no producirá contenidos de aire tan altos en los concretos de revenimiento nulo como los de los concretos con revenimientos mayores. No obstante, el menor volumen de aire incluido por lo general proporcionará una durabilidad adecuada a los concretos de revenimiento nulo, es decir, éstos contendrán una cantidad suficiente de vacíos de aire. Esta divergencia respecto a los métodos usuales para diseñar y controlar el aire incluido será necesaria para los concretos de revenimiento nulo.

Si desea consultar una publicación en que se expongan los requisitos de agua y el cálculo de mezclas de prueba, vea el Reporte ACI 211.3.

## CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS

El concreto compactado con rodillos es un concreto pobre, de revenimiento nulo, casi seco, que se compacta en el lugar por medio de equipo con rodillos vibratorios o de consolidación de placa (Fig. 15-11). Se trata de una mezcla de agregado, cemento y agua; también se han utilizado materiales cementantes suplementarios tales como la ceniza volante. Los contenidos de cemento varían desde 60 hasta 360 kg por metro cúbico. El mezclado se realiza por medio de mezcladores convencionales, o en ciertas ocasiones en camiones mezcladores de tambor basculante.

El concreto compactado con rodillos se ha seguido desarrollando como un método rápido y económico para construir grandes presas de gravedad, en proyectos de pavimentos no carreteros tales como instalaciones de manejo de contenedores y áreas para clasificación de troncos en aserraderos, en pistas de rodamiento de aeropuertos, en caminos secundarios, y como sub-bases para pavimentos convencionales de carreteras y calles. Se han obtenido resistencias a compresión de 70 a 316 kg/cm<sup>2</sup> en los concretos compactados con rodillos

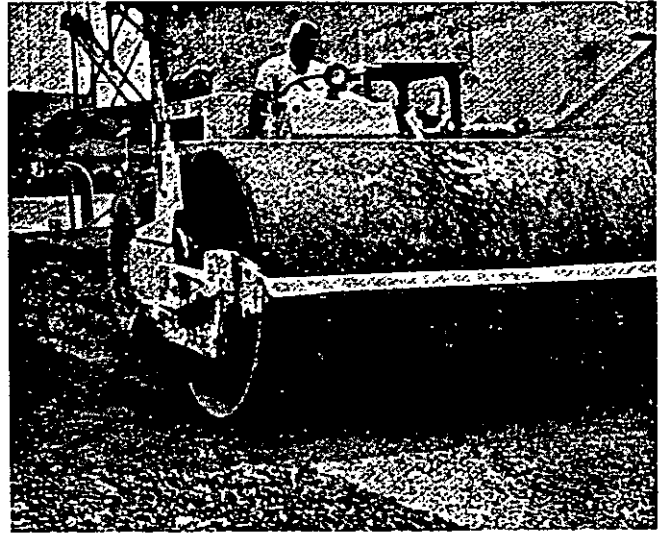


Figura 15-11. El concreto compactado con rodillos se puede compactar mediante el uso de rodillos vibratorios.

que han sido empleados en los proyectos para presas. Los proyectos de pavimentación han tenido resistencias a compresión de diseño de aproximadamente 350 kg/cm<sup>2</sup> con resistencias de campo que varían desde 350 hasta 700 kg/cm<sup>2</sup>.\*

El concreto compactado con rodillos se debe colocar en capas lo suficientemente delgadas que permitan una compactación completa mediante el equipo de construcción disponible. Los espesores de capa óptimos, mismos que varían desde 20 hasta 30 cm se colocan y se consolidan con equipos convencionales de movimiento de tierras o de pavimentación (conformadoras, aplanadoras, y demás). En los proyectos donde se necesiten capas múltiples, es esencial la adopción de un procedimiento de construcción que asegure una adherencia correcta entre las capas. El método que se use para tender el concreto compactado con rodillos constituirá un factor fundamental para controlar la producción.

En el Reporte ACI 207.5 se discuten las proporciones de las mezclas, las propiedades físicas y los procedimientos de mezclado y construcción de los concretos compactados con rodillos que se vayan a utilizar para colados masivos.

## SUELO-CEMENTO

El suelo-cemento es una mezcla de suelo pulverizado o de material granular, cemento y agua. Algunos otros términos con los que se conoce al suelo-cemento son "base o sub-base tratada con cemento", "estabilización con cemento", "suelo modificado con cemento", y "agregado tratado con cemento". La mezcla se compacta para obtener una densidad alta, y a medida que el cemento se hidrata, el material se vuelve duro y durable.

\* Referencia 15-55.

El suelo-cemento se usa principalmente como capa de base para caminos, calles, aeropuertos y áreas para estacionamiento. Normalmente, se coloca sobre esa base una capa de rodamiento bituminosa o de concreto hidráulico. El suelo-cemento también se emplea para sub-bases de pavimentos de concreto, para la defensa de taludes en presas y terraplenes de tierra, para revestimientos de presas y acequias y para la estabilización de cimentaciones.

El suelo que se use en el suelo-cemento puede ser casi cualquier combinación de arena, limo, arcilla, y gravas naturales o piedras trituradas. Los materiales granulares locales (como las escorias volcánicas, el caliche y la roca caliza) junto con una gran variedad de materiales de desecho (como las escorias, las cenizas y las ceraduras procedentes de canteras y de minas de grava) se pueden utilizar para producir suelo-cemento. Se pueden reciclar, para producir también suelo-cemento, los caminos gastados de base granular, con o sin sus superficies bituminosas.

El suelo-cemento deberá contener una cantidad suficiente de cemento portland que le permita resistir el deterioro de los ciclos de congelación-deshielo y de humedecimiento-secado, así como la humedad suficiente para lograr una compactación máxima. Los contenidos de cemento varían desde 80 hasta 250 kg por metro cúbico. El suelo, el cemento y el agua se pueden mezclar en una planta mezcladora central o en el lugar utilizando mezcladores de eje transversal o viajeras. La mezcla se coloca y se compacta con equipo convencional para construcción de caminos hasta un 96 a 100% de su densidad máxima (norma ASTM D 558).

Dependiendo del suelo que se utilice, las resistencias a compresión a 7 días, de los especímenes saturados con el contenido mínimo de cemento que satisfaga los criterios para el suelo-cemento, por lo general, variarán entre 21 y 56 kg/cm<sup>2</sup>. El suelo-cemento continúa desarrollando su resistencia con el paso del tiempo; se han obtenido resistencias a compresión mayores que 175 kg/cm<sup>2</sup> luego de muchos años de servicio.\*

## CONCRETO LANZADO

El concreto lanzado es un mortero o un concreto que se arroja neumáticamente sobre una superficie a gran velocidad (Fig 15-12). Desarrollado en 1911, no ha variado en concepto hasta nuestros días. La mezcla relativamente seca se consolida con la fuerza del impacto y se puede colocar sobre superficies verticales u horizontales sin desprenderse. El concreto lanzado se utiliza tanto para construcciones nuevas como para obras de reparación. Su empleo se adapta especialmente para estructuras de concreto delgadas o de forma curva y para reparaciones superficiales. Las propiedades del concreto lanzado endurecido dependen mucho de quien haya sido su operador. El concreto lanzado tiene un peso volumétrico y una resistencia a compresión similares a los de los concretos de resistencia normal y de alta resistencia. Se pueden usar tamaños de agregado hasta de 19 mm (3/4").

El concreto lanzado se puede producir mediante dos procesos: seco o húmedo. En el proceso seco una premezcla de cemento y agregado húmedo es propulsada a través de una manguera por medio de aire comprimido hasta una boquilla. En ella se agrega el agua a la mezcla de cemento y agregado y los ingredientes íntimamente mezclados se proyectan sobre



Figura 15-12. Concreto lanzado.

la superficie. En el proceso húmedo todos los ingredientes se encuentran premezclados. El aire comprimido transporta la mezcla a través de la manguera hasta la boquilla. En la boquilla se aplica una cantidad adicional de aire comprimido para aumentar la velocidad, momento en el cual la mezcla se proyecta sobre la superficie. Las guías para el uso del concreto lanzado se describen en el Reporte ACI 506R-85, "Guide to Shotcrete", (Guía para el concreto lanzado); (Referencia 15-49).

## CONCRETO COMPENSADOR DE CONTRACCION

El concreto compensador de contracción, que utiliza un cemento expansivo o un aditivo expansor agregado al cemento portland, se expande después del fraguado y durante el endurecimiento hasta en una cantidad igual o ligeramente mayor que la cantidad de contracción por secado esperada en una mezcla de concreto normal. El concreto compensador de contracción se utiliza en losas de concreto, pavimentos, estructuras y trabajos de reparación para minimizar las grietas que provoca la contracción por secado.

El acero de refuerzo en la estructura restringe al concreto y entra en tensión mientras el concreto compensador de contracción se expande. Al llegar la contracción por secado provocada por la pérdida de humedad en el concreto endurecido, por lo general se libera la tensión y mientras la tensión resultante en el concreto no rebasa la resistencia a tensión del concreto, no deberán resultar agrietamientos. El concreto compensador de contracción se puede proporcionar, dosificar, colocar y curar de manera similar al concreto normal si se toman ciertas precauciones necesarias para asegurar la expansión esperada. Se puede hallar información adicional en el Capítulo 2 y en el Reporte ACI 223, "Standard Practice

\* Referencia 15-25. También el relleno de densidad controlada o relleno fluido es un suelo-cemento de baja resistencia principalmente fluido que se utiliza en vez del suelo compactado para camas de tuberías, rellenos y sub-bases (consulte la Referencia 15-59)

for the Use of Shrinkage-Compensating Concrete" (Práctica estándar para el uso del concreto compensador de contracción).

## CONCRETO POROSO

El concreto poroso (sin finos) contiene un agregado grueso con granulometría estrecha, una cantidad pequeña o nula de agregado fino y una cantidad de pasta de cemento insuficiente para rellenar los vacíos entre los agregados gruesos. Este concreto de relación agua-cemento y revenimiento bajos que - valga la expresión - tiene una apariencia parecida a palomitas de maíz, se mantiene unido principalmente por la pasta de cemento en los puntos de contacto de las partículas de agregado grueso. El concreto producido tiene un volumen elevado de vacíos (20 a 35%) y una gran permeabilidad que permite al agua fluir a través de él con mucha facilidad.

El concreto poroso se utiliza en las estructuras hidráulicas como medio de drenaje, y en los parques de estacionamiento, pavimentos y pistas de aterrizaje de aeropuertos para reducir la afluencia de las aguas pluviales. También recarga el abastecimiento local de aguas freáticas permitiendo que el agua penetre a través del concreto hasta el terreno subyacente. Los concretos porosos también se han empleado en canchas de tenis e invernaderos.

Como material de pavimentación, el concreto poroso se remueve o moldea en su lugar con equipo convencional de pavimentación y después se compacta con rodillos. En los trabajos de menor tamaño se pueden usar plantillas vibratorias o rodillos manuales. Para conservar sus propiedades de porosidad, las superficies no deberán cerrarse completamente ni sellarse; por lo tanto no se alisan ni se les aplican acabados. La resistencia a compresión de las distintas mezclas puede variar desde 35 hasta 280 kg/cm<sup>2</sup>. Las velocidades de drenaje comúnmente varían de 81 a 733 litros por minuto por metro cuadrado.

El concreto poroso se utiliza en la construcción de edificios (particularmente en muros) debido a sus propiedades de aislamiento térmico. Por ejemplo, un muro de concreto poroso de 25 cm de espesor puede tener un valor R de 5, contra un valor de 0.75 si se tratara de un muro de concreto normal. El concreto poroso también tiene un peso ligero, de 1600 a 1920 kg/m<sup>3</sup>, y presenta propiedades de contracción bajas.\*

## CONCRETO BLANCO Y DE COLOR

### Concreto blanco

El cemento portland blanco se utiliza para producir concreto blanco, que es un material arquitectónico ampliamente usado. También se utiliza en morteros, enlucidos, aplanados, terrazos y en pinturas de cemento portland. El cemento portland blanco se fabrica cumpliendo la norma ASTM C 150 aunque esta especificación no lo menciona de manera específica.

El concreto blanco se fabrica con agregados y agua que no contengan materiales que pudieran decolorar al concreto. Se pueden utilizar agregados blancos o de colores claros. No se

deberán usar aceites en las cimbras que puedan manchar al concreto. Se debe tener cuidado en evitar manchas de óxido que provenga de las herramientas y del equipo. Se deberá evitar el uso de materiales de curado que pudieran causar manchas. Las losas se deberán curar con papel a prueba de agua que no manche ni decolore y el papel se deberá traslapar y sellar en las juntas con un material que tampoco ocasione manchas.

### Concreto de color

El concreto de color se puede producir utilizando agregados de color, adicionando pigmentos de color (norma ASTM C 979) o mediante ambos recursos. Cuando se utilicen agregados de color, deberán quedar expuestos en la superficie del concreto. Esto se puede lograr colando con una cimbra que haya sido tratada con un retardante. La pasta sin hidratar en la superficie se cepilla o se lava más tarde. Otros métodos implican la remoción del mortero de la superficie mediante chorro de arena, chorro de agua, martelinado, esmerilado o con limpieza con ácido. Si las superficies se van a tratar con ácido, será necesario un retraso después del colado de aproximadamente dos semanas. Los agregados de color pueden ser agregados naturales como el cuarzo, el mármol y el granito, o también pueden ser materiales cerámicos.

Los pigmentos para colorear concreto deberán ser óxidos minerales puros que estén molidos más finamente que el cemento y que no sean solubles en agua, que estén libres de sales y ácidos solubles, que sean de colores firmes ante la luz del sol, resistentes a los álcalis y a los ácidos débiles y que se encuentren virtualmente libres de sulfato de calcio. Los óxidos minerales existen en estado natural y además se producen sintéticamente; en general, los pigmentos sintético dan resultados más uniformes.

La cantidad de pigmentos de color que se agreguen a la mezcla de concreto no deberá ser mayor que el 10% del peso del cemento. La cantidad necesaria dependerá del tipo de pigmento y del color deseado. Por ejemplo, una dosis de pigmento igual a 1.5% en peso del cemento puede producir un agradable color pastel, pero podría ser necesario un 7% para producir un color fuerte. El cemento portland blanco producirá colores más claros, más brillantes y es más recomendable que el cemento gris, a excepción de los colores negros o grises oscuros en el concreto.

Para mantener un color uniforme, el proporcionamiento de todos los materiales en la mezcla deberá controlarse por peso de manera cuidadosa. Para evitar concentraciones de color en forma de rayas, el cemento seco y el pigmento de color se deberán mezclar perfectamente antes de agregarlos a la mezcla. El tiempo de mezclado deberá ser mayor de lo normal para asegurar su uniformidad.

En los concretos con aire incluido, la adición del pigmento puede hacer necesario un ajuste en la cantidad de aditivo inclusor de aire para poder seguir manteniendo el contenido de aire deseado.

**Método de agitado en seco.** Las losas o tableros prefabricados que se cuelen en posición horizontal se podrán colorear por medio del método de agitado en seco. Los materiales colorantes secos que consisten de un pigmento de

\* Referencias 15-20 y 15-39.

óxido mineral, de cemento portland blanco, y de una arena silíceo especialmente graduada o de otro material fino, se pueden adquirir en el mercado preparados de antemano por diversos productores.

Luego de que la losa se haya emparejado con llana una vez, se deberán esparcir uniformemente a mano sobre la superficie dos tercios del material colorante seco. Normalmente la cantidad requerida de material colorante se puede determinar en kilogramos por metro cuadrado a partir de las secciones anteriormente coladas. Después de que el material haya absorbido agua del concreto fresco, deberá ser emparejado con llana en su superficie. El resto del material deberá aplicarse inmediatamente después en ángulos rectos a su aplicación inicial, de tal forma que se obtenga un color uniforme. La losa deberá trabajarse con llana de nuevo para acabar el material restante en la superficie.

Podrán seguir otras operaciones de acabado, dependiendo del tipo de acabado que se desee. El curado deberá comenzar inmediatamente después del acabado, tomando las precauciones necesarias para evitar decolorar la superficie.

## CONCRETO CON CEMENTO PORTLAND POLIMERIZADO

El concreto con cemento portland polimerizado (PPCC), al que también se conoce como concreto modificado con polímeros, consiste básicamente, de concreto de cemento portland al que durante el mezclado se le ha agregado un polímero o un monómero. Los látex elastoméricos y termoplásticos son los polímeros más comúnmente usados en el PPCC. Los compuestos epóxicos y otros polímeros se utilizan también de manera común. En general, el látex mejora la ductilidad, las propiedades de adherencia, la resistencia al ingreso del ión cloruro, la unión por cortante, y la resistencia a la tensión y a la flexión del concreto y del mortero. Los concretos modificados con látex (LMC) también tienen una excelente resistencia al impacto, a la abrasión y a la congelación-deshielo. Algunos materiales LMC también pueden resistir ciertos ácidos, álcalis, y solventes orgánicos. El concreto con cemento portland polimerizado se utiliza, principalmente, para resanes y para capas superpuestas.\*

## FERROCEMENTO

El ferrocemento es un tipo especial de concreto reforzado que se compone de capas estrechamente espaciadas de alambre o de malla continua metálica o no metálica relativamente delgada insertada dentro de un mortero cemento-arena. Se le construye apliando un mortero a mano, utilizando concreto lanzado, laminando (es decir, forzando la malla dentro del concreto fresco) o por medio de una combinación de estos métodos.

La mezcla de mortero generalmente tiene una relación arena-cemento de 1.5 a 2.5 y una relación agua-cemento de 0.35 a 0.5. El refuerzo constituye aproximadamente el 5 a 6% del volumen del ferrocemento. También se pueden usar fibras y aditivos para mejorar la calidad del mortero. Con frecuencia

se aplican a la superficie acabada polímeros o recubrimientos a base de cemento para reducir la porosidad.

El ferrocemento se considera fácil de producir en una gran variedad de formas y tamaños; sin embargo, requiere de una gran cantidad de mano de obra. El ferrocemento se emplea para construir cascarones, albercas, silos, tanques, casas prefabricadas, barcasas, barcos, esculturas y tableros delgados o secciones con espesores normalmente menores de 2.5 cm.\*\*

## CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS

El concreto reforzado con fibras es un concreto convencional al que se adicionan fibras separadas discontinuas durante el mezclado. Las fibras, fabricadas de acero, plástico, vidrio y naturales (celulosa), así como de otros materiales, se pueden conseguir en una gran variedad de formas (cilíndricas, planas, rizadas y estriadas) y de tamaños, con longitudes típicas de 6 a 76 mm y espesores que varían desde 0.005 mm hasta 0.8 mm.

Se ha demostrado que las fibras de acero mejoran de manera importante la resistencia a la flexión, la resistencia a los impactos, la tenacidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia contra agrietamientos del concreto. Otros tipos de fibras muestran resultados variables. Si las fibras no se agregan a la mezcla según la secuencia adecuada o si el porcentaje del volumen de fibras es demasiado alto, las fibras pueden llegar a formar grumos o bolas durante el mezclado. Se pueden emplear contenidos de fibra hasta del 4 ó 5% en volumen del concreto o del mortero; sin embargo, el límite superior aplicable bajo condiciones prácticas para colocar en obra a la mayoría de fibras es de 1 ó 2%.

El concreto reforzado con fibras de acero se puede colar por medio de la mayoría de métodos convencionales entre los que se puede incluir al bombeo, siempre y cuando la mezcla no se encuentre demasiado húmeda. Las mezclas excesivamente húmedas que se bombeen podrían tener segregación. Las fibras de acero también se pueden emplear en concretos de lechada infiltrada con fibras, en los cuales se vacía una lechada de cemento dentro de una cama de fibras (con un contenido de fibras de 6 a 18% en volumen). Las fibras de acero, vidrio y plásticas de polipropileno se pueden utilizar en concretos lanzados reforzados con fibras.

El concreto reforzado con fibras de acero se emplea principalmente para pavimentos, capas superpuestas, resanes, estructuras hidráulicas, cascarones delgados y para productos prefabricados. Las fibras de vidrio se utilizan primordialmente para aplicaciones de rocío en tableros delgados, mismas que se conocen como concreto reforzado con fibra de vidrio (GFRC). En el Reporte ACI 544.1 R, "State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete" (Reporte sobre el estado del arte del concreto reforzado con fibras) se puede obtener información adicional. Las pruebas para el concreto reforzado con fibras se describen en la norma ASTM C 995 (prueba del cono invertido), en la norma ASTM C 1018

\* Consulte la Referencia 15-54 para mayor información.

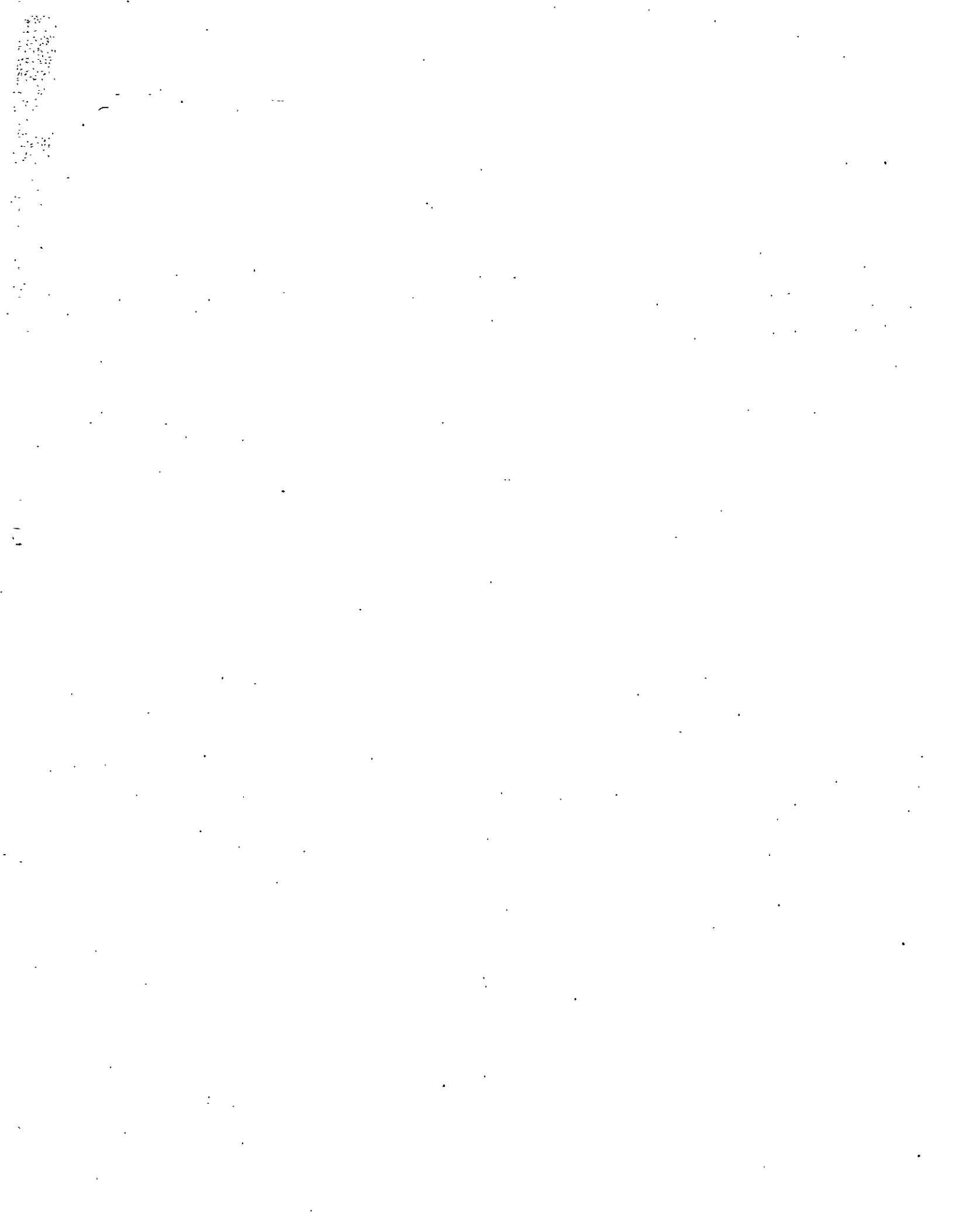
\*\* Referencia 15-35.

(tenacidad a flexión), y en el Reporte ACI 544.2 R, "Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete" (Medición de las propiedades del concreto reforzado con fibras).

## REFERENCIAS

- 15-1. Valore, R. C., Jr., "Cellular Concretes, Parts 1 and 2," *Proceedings of the American Concrete Institute*, vol. 50, American Concrete Institute, Detroit, May 1954, pages 773-796; June 1954, pages 817-836.
- 15-2. Valore, R. C., Jr., "Insulating Concrete," *Proceedings of the American Concrete Institute*, vol. 53, American Concrete Institute, November 1956, pages 509-532.
- 15-3. Klieger, Paul, *Early-High-Strength Concrete for Prestressing*, Research Department Bulletin RX091, Portland Cement Association, 1958.
- 15-4. Carlon, Ry W., and Thayer, Donald P., "Surface Coolig of Mass Concrete to Prevent Cracking," *Journal of the American Concrete Institute*, American Concrete Institute, August 1959, page 107.
- 15-5. Walker, Stanton, and Bloem, Delmar L., "Effects of Aggregate Size on Properties of Concrete," *Proceedings of the American Concrete Institute*, vol. 57, no. 3, American Concrete Institute, September 1960, pages 283-298; and Discussion by N. G. Zoldner, March 1961, pages 1245-1248.
- 15-6. *Concrete for Radiation Sheilding* Compilation No. 1, American Concrete Institute, 1962.
- 15-7. Cordon, William A., and Gillespie, Aldridge H., "Variables in Concrete Aggregates and Portland Cement Paste which Influence the Strength of Concrete," *Proceedings of the American Concrete Institute*, vol. 60, no. 8, American Concrete Institute, August 1963, pages 1029-1050; and Discussion, March 1964, pages 1981-1998.
- 15-8. Mather, K., "High-Strength, High-Density Concrete," *Proceedings of the American Concrete Institute*, vol. 62, American Concrete Institute, August 1965, pages 951-960.
- 15-9. Townsend, C. L., "Control of Cracking in Mass Concrete Structures," *Engineering Monograph No. 34*, U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation, Denver, 1965.
- 15-10. Brewer, Harold W., *General Relation of Heat Flow Factors to the Unit Weight of Concrete*, Development Department Bulletin DX114, Portland Cement Association, 1967.
- 15-11. McCormick, Fred C., "Rational Proportioning of Preformed Foam Cellular Concrete," *Journal of the American Concrete Institute*, American Concrete Institute, February 1967, pages 104-110.
- 15-12. Gustafarro, A. H.; Abrams, M. S.; and Litvin, Albert, *Fire Resistance of Lightweight Insulating Concretes*, Research and Development Bulletin RD004B, Portland Cement Association, 1970.
- 15-13. Reichard, T. W., "Mechanical Properties of Insulating Concretes," *Lightweight Concrete*, American Concrete Institute, 1971, pages 253-316.
- 15-14. Freedman, Sidney, *High-Strength Concrete*, IS176T, Portland Cement Association, 1971.
- 15-15. Tuthill, Lewis H., and Adams, Robert F., "Cracking Controlled in Massive, Reinforced Structural Concrete by Application of Mass Concrete Practice," *Journal of the American Concrete Institute*, American Concrete Institute, August 1972, page 481.
- 15-16. *Concrete for Nuclear Reactors*, SP-34, 3 volumes, 73 papers, American Concrete Institute, 1972, 1766 pages.
- 15-17. *Structural Lightweight Concrete*, IS032T, Portland Cement Association, revised 1986.
- 15-18. Perenchio, W. F., *An Evaluation of Some of the Factors Involved in Producing Very-High-Strength Concrete*, Research and Development Bulletin RD014, Portland Cement Association, 1973.
- 15-19. Klieger, Paul, "Proportioning No-Slump Concrete," *Proportioning Concrete Mixes*, SP-46, American Concrete Institute, 1974, pages 195-207.
- 15-20. Malhotra, V.M., "No-Fines Concrete—Its Properties and Applications," *Journal of the American Concrete Institute*, American Concrete Institute, November 1976.
- 15-21. FitzGibbon, Michael E., "Large Pours for Reinforced Concrete Structures," Current Practice Sheets No. 28, 35, and 36, *Concrete*, Cement and Concrete Association, Wexham Springs, Slough, England, March and December 1976 and February 1977.
- 15-22. Fintel, Mark, and Ghosh, S. K., "Mass Reinforced Concrete Without Construction Joints," presented at the Adrian Pauw Symposium on Designing for Creep and Shrinkage, Fall Convention of the American Concrete Institute, Houston, Texas, November 1978.
- 15-23. Perenchio, William F., and Klieger, Paul, *Some Physical Properties of High-Strength Concrete*, Research and Development Bulletin RD056T, Portland Cement Association, 1978.
- 15-24. Hanna, Amir N., *Properties of Expanded Polystyrene Concrete and Applications for Pavement Subbases*, Research and Development Bulletin RD055P, Portland Cement Association, 1978.
- 15-25. *Soil-Cement Construction Handbook*, EB003S, Portland Cement Association, 1979.
- 15-26. *Mass Concrete for Dams and Other Massive Structures*, ACI 207.1R-70, reaffirmed 1970, ACI Committee 207 Report, American Concrete Institute.
- 15-27. *Standard Practice for Selecting Proportions for No-Slump Concrete*, ACI 211-3-75, revised 1980, ACI Committee 211 Report, American Concrete Institute.
- 15-28. *Roller-Compacted Concrete*, ACI 207.5R-80, ACI Committee 207 Report, American Concrete Institute, 1980.
- 15-29. *Concrete Manual*, 8th ed., U.S. Bureau of Reclamation, revised 1981.
- 15-30. *Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete*, ACI 211.2-81, ACI Committee 211 Report, American Concrete Institute, 1981.
- 15-31. Bamforth, P. B., "Large Pours," letter to the editor, *Concrete*, Cement and Concrete Association, February 1981.
- 15-32. *Guide for Cast-in-Place Low-Density Concrete*, ACI 523.1R-67, revised 1982, ACI Committee 523 Report, American Concrete Institute.
- 15-33. *Guide for Cellular Concretes Above 50 pcf and for Aggregate Concretes Above 50 pfc with Compressive*

- Strengths, Less Than 2500 psi*, ACI 523.3R-75, revised 1982, ACI Committee 523 Report, American Concrete Institute.
- 15-34. *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete* ACI 544.1R-82, ACI Committee 544 Report, American Concrete Institute, 1982.
- 15-35. *State-of-the-Art Report on Ferrocement*, ACI 549R-82, ACI Committee 549 Report, American Concrete Institute, 1982.
- 15-36. *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*, ACI 318-83, ACI Committee 318 Report, American Concrete Institute, 1983.
- 15-37. *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*, ACI 318-83, ACI Committee 318 Report, American Concrete Institute, 1983.
- 15-38. *Recommended Practice for Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete*, ACI 304-73, reaffirmed 1983, ACI Committee 304 Report, American Concrete Institute.
- 15-39. "Porous Concrete Slabs and Pavements Drain Water," *Concrete Construction*, Concrete Construction Publications, Inc., Addison, Illinois, September 1983, pages 685 and 687-688.
- 15-40. *Guide for Specifying, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete*, ACI 544-3R-84, ACI Committee 544 Report, American Concrete Institute, 1984.
- 15-41. *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*, ACI 544.3R-84, ACI Committee 544 Report, American Concrete Institute, 1984.
- 15-42. *State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete*, ACI 363R-84, ACI Committee 363 Report, American Concrete Institute, 1984.
- 15-43. *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Shotcrete*, ACI 506.1R-84, ACI Committee 506 Report, American Concrete Institute, 1984.
- 15-44. *Fiber Reinforced Concrete*, SP-81, American Concrete Institute, 1984, 460 pages.
- 15-45. *Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete*, ACI 213R-79, reaffirmed 1984, ACI Committee 213 Report, American Concrete Institute.
- 15-46. *Control of Cracking in Concrete Structures*, ACI 224R-80, revised 1984, ACI Committee 224 Report, American Concrete Institute.
- 15-47. Woiseifer, John, "Ultra High-Strength, Field Placeable Concrete with Silica Fume Admixture," *Concrete International*, American Concrete Institute, April 1984, pages 25-31.
- 15-48. Van Greem, Martha G.; Litvin, Albert; and Musser, Donald W., *Insulative Lightweight Concrete for Building Walls*, presented at the Annual Convention and Exposition of the American Society of Civil Engineers in Detroit, October 1985.
- 15-49. *Guide to Shotcrete*, ACI 506R-85, ACI Committee 506 Report, American Concrete Institute, 1985.
- 15-50. *Very High Strength Cement-Based Materials*, Materials Research Society, Pittsburgh, Pennsylvania, 1985.
- 15-51. *Standard Practice for Curing Concrete*, ACI 308-81, revised 1986, ACI Committee 308 Report, American Concrete Institute.
- 15-52. *Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete*, ACI 207.2R-73, reapproved 1986, ACI Committee 207 Report, American Concrete Institute.
- 15-53. *Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete*, ACI 207.4R-80, revised 1986, ACI Committee 207 Report, American Concrete Institute.
- 15-54. *Guide for the Use of Polymers in Concrete*, ACI 548.1R-86, ACI Committee 548 Report, American Concrete Institute, 1986.
- 15-55. Hansen, Kenneth D., "A Pavement for Today and Tomorrow," *Concrete International*, American Concrete Institute, February 1987, pages 15-17.
- 15-56. *Concrete for Massive Structures*, IS128T, Portland Cement Association, 1987.
- 15-57. Knutson, Marlin and Riley, Randall, "Fast-Track Concrete Paving Opens Door to Industry Future," *Concrete Construction*, Concrete Construction Publications, Inc., January 1987, pages 4-13.
- 15-58. Popovics, Sandor; Rajendran, N.; and Penko, Michael, "Rapid Hardening Cements for Repair of Concrete," *ACI Materials Journal*, American Concrete Institute, January-February 1987, pages 64-73.
- 15-59. *Use of Fly Ash in Concrete*, ACI 226.3R-87, ACI Committee 226 Report, American Concrete Institute, 1987.
- 15-60. Godfrey, K. A., Jr., "Concrete Strength Record Jumps 36%," *Civil Engineering*, American Society of Civil Engineers, New York, October 1987.



## Apéndice A

# Normas ASTM

Lista de las normas ASTM relacionadas con los agregados, cemento y concreto que son relevantes o se mencionan en el texto del libro:\*

- C 29-87 Test Method for Unit Weight and Voids in Aggregate
- C 31-87 Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field
- C 33-86 Specification for Concrete Aggregates
- C 39-86 Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens
- C 40-84 Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete
- C 42-85 Method of Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete
- C 70-79 Test Method for Surface Moisture in Fine Aggregate
- C 78-84 Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)
- C 85-66 Test Method for Cement Content of Hardened Portland Cement Concrete
- C 87-83 Test Method for Effect of Organic Impurities in Fine Aggregate on Strength of Mortar
- C 88-83 Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate
- C 91-87 Specification for Masonry Cement
- C 94-86 Specification for Ready-Mixed Concrete
- C 109-86 Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or 50-mm Cube Specimens)
- C 114-85 Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement
- C 115-86 Test Method for Fineness of Portland Cement by the Turbidimeter
- C 117-87 Test Method for Materials Finer than 75- $\mu$ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing
- C 123-83 Test Method for Lightweight Pieces in Aggregate
- C 125-86 Definitions of Terms Relating to Concrete and Concrete Aggregates
- C 127-84 Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate
- C 128-84 Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate
- C 131-81 Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine
- C 136-84 Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates
- C 138-81 Test Method for Unit Weight, Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete
- C 141-85 Specification for Hydraulic Hydrated Lime for Structural Purposes
- C 142-78 Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates
- C 143-78 Test Method for Slump of Portland Cement Concrete
- C 150-86 Specification for Portland Cement
- C 151-84 Test Method for Autoclave Expansion of Portland Cement
- C 156-80 Test Method for Water Retention by Concrete Curing Materials
- C 157-86 Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete
- C 171-69 Specification for Sheet Materials for Curing Concrete
- C 172-82 Method of Sampling Freshly Mixed Concrete
- C 173-78 Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Volumetric Method
- C 174-87 Test Method for Measuring Length of Drilled Concrete Cores
- C 177-85 Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus
- C 183-83 Methods of Sampling and Acceptance of Hydraulic Cement
- C 184-83 Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 150- $\mu$ m (No. 100) and 75- $\mu$ m (No. 200) Sieves
- C 185-85 Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar
- C 186-86 Test Method for Heat of Hydration of Hydraulic Cement
- C 187-86 Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement
- C 188-84 Test Method for Density of Hydraulic Cement
- C 190-85 Test Method for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars
- C 191-82 Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle
- C 192-81 Method of Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory
- C 204-84 Test Method for Fineness of Portland Cement by Air Permeability Apparatus
- C 215-85 Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens
- C 219-84 Terminology Relating to Hydraulic Cement

\*American Society for Testing and Materials  
1916 Race Street, Philadelphia, Pa 19103



- C 226-86 Specification for Air-Entraining Additions for Use in the Manufacture of Air-Entraining Portland Cement
- C 227-87 Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method)
- C 230-83 Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement
- C 231-82 Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method
- C 232-87 Test Methods for Bleeding of Concrete
- C 233-87 Test Method for Air-Entraining Admixtures for Concrete
- C 243-85 Test Method for Bleeding of Cement Pastes and Mortars
- C 260-86 Specification for Air-Entraining Admixtures for Concrete
- C 265-83 Test Method for Calcium Sulfate in Hydrated Portland Cement Mortar
- C 266-87 Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Gillmore Needles
- C 270-86 Specification for Mortar for Unit Masonry
- C 289-87 Test Method for Potential Reactivity of Aggregates (Chemical Method)
- C 293-79 Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading)
- C 294-86 Descriptive Nomenclature for Constituents of Natural Mineral Aggregates
- C 295-85 Practice for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete
- C 305-82 Method for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency
- C 309-81 Specification for Liquid Membrane-Forming Compounds for Curing Concrete
- C 311-87 Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete
- C 330-87 Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete
- C 332-87 Specification for Lightweight Aggregates for Insulating Concrete
- C 341-84 Test Method for Length Change of Drilled or Sawed Specimens of Cement Mortar and Concrete
- C 342-79 Test Method for Potential Volume Change of Cement-Aggregate Combinations
- C 348-86 Test Method for Flexural Strength of Hydraulic Cement Mortars
- C 359-83 Test Method for Early Stiffening of Portland Cement (Mortar Method)
- C 360-82 Test Method for Ball Penetration in Fresh Portland Cement Concrete
- C 387-87 Specification for Packaged, Dry, Combined Materials for Mortar and Concrete
- C 403-85 Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance
- C 418-81 Test Method for Abrasion Resistance of Concrete by Sandblasting
- C 430-83 Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45- $\mu$ m (No. 325) Sieve
- C 441-81 Test Method for Effectiveness of Mineral Admixtures in Preventing Excessive Expansion of Concrete Due to Alkali-Aggregate Reaction
- C 451-83 Test Method for Early Stiffening of Portland Cement (Paste Method)
- C 452-85 Test Method for Potential Expansion of Portland Cement Mortars Exposed to Sulfate
- C 457-82 Practice for Microscopical Determination of Air-Void Content and Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete
- C 465-85 Specifications for Processing Additions for Use in the Manufacture of Hydraulic Cements
- C 469-87 Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression
- C 470-87 Specification for Molds for Forming Concrete Test Cylinders Vertically
- C 490-86 Specification for Apparatus for Use in Measurement of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete
- C 494-86 Specification for Chemical Admixtures for Concrete
- C 495-86 Test Method for Compressive Strength of Lightweight Insulating Concrete
- C 496-87 Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens
- C 511-85 Specification for Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes
- C 512-87 Test Method for Creep of Concrete in Compression
- C 513-86 Test Method for Obtaining and Testing Specimens of Hardened Lightweight Insulating Concrete for Compressive Strength
- C 535-81 Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine
- C 566-84 Test Method for Total Moisture Content of Aggregate by Drying
- C 567-85 Test Method for Unit Weight of Structural Lightweight Concrete
- C 586-69 Test Method for Potential Alkali Reactivity of Carbonate Rocks for Concrete Aggregates (Rock Cylinder Method)
- C 595-86 Specification for Blended Hydraulic Cements
- C 597-83 Test Method for Pulse Velocity Through Concrete
- C 617-85 Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens
- C 618-85 Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete
- C 637-84 Specification for Aggregates for Radiation-Shielding Concrete
- C 638-84 Descriptive Nomenclature of Constituents of Aggregates for Radiation-Shielding Concrete
- C 641-82 Test Method for Staining Materials in Lightweight Concrete Aggregates
- C 642-82 Test Method for Specific Gravity, Absorption, and Voids in Hardened Concrete
- C 666-84 Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing
- C 671-86 Test Method for Critical Dilation of Concrete Specimens Subjected to Freezing
- C 672-84 Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals
- C 682-87 Practice for Evaluation of Frost Resistance of Coarse Aggregates in Air-Entrained Concrete by Critical Dilation Procedures
- C 684-81 Method of Making, Accelerated Curing, and Testing of Concrete Compression Test Specimens

- C 685-86 Specification for Concrete Made by Volumetric Batching and Continuous Mixing
- C 688-77 Specification for Functional Additions for Use in Hydraulic Cements
- C 702-87 Practice for Reducing Field Samples of Aggregate to Testing Size
- C 778-80a Specification for Standard Sand
- C 779-82 Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces
- C 786-83 Test Method for Fineness of Hydraulic Cement and Raw Materials by the 300- $\mu\text{m}$  (No. 50), 150- $\mu\text{m}$  (No. 100), and 75- $\mu\text{m}$  (No. 200) Sieves by Wet Methods
- C 796-87 Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam
- C 801-81 Practice for Determining the Mechanical Properties of Hardened Concrete Under Triaxial Loads
- C 803-82 Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete
- C 805-85 Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete
- C 806-75 Test Method for Restrained Expansion of Expansive Cement Mortar
- C 807-83 Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement Mortar by Modified Vicat Needle
- C 823-83 Practice for Examination and Sampling of Hardened Concrete in Constructions
- C 827-87 Test Method for Change in Height at Early Ages of Cylindrical Specimens from Cementitious Mixtures
- C 845-80 Specification for Expansive Hydraulic Cement
- C 856-83 Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete
- C 869-80 Specification for Foaming Agents Used in Making Preformed Foam for Cellular Concrete
- C 873-85 Test Method for Compressive Strength of Concrete Cylinders Cast in Place in Cylindrical Molds
- C 876-87 Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete
- C 878-87 Test Method for Restrained Expansion of Shrinkage-Compensating Concrete
- C 881-78 Specification for Epoxy-Resin-Base Bonding Systems for Concrete
- C 900-87 Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete
- C 917-82 Method for Evaluation of Cement Strength Uniformity from a Single Source
- C 918-80 Method for Developing Early Age Compression Test Values and Projecting Later Age Strengths
- C 928-80 Specification for Packaged, Dry, Rapid-Hardening Cementitious Materials for Concrete Repairs
- C 937-80 Specification for Grout Fluidifier for Preplaced-Aggregate Concrete
- C 938-80 Practice for Proportioning Grout Mixtures for Preplaced-Aggregate Concrete
- C 939-87 Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method)
- C 940-87 Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory
- C 941-87 Test Method for Water Retentivity of Grout Mixtures for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory
- C 942-86 Test Method for Compressive Strength of Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory
- C 943-80 Practice for Making Test Cylinders and Prisms for Determining Strength and Density of Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory
- C 944-80 Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method
- C 953-87 Test Method for Time of Setting of Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory
- C 979-82 Specification for Pigments for Integrally Colored Concrete
- C 989-87 Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars
- C 995-86 Test Method for Time of Flow of Fiber-Reinforced Concrete Through Inverted Slump Cone
- C 1012-87 Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Mixed Sodium and Magnesium Sulfate Solution
- C 1017-85 Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete
- C 1018-85 Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading)
- C 1038-85 Test Method for Expansion of Portland Cement Mortar Bars Stored in Water
- C 1040-85 Test Methods for Density of Unhardened and Hardened Concrete In Place by Nuclear Methods
- C 1059-86 Specification for Latex Agents for Bonding Fresh to Hardened Concrete
- C 1064-86 Test Method for Temperature of Freshly Mixed Portland Cement Concrete
- C 1073-85 Test Method for Hydraulic Activity of Ground Slag by Reaction with Alkali
- C 1074-87 Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method
- C 1078-87 Test Methods for Determining Cement Content of Freshly Mixed Concrete
- C 1079-87 Test Methods for Determining Water Content of Freshly Mixed Concrete
- C 1084-87 Test Method for Portland Cement Content of Hardened Hydraulic-Cement Concrete
- D 75-82 Practice for Sampling Aggregates
- D 98-87 Specification for Calcium Chloride
- D 345-80 Methods of Sampling and Testing Calcium Chloride for Roads and Structural Applications
- D 448-86 Classification for Sizes of Aggregate for Road and Bridge Construction
- D 558-82 Test Method for Moisture-Density Relations of Soil-Cement Mixtures
- D 632-84 Specification for Sodium Chloride
- D 2240-81 Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness
- D 3042-86 Test Method for Insoluble Residue in Carbonate Aggregates
- D 3963-82 Specification for Epoxy-Coated Reinforcing Steel
- E 11-87 Specification for Wire-Cloth Sieves for Testing Purposes
- E 380-84 Metric Practice

## Apéndice B

# NORMAS OFICIALES MEXICANAS

A continuación se presentan algunas Normas Oficiales Mexicanas\* equivalentes a las normas ASTM que se mencionan en el texto

### ADITIVOS

NOM-C-45-83	Aditivos para concreto. Muestreo.
NOM-C-81-81	Aditivos para concreto. Curado compuestos líquidos que forman membrana.
NOM-C-90-78	Método de prueba para aditivos expansores y estabilizadores de volumen del concreto.
NOM C 117-78	Aditivos estabilizadores de volumen de concreto
NOM-C-140-78	Aditivos expansores del concreto.
NOM-C-199-86	Aditivos para concreto y materiales complementarios. Terminología y clasificación.
NOM-C-200-78	Aditivos inclusores de aire para concreto.
NOM-C-255-88	Aditivos que reducen la cantidad de agua y/o modifican el tiempo de fraguado del concreto.
NOM-C-298-80	Aditivos minerales. Determinación de la efectividad para prevenir una expansión excesiva del concreto debida a la reacción álcali-agregado.
NOM-C-304-80	Aditivos. Determinación de la retención de agua por medio de compuestos líquidos que forman membrana para el curado del concreto.
NOM-C-309-80	Aditivos para concreto. Determinación del factor de reflectancia de membrana de color blanco para el curado del concreto.

### AGREGADOS

NOM-C-30-86	Agregados. Muestreo.
NOM-C-71-83	Agregados. Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable.
NOM-C-72-83	Agregados. Determinación de partículas ligeras
NOM-C-73-83	Agregados para concreto. Masa volumétrica. Método de prueba.
NOM-C-75-85	Agregados. Determinación de la sanidad por medio del sulfato de sodio o del sulfato de magnesio.
NOM-C-76-83	Agregados. Efecto de las impurezas orgánicas en los agregados finos sobre la resistencia de los morteros. Método de prueba.
NOM-C-77-87	Agregados para concreto. Análisis granulométrico. Método de prueba.
NOM-C-84-83	Agregados. Partículas más finas que la criba F 0.075 por medio de lavado. Método de prueba.
NOM-C-88-86	Determinación de impurezas orgánicas en el agregado fino.
NOM-C-111-88	Concreto. Agregados. Especificaciones.
NOM-C-164-86	Agregados. Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado grueso.
NOM-C-165-84	Agregados. Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado fino. Método de prueba.
NOM-C-166-83	Agregados. Contenido total de humedad por secado. Método de prueba.
NOM-C-170-86	Agregados. Reducción de las muestras de agregados, obtenidas en el campo al tamaño requerido para las pruebas.
NOM-C-180-86	Agregados. Determinación de la reactividad potencial de los agregados con los álcalis del cemento por medio de barras de mortero.
NOM-C-196-84	Agregados. Resistencia a la degradación por abrasión e impacto de agregado grueso usando la máquina de Los Angeles. Método de prueba.
NOM-C-245-86	Agregados. Determinación de las correcciones en masa por la humedad de agregados en dosificaciones de concreto.

\* El Centro de Documentación del IMCYC pone a la disposición de las personas interesadas las siguientes normas oficiales mexicanas sobre cemento y concreto de la Dirección General de Normas de la Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial. Tanto éstas, como otras normas internacionales que recibe esta secretaría en reciprocidad, pueden ser solicitadas en esa dependencia del ejecutivo federal.

- NOM-C-265-84 Agregados para concreto. Examen petrográfico. Método de prueba.
- NOM-C-270-85 Agregados. Resistencia al rayado de las partículas del agregado grueso. Método de prueba.
- NOM-C-271-84 Agregados para concreto. Determinación de la reactividad potencial (Método químico).
- NOM-C-272-87 Reactividad potencial de rocas de carbonatos de agregados para concreto con los álcalis.
- NOM-C-282-84 Agregados para concreto. Cambio de volumen de combinaciones cemento-agregado. Método de prueba.
- NOM-C-299-87 Agregados ligeros. Concreto estructural. Especificaciones.
- NOM-C-305-80 Agregados para concreto. Descripción de sus componentes minerales naturales.

## AGUA

- NOM-C-122-82 Agua para concreto.
- NOM-C-277-79 Agua para concreto. Muestreo.
- NOM-C-283-82 Agua para concreto. Análisis.

## ASBESTO-CEMENTO

- NOM-C-64-71 Fibra de asbesto para uso en la industria del asbesto cemento.
- NOM-C-68-71 Método de prueba para la determinación de la resistencia mecánica de las fibras de asbesto usadas en la industria del asbesto cemento.
- NOM-C-121-82 Asbesto cemento. Determinación de densidades, absorción y porosidad.

## CAL

- NOM-C-3-82 Cal hidratada para construcciones. Especificaciones.

## CEMENTO

- NOM-C-1-80 Cemento Portland.
- NOM-C-2-86 Cemento Portland Puzolana.
- NOM-C-21-81 Cemento, Mortero Portland.
- NOM-C-49-70 Método de prueba para la determinación de la finura de cementantes hidráulicos mediante el tamiz No. 130 M.
- NOM-C-55-66 Método de prueba para determinar finura de los cementantes hidráulicos (Método Turbidimétrico).
- NOM-C-56-78 Determinación de la finura de los cementantes hidráulicos (Método de permeabilidad al aire).
- NOM-C-57-83 Cementantes hidráulicos. Determinación de la consistencia normal.

- NOM-C-58-67 Determinación del tiempo de fraguado en cementantes hidráulicos (Método Gillmore).
- NOM-C-59-75 Determinación del tiempo de fraguado de cementantes hidráulicos (Método de Vicat).
- NOM-C-60-68 Método de prueba para determinar la resistencia a la tensión de los cementantes hidráulicos.
- NOM-C-61-76 Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos.
- NOM-C-62-68 Método de prueba para determinar la sanidad de cementantes hidráulicos
- NOM-C-85-82 Método de mezclado mecánico de pastas y morteros de cementantes hidráulicos.
- NOM-C-130-68 Muestreo de cementantes hidráulicos.
- NOM-C-131-76 Determinación del análisis químico de cementos hidráulicos.
- NOM-C-132-70 Método de prueba para la determinación del fraguado falso de cemento portland por el método de pasta.
- NOM-C-133-80 Cemento. Coadyuvantes de molienda empleados en la elaboración de cementos hidráulicos.
- NOM C 144-68 Requisitos para el aparato usado en la determinación de la fluidez de morteros con cementantes hidráulicos
- NOM-C-148-81 Gabinetes y cuartos húmedos y tanques de almacenamiento para las pruebas de cementantes de concreto hidráulicos.
- NOM-C-150-73 Determinación de la finura de cementantes hidráulicos mediante el tamiz No. 80 M (200).
- NOM-C-151-77 Determinación del calor de hidratación de cementantes hidráulicos.
- NOM-C-152-70 Método de prueba para la determinación del peso específico de cementantes hidráulicos.
- NOM-C-153-71 Método de prueba para la determinación del sangrado en pasta de cemento y en mortero.
- NOM-C-175-69 Cemento Portland de escoria de alto horno.
- NOM-C-184-70 Cemento de Escoria.
- NOM-C-185-79 Morteros de cemento portland. Determinación de su expansión potencial debido a la acción de sulfatos.
- NOM-C-208-72 Métodos de prueba para la determinación del contenido de anhídrido sulfúrico en los cementantes hidráulicos.
- NOM-C-273-78 Determinación de la actividad puzolánica.
- NOM-C-300-80 Cemento hidráulico. Determinación del contenido de aire en el mortero.
- NOM-C-313-81 Pigmentos. Cemento Portland, mortero y concreto.
- NOM-C-315-81 Cemento. Cementaciones primarias y secundarias de pozos petroleros o de gas.



## FACTORES DE CONVERSION METRICA

El siguiente listado proporciona las relaciones de conversión entre las unidades usuales en U.S.A. y las unidades del Sistema Internacional. El procedimiento de conversión adecuado consiste en multiplicar el valor que se especifica en la izquierda (principalmente valores de unidades usuales en U.S.A.) por el factor de conversión tal como se da y después redondeándolo hasta el número apropiado de dígitos significativos deseados. Por ejemplo, para convertir 11.4 pies a metros:  $11.4 \times 0.3048 = 3.47472$ , el cual se puede redondear a 3.47 metros. No se debe redondear ningún valor antes de efectuar la multiplicación, pues varía la precisión reducida. Se puede encontrar una guía completa referente a los usos del Sistema Internacional en la norma ASTM E 380, "Metric Practice" (Práctica métrica).

Para convertir de	a	multiplicar por	
<b>Longitud</b>			
pulgadas (in.)	micras ( $\mu$ )	25,400	E*
pulgadas (in.)	centímetros (cm)	2.54	E
pulgadas (in.)	metros (m)	0.0254	E
pies (ft)	metros (m)	0.3048	E
yardas (yd)	metros (m)	0.9144	
<b>Superficie</b>			
pies cuadrados (sq ft)	metros cuadrados ( $m^2$ )	0.09290304	E
pulgadas cuadradas (sq in.)	centímetros cuadrados ( $cm^2$ )	6.452	E
pulgadas cuadradas (sq in.)	metros cuadrados ( $m^2$ )	0.00064516	E
yardas cuadradas (sq yd)	metros cuadrados ( $m^2$ )	0.8361274	
<b>Volumen</b>			
pulgadas cúbicas (cu in.)	centímetros cúbicos ( $cm^3$ )	16.387064	
pulgadas cúbicas (cu in.)	metros cúbicos ( $m^3$ )	0.00001639	
pies cúbicos (cu ft)	metros cúbicos ( $m^3$ )	0.02831685	
yardas cúbicas (cu yd)	metros cúbicos ( $m^3$ )	0.7645549	
galones (gal) Can. líquidos	litros	4.546	
galones (gal) Can. líquidos	metros cúbicos ( $m^3$ )	0.004546	
galones (gal) EEUU. líquidos**	litros	3.7854118	
galones (gal) EEUU. líquidos	metros cúbicos ( $m^3$ )	0.00378541	
onzas fluidas (fl oz)	militros	29.57353	
onzas fluidas (fl oz)	metros cúbicos ( $m^3$ )	0.00002957	
<b>Fuerza</b>			
kips (1000 lb)	kilogramos (kg)	453.6	
kgps (1000 lb)	newtons (N)	4,448.222	
libras (lb)	kilogramos (kg)	0.4535924	
avoirdupois libras (lb)	newtons (N)	4.448222	

<b>Presión o esfuerzo</b>		
kips sobre pulgada cuadrada (ksi)	megapascales (MPa)	6.894757
kips sobre pulgada cuadrada (ksi)	kilogramos sobre centímetro cuadrado ( $kg/cm^2$ )	70.31
libras sobre pie cuadrado (psf)	kilogramo sobre metro cuadrado ( $kg/m^2$ )	4.8824
libras sobre pie cuadrado (psf)	pascales (Pa) +	47.88
libras sobre pulgada cuadrada (psi)	kilogramos sobre centímetro cuadrado ( $kg/cm^2$ )	0.07031
libras sobre pulgada cuadrada (psi)	pascales (Pa) +	6,894.757
libras sobre pulgada cuadrada (psi)	megapascales (MPa)	0.00689476

<b>Masa (peso)</b>		
libras (lb) avoirdupois	kilogramos (kg)	0.4535924
tons, 2000 lb	kilogramos (kg)	907.1848
granos	kilogramos (kg)	0.0000648

<b>Masa (peso) sobre longitud</b>		+
kips sobre pie lineal (klf)	kilogramos sobre metro ( $kg/m$ )	0.001488
libras sobre pie lineal (plf)	kilogramo sobre metro ( $kg/m$ )	1.488

<b>Masa sobre volumen (densidad)</b>		+
libras sobre pie cúbico (pcf)	kilogramos sobre metro cúbico ( $kg/m^3$ )	16.01846
libras sobre yarda cúbica (lb/cu yd)	kilogramo sobre metro cúbico ( $kg/m^3$ )	0.5933

<b>Temperatura</b>		
grados Fahrenheit ( $^{\circ}F$ )	grados Centígrados ( $^{\circ}C$ )	$t_C = (t_F - 32)/1.8$
grados Fahrenheit ( $^{\circ}F$ )	grados Kelvin ( $^{\circ}K$ )	$t_K = (t_F + 459.7)/1.8$
grados Kelvin ( $^{\circ}K$ )	grados Centígrados ( $^{\circ}C$ )	$T_C = t_K - 273.15$

<b>Energía y calor</b>		
Unidades térmicas inglesas (Btu)	julios (J)	1055.056
calorías (cal)	julios (J)	4.1868
Btu/ $^{\circ}F$ hr ft $^2$	$W/m^2 \cdot K$	5.678263
kilowatts-hora (kwh)	julios (J)	3,600,000.
Unidades térmicas inglesas sobre libra (Btu/lb)	calorías sobre gramo (cal/g)	0.55556
Unidades térmicas inglesas sobre hora (Btu/hr)	watts (W)	0.2930711

<b>Potencia</b>		
Caballos de fuerza (hp) (550 ft-lb/sec)	watts (W)	745.6999

<b>Velocidad</b>		
millas sobre hora (mph)	kilómetros sobre hora ( $km/hr$ )	1.60934
millas sobre hora (mph)	metros sobre segundo (m/s)	0.44704

Permeabilidad		
darcys	centímetros sobre segundo (cm/s)	0.000968
pies sobre día (ft/day)	centímetros sobre segundo (cm/s)	0.000352

- \* E indica que el factor que se da es exacto.
- \* Un galón de E.E.U.U. es igual a 0.8327 galones canadienses.
- + Un pascal es igual a 1.000 newton sobre metro cuadrado.

Nota:  
 Un galón (E.E.U.U.) de agua pesa 8.34 libras \*E.E.U.U.) a 60°F.  
 Un pie cúbico de agua pesa 62.4 libras (E.E.U.U.)  
 Un mililitro de agua tiene una masa igual a 1 gramo y tiene un volumen igual a un centímetro cúbico.  
 Un saco de cemento de E.E.U.U. pesa 94 lb (42.638 kg).

Los prefijos y símbolos que a continuación se enlistan se utilizan comúnmente para formar nombres y símbolos de los múltiplos y submúltiplos decimales de las unidades del Sistema Internacional.

Factor de multiplicación	Prefijo	Símbolo
1,000,000,000 = 10 <sup>9</sup>	giga	G
1,000,000 = 10 <sup>6</sup>	mega	M
1,000 = 10 <sup>3</sup>	kili	k
1 = 1	-	-
0.01 = 10 <sup>-2</sup>	centi	c
0.001 = 10 <sup>-3</sup>	mili	m
0.000001 = 10 <sup>-6</sup>	micro	μ
0.000000001 = 10 <sup>-9</sup>	nano	n

# Índice

- Ablandamiento con caliza, 44**
- Absorción, 7, 38, 76, 187**
- Acabado frotado con arpillería, 131**
- Acabados siguiendo patrones, 121**
- Acabados texturizados, 121, 131**
- Acabados, 75, 117, 121, 131, 128,**
  - agregado expuesto, 131
  - alisado, 120
  - aplanado, 119
  - bordeado, 120
  - cemento seco, 120
  - chorro de arena, 122, 124, 129
  - defectos en, 120, 129
  - emparejado, 120
  - enrasado, 118
  - escobillado, 121
  - especiales de superficie, 121, 131
  - junteado, 120
  - limpieza con mortero, 131
  - losas, 117, 121
  - martelinado, 122
  - nivelación, 118
  - obtenido de la cimbra, 131
  - patrones y texturas, 121
  - pinturas y recubrimientos claros, 132
  - prematuros, 120
  - superficies cimbradas, 118, 131
- Acete en el agua de mezclado, 30**
- Acido en el agua, 29, 41**
  - limpieza con, 130
- Adherencia, 37, 122-124**
- Aditivos minerales, 72, 74**
  - efecto sobre el concreto, 72-78
- Aditivos, 67, 80**
  - acelerantes, 67, 70, 153
  - adiciones, 67
  - agentes, 67
    - a prueba de humedad, 79
    - para la trabajabilidad, 78
    - productores de gas, 80
  - ayudas de bombeo, 79
  - cambios volumétricos, 69, 70
  - ceniza volante, 74, 75
  - clasificación, 68
  - cloruro de calcio, 70, 71
  - colorantes, 79
  - efecto sobre
    - el contenido de aire, 68, 74
    - la contracción, 69, 76
- escoria, 18, 74
- especificaciones, 72
- exclusores de aire, 80
- fungicidas, germicidas, 81
- para lechada, 80
- humo de sílice, 73, 75
- impermeabilizantes, 79
- incluidores de aire, 69
- inhibidores de la corrosión, 78
- materiales cementantes, 72, 74
- minerales, 72
  - finamente divididos, 72, 78
- negro de humo, 79
- para unir, 80
- puzolanas, 18, 73
- reductores, 71
  - de agua, 69, 70, 71
  - de alto rango, 71
  - de la reactividad con los álcalis, 80
  - de permeabilidad, 68, 76, 79, 213
  - retardantes del fraguado, 70
  - superplastificantes, 71
- Agentes para unir, 80, 122**
  - lechada, 80, 122
  - lechadas y morteros, 80, 122
- Agregado expuesto, 37, 131**
- Agregado fino, 35**
- Agregado grueso, 36**
- Agregado ligero, 32, 195, 198**
- Agregados de gran peso, 202**
- Agregados, 31-45**
  - ablandamiento con caliza, 44
  - absorción, 38
  - abundamiento de las arenas, 39
  - adherencia, 37
  - almacenamiento, 45
  - análisis de tamices, 32-36, 180
  - apilamiento, 45
  - arena
    - véase *agregado fino*
  - beneficio de, 45
  - calentamiento, 181
  - cambio volumétrico, 38, 41
  - características, 32, 41
    - clasificación por corriente ascendente, 45
  - componentes, 31, 32, 42-43
  - con granulometría discontinua, 37
  - para agregado expuesto, 37, 131
  - concreto reciclado, 46
- consolidación, 32
- contaminación, 42-43
- contenido, 1, 31, 32
  - de humedad, 38, 131
- contracción, 41, 173
- cribado, 36, 36, 180
- de dragado marítimo, 46
- de gran peso, 32, 202
- de peso normal, 31-32
- definiciones, 31
- densidad, 31, 38
  - relativa, 38
- deterioro, 39
- dilatación térmica, 42, 167-169
- dispersión, 35
- durabilidad, 39
- enfriamiento, 144-146
- ensayo de barras de mortero, 44
- erupciones, 42
- escoria de alto horno, 32
- especificaciones, 32-33
- estabilidad química, 41-42
- exámenes petrográficos, 44,
- finos, 1, 31, 34
- forma de partícula, 37
- granulometría, 32-37
- gruesos, i. 31, 35
- humedad superficial, 38
- humedecimiento y secado, 41
- húmedos, 38
- impurezas, 42
- impurezas orgánicas, 42, 180
- lavados, 45
- ligeros, 32
- manchado, 43
- manejo de, 45
- materiales finos objetables, 42, 180
- minerales componentes, 31
- módulo de finura, 36
- muestreo, 180
- número de tamaño, 35, 36
- peso específico, 38
- peso volumétrico, 38
- prueba de manchado con lechada de cal, 43
- prueba de sulfato, 40
- prueba del cilindro de roca, 45
- pruebas de, 32, 33, 180
  - reactividad con los álcalis, 42-44, 53, 77, 177
- requisitos de agua, 36, 84, 87



- requisitos de cemento,36
- resistencia 41
  - a la compresión,41
  - a la congelación y deshielo,39
  - a la corrosión,41
  - a los ácidos,41
  - al derrapamiento,41
  - al desgaste,41
  - al fuego,42
  - al intemperismo,39
- rocas,32
- sanidad,40
- saturados y superficialmente secos,38
- secado,181
- secados
  - al aire,38
  - al horno,38
- segregación,41
- selección de,44
- separación en un medio pesado,45
- sustancias deletéreas,42, 43
- tamaño,31-37
  - máximo,36
  - óptimo,36-37, 84, 203-204
- temperaturas, 144, 154,
- textura superficial,37
- vacíos,32, 34-35, 38
- volumen en el concreto,1, 31-32
- Agrietamiento,40, 125, 167
  - ancho de grieta,167
  - causas,10
  - en D, 40
    - véase también* *contracción, juntas*
- Agua, 1-2, 7, 27-30
- Agua de mar, 29
- Agua de mezclado, 27-30
  - aceites,30
  - adecuación cuestionable,27
  - agua de mar,29
  - aguas,
    - alcalinas,29
    - ácidas,29
    - de desperdicios industriales,30
    - de enjuague,29
    - negras,30
  - algas,30
  - análisis típicos,27
  - azúcar,30
  - cantidad y requisitos,1, 74, 87
  - carbonatos,27
  - contenido de cloruros,28
  - especificaciones,27
  - impurezas,29-30
  - límites químicos,28
  - procedimientos de prueba,27-28
  - sales, 29
    - de hierro,29
  - sedimentos,30
  - sulfatos,28
  - suministros de agua en ciudades,27
  - temperatura,144-147, 151-152, 156
    - véase también* *relación agua-cemento*
- Aguas de enjuague, 29
- Aguas de desperdicios industriales,30
- Aguas negras,30
- Aguja de Gillmore, 23
- Agujeros y defectos, resanado de, 129
- Alabeo,172
- Algas, 30
- Alisado,120
- Allita, 21
- Aluminato de calcio, 21-22
- Aluminio,111
- Amasado,concreto de gran peso, 202
- Análisis de tamices, 32-37, 180
- Análisis estadístico,control de calidad,89
- Análisis petrográfico, 44, 188
- Apanamientos,114
- Aparato Vebe,182, 210
- Aparato de Vicat,23
- Aparato para el factor de compactación,182
- Aplanado,118-120
- Arena,
  - véase agregado fino*
- Azúcar,30
- Bandas transportadoras,107, 108, 110
- Barreras de vapor,118
- Bellita,21
- Beneficio de agregados,45
- Blindaje contra la radiación,201
- Bombeo,75, 107-110
- Bordeado,120
- Calefactores,163-165
- Calor de hidratación, 153
- Calor eléctrico,140
- Calor específico,146, 156, 208
- Cambios de humedad,170
- Cambios químicos,175-176
- Cambios volumétricos,10, 167-177
  - véase también* *agrietamiento y contracción*
  - alcali-agregado,177
  - ataque de sulfatos,176
  - cambios de temperatura,167
  - carbonatación,176
  - coeficiente de expansión,42, 167-169
  - congelación-deshielo,63
  - contracción plástica,148
  - contracción por secado,170
  - deformación elástica e inelástica,173
  - deformación unitaria
    - por compresión,156
    - por constante,174
    - por torsión,174
  - efecto de los cambios de humedad,170
  - efecto de los ingredientes del concreto, 171,176
  - fluencia,76, 174
  - humedecimiento-secado,170
  - módulo de elasticidad,173
  - relación de Poisson,174
- Canalones,107, 114
- Capas superpuestas,122, 129
- Características de la mezcla,83
- Carbonatación,77, 176, 188
- Carbonatos, impurezas,27, 28
- Cemento, 13-26
  - caliente,26
  - con adiciones funcionales,20
  - contenido de alcali, 43
  - de albañilería,19
  - de escoria,18
    - alto horno,18
  - de fraguado regulado,20
  - disponibilidad,20
  - embarque de,25
  - especial,20
  - expansivo, 19, 211
  - hidráulico 18, 44
    - mezclado,18, 43, 74, 202
  - impermeabilizante,20
  - inclisor de aire,17
    - para pozo petrolero,20
  - pasta de,1, 3, 13
  - plástico,20
  - portland,
    - acción cementante,3, 13
    - almacenamiento,25
    - a granel,25
    - en sacos,25
    - área superficial,3, 23
    - blanco,18
    - calor específico,146, 155, 207
    - clínker,13, 16, 20-21
    - composición química y compuestos,3, 13-16
    - consistencia,23,
    - contenido de álcalis,43
    - contenido de,1, 17, 55, 88
    - de alta resistencia temprana,16,
    - densidad relativa,25
    - disponibilidad,20
    - embarque,25
    - escoria de alto horno,18
    - especificaciones,16, 23
    - finura,23, 74
    - fraguado falso,23
    - hidratación,3, 13, 23-24
    - hidráulico,13, 18
    - historia,13
    - inclisor de aire,16, 17
    - invención,13
    - manufactura,13-16
    - materia prima,16
    - modificado con escoria,18
    - normal,16
    - partículas,3
    - pasta,1, 3, 13
    - peso, 25

- específico, 25 -
  - pérdida por ignición, 25
  - propiedades, 22-23
  - puzolana, 19
  - reemplazo por aditivos, 70, 74
  - resistencia a compresión, 23
  - resistencia a los sulfatos, 17
  - resistencia del, 23
  - resistencia moderada a los sulfatos, 16
  - sanidad, 23
  - sustitución parcial, 75
  - tiempo de fraguado, 23
  - tipos, 16
  - transporte, 25
- portland blanco, 18
- portland impermeabilizado, 20
- puzolana, 19
- Cementos especiales, 20**
  - de fraguado regulado, 20
  - expansivos, 19, 211
  - impermeabilizados, 20
  - para pozo petrolero, 20
  - plásticos, 20
- Cementos hidráulicos mezclados, 18, 43-44, 74, 202-203**
- Cementos plásticos, 20**
- Ceniza volante, 68-70**
  - véase también puzolanas y aditivos minerales*
- Chorro de arena, 123, 130**
- Cilindros,**
  - véase pruebas de resistencia*
- Cimbras, 113, 118**
- Clinker, 13, 16, 31-22**
- Cloruro de calcio, 70-71, 154**
  - efecto sobre la inclusión de aire, 60, 88
  - en el concreto presforzado, 89
- Cloruro de sodio, 52**
- Cobertores, 160, 162**
  - aislantes, 140, 160
- Coefficiente de expansión, 42, 168-170**
- Colados en clima frío, 151-165**
  - a nivel del terreno, 158
  - acelerantes, 153
  - agua caliente de mezclado, 156
  - alta resistencia a edad temprana, 153, 202
  - calefactores, 163
  - calor de hidratación, 153
  - cobertores, 160, 162
  - concepto de madurez, 164
  - congelamiento del concreto fresco, 151
  - desarrollo de resistencia, velocidad de, 151
  - descimbrado, 165
  - efecto de la temperatura baja, 151-153
  - materiales aislantes y requisitos, 160-162
  - período de calefacción, 164
  - por encima del terreno, 159
  - pruebas, 156
  - recintos, 161
  - subrasante congelada, 158
  - temperatura, 155
    - del agregado, 155
    - del concreto, 154
  - tiempo de fraguado, 152
- Colados en climas cálidos, 143-149**
  - aditivos, 149
  - agrietamientos por contracción plástica, 147-148
  - curado, 149
  - dificultades, 143
  - efectos adversos, 130
  - enfriamiento de materiales, 144
  - hielo triturado, 145
  - precauciones de colado, 143
  - protección, 147
  - requisito de agua, 144
  - resistencia, 144
  - temperatura
    - del cemento, 26, 145
    - del concreto, 145-147
  - tiempo de fraguado, 144
- Colados en invierno**
  - véase concreto colado en clima frío*
- Colocación del concreto, 113-133**
  - bajo el agua (con tubo-embudo), 108, 132
  - canalones de desnivel, 107, 114
  - capas, 113, 114
  - colados sobre concreto endurecido, 122
  - consolidación, 4, 114, 117
  - en clima,
    - cálidos, 143
    - frío, 147, 158, 159
  - vaciado, 113
  - vibrado, 115-117
- Color, 77**
- Compactación de bodega, 25**
- Coimpactación factor de, 182**
- Componentes del concreto, 1**
- Compuestos formadores de membranas, 138**
- Concepto de madurez, 164**
- Concepto de vacío mínimo, 32-35**
- Concreto**
  - aislante, 198, 201
  - bajo el agua, 108, 132
  - blanco, 18, 212
  - celular, 198, 201
  - coloreado, 212
  - compactado con rodillos, 210
  - colados sobre concreto endurecido, 122
  - con agregado precolocado, 242
  - de alta resistencia, 202
    - a edad temprana, 16, 202, 206
  - de cemento portland con polímeros, 213
  - de desecho *véase reciclado*
  - de gran peso
    - amasado, 202
    - con agregado precolocado, 202
  - de granulometría discontinua, 37
  - de latex modificado, 213
  - de mezcla empezada en planta fija y acabada en tránsito, 105
  - de revenimiento nulo, 209
  - endurecido, 4-11, 186-192
  - fluido, 71
  - fresco, 2-3
  - lanzado, 107, 211
  - ligero aislante, 195, 198
  - ligero de baja densidad, 196, 200
  - ligero de resistencia moderada, 198, 200
  - ligero estructural, 195-198
  - masivo, 207
  - mezclado en camión, 105, 108
  - modificado
    - con látex, 80
    - con polímeros, 212
  - nuclear, 210
  - para blindaje, 201
  - plástico *véase concreto fresco*
  - poroso, 212
  - premezclado, 104-105
  - reciclado, 46, 201
  - reforzado con fibras, 213
  - remezclado de, 106
  - saturado, 51, 155
  - sin finos, 212
  - de tipos especiales, 195, 214
    - véase también concreto ligero*
- Concreto con aire incluido, 1, 7, 49, 65, 86**
  - acabado, 61
  - aditivo, 59, 67, 68
  - agregado fino, 57
  - agregado grueso, 56
  - agua de mezclado, 57
  - aire
    - atrapado, 49
    - incluido, 49
  - burbujas de aire (vacíos de aire), 49, 51
  - características, 50
  - cemento, 56
  - clima cálido, 154
  - control de campo, 59
  - durabilidad, 7, 50, 54
  - efectos de los aditivos, 59
  - efecto del mezclado, 60
  - empleo en climas fríos, 151
  - espaciamiento y tamaño de las burbujas de aire, 47, 51
  - espaciamiento de vacíos de aire, 47
  - factores que afectan al contenido de aire, 56-61
  - indicador de aire, 61, 183
  - manejo, 61
  - materiales inclusores de aire, 17-18, 55, 67-68
  - propiedades, 50
  - proporcionamiento, 1, 63, 87
  - pruebas de contenido de aire, 61, 62, 184
  - reactividad álcali-silice, 53
  - relación agua-cemento, 6, 7, 53
  - relación edad-resistencia, 6, 128
  - resistencia a la congelación y deshielo, 7, 50-53, 63
  - resistencia a las sales, 52
  - resistencia a los descascaramientos, 48-50

resistencia a los productos descongelantes, 52  
 resistencia a los sulfatos, 53  
 resistencia del, 6, 7, 53  
 revenimiento, 57, 58  
 secado al aire, 53  
 sistema de vacíos--aire, 47  
 temperatura, 58  
 trabajabilidad, 54  
 transporte, 61  
 vibrado, 58  
 volumen de aire recomendado en el concreto, 63, 87  
 en la fracción de mortero, 51  
**Condiciones de exposición, 63, 88**  
**Conductividad térmica, 200**  
**Congelación del concreto fresco, 151**  
**Consistencia, 2**  
 cemento, 23  
 efecto sobre la inclusión de aire, 56  
 ensaye de la esfera, 182  
 prueba de revenimiento, 181  
 revenimiento del concreto ligero estructural, 197  
**Consolidación, 2, 114, 120**  
*véase también vibración*  
**Construcción de losas, 117-121**  
**Contenido**  
 de agua, 87  
 de aire, 1, 7, 61, 59, 74, 86, 89  
 de cemento, 1, 17, 55, 88  
 efecto sobre la inclusión de aire, 56  
 ensaye en el concreto, 186-187  
 prueba de Willis Hime, 186  
 de humedad, 5, 38-39, 170, 181, 189  
**Contracción**  
 concreto compensador de contracción, 211  
 efecto de la forma y del tamaño del elemento, 170-171  
 efecto de los ingredientes, 171  
 plástica, 76, 148  
 por secado, 1, 170-172  
 aditivos, 68-70  
 agregados, 41  
 térmica, 42, 168-169  
**Control de calidad, 89, 179-192**  
**Corazones,**  
 pruebas de resistencia en el concreto endurecido, 186, 191  
**Cubos de mortero, 23**  
**Cucharones, 106-107**  
**Curado, 4, 135-142**  
 acelerado, 185  
 aditivos minerales, 75  
 al vapor, 139  
 arpillera (yute), 136  
 caja de, 158  
 cimbras dejadas en su lugar, 128, 139  
 cobertores, aislantes, 140  
 compuestos formadores de membranas, 138  
 compuestos para, 138  
 con autoclave, 139, 140  
 concepto de madurez, 136

cubiertas húmedas, 136  
 duración, 140  
 efecto sobre  
 la fluencia, 174  
 la hidratación, 3, 135  
 la resistencia, 135, 140  
 en clima cálido, 149  
 en clima frío, 140  
 estancamiento o inmersión, 136  
 humedad relativa, 135  
 húmedo, 4, 135  
 importancia del, 135  
 interrumpido, 135  
 láminas de plástico, 137  
 losas, 121  
 materiales y métodos, 136  
 papel impermeable, 137  
 parches, 130  
 período de, 140  
 período mínimo, 140  
 por aspersión, 136  
 prueba de curado acelerado, 185  
 recintos, 161  
 retardantes de la evaporación, 148-149  
 saturación, 136  
 secado, 4  
 temperatura, 140

**Defectos, 119, 129, 133**

**Deflexión, 174**

**Deformación**

a compresión, 173  
 elástica e inelástica, 173, 175  
 por contante, 174  
 por torsión, 5, 174  
 unitaria, 173, 175

**Densidad, 32, 38, 183, 187**

*véase también peso volumétrico y/o específico*

**Descaramiento, 4, 119**

**Descimbrado, 128, 165**

**Desviación estándar, 89**

**Deterioro, 40**

**Difracción por rayos X, 21, 191**

**Dilatación térmica, 42, 168**

**Diseño de mezclas para concreto, 83-101**

**Dosificación**

*véase proporcionamiento de mezclas*

**Durabilidad, 7, 8, 49-51, 189**

**Embarque del cemento, 25**

**Emparejado, 118**

**Endurecimiento, 3, 10**

**Endurecimiento temprano, 23**

**Epóxicos, 80**

**Equipo**

para colocar al concreto, 107, 118  
 para manejo y colocación, 107, 118

**Erupciones, 42, 43, 70**

**Escoria, 18, 31, 72, 74**

**Especificaciones concreto premezclado, 103-105**

**Etringita, 22**

**Evaluación de pruebas de compresión, 191**

**Examen de láminas microscópicas, 21**

**Exámenes petrográficos, 44, 188**

**Expansión térmica, 42, 168-169**

**Exploración por microscopio electrónico, 22**

**Extendedor de concreto, de tornillos, 108, 111**

**Factores de conversión**

*véase apéndice*

**Ferrocemento, 213**

**Finura del cemento, 3, 23, 72**

**Fluencia, 76**

**Fraguado**

falso, 10, 23

relámpago, 156

**Fundamentos sobre el concreto, 1-11**

**Gel de tobermorita, 22**

**Granulometría de los agregados, 32-37, 180**

**Granulometría discontinua, 37 agregados y concreto, 37**

**Hermeticidad, 8**

**Hidratación, 3, 13, 23**

calor de, 3, 23, 75, 149, 153, 207

humedad relativa mínima para la, 4

productos de, 3, 21

resistencia del concreto, 3

velocidad de, 3, 22-23

**Hidrato de silicato de calcio, 3, 21-22, 44**

**Hielo,**

empleo para enfriar al concreto, 145

**Historia, 12, 49**

**Horno, 12-15**

**Humedad relativa, 5, 171, 189**

**Humo de sílice, 73-74**

**Impurezas orgánicas, ensaye, 43, 180**

**Ingredientes del concreto, 1**

**Juntas, 10, 120**

aserradas, 124

aserrado de, 124

de aislamiento, 124

de construcción, 122, 124

de contracción, 124

de contracción (de control), 124

de expansión, 124

de liga, 132

disposición de, 127

en muros, 124

espaciamiento entre, 125

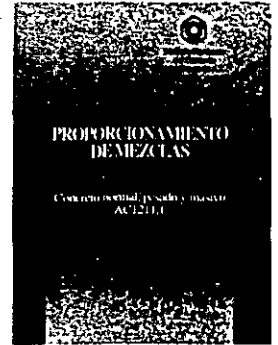
- frías, 113  
preparación de la superficie, 122  
relleno de, 127
- Látex**, 80
- Lechada y mortero**, 129
- Lechadas**, 80, 122
- Levantamiento de polvo en pisos de concreto**, 4, 119
- Liga**, 128
- Límites para cloruros**, 28, 88
- Limpieza**  
con chorro abrasivo, 123, 130  
con mortero, 131  
de superficies de concreto, 123, 128-129  
con agua, 130  
mecánica, 123, 130  
química, 130
- Materiales cementantes suplementarios**, 72-74
- Materiales galvanizados**, 154
- Máquina de análisis rápido (RAM)**, 186
- Medición de materiales para concreto**, 91-94
- Mesa de caída de Thaulow**, 210
- Mezcla de prueba**  
*véase proporciónamiento de mezclas*
- Mezclado del concreto**, 2, 103-109  
concreto de gran peso, 201  
efecto sobre el aire incluido, 60-61  
remezclado (reemplado), 106  
secuencia, 2, 103-104  
velocidad,  
de agitación, 105  
de mezclado, 105
- Mezclado estacionario**, 104
- Mezclado en camión**, 105, 108
- Mezcladora de dosificación móvil**, 105
- Mezcladores**, 103-106  
central, 104  
contínuos, 105  
de alta energía, 105,  
de dosificación móvil, 105  
en camión, 104, 105, 108  
estacionarios, 104
- Método**  
de presión para determinar el contenido de aire, 61, 187  
gravimétrico para determinar el contenido de aire, 62, 184  
volumétrico para determinar el contenido de aire, 61  
microscopio electrónico, 22
- Minerales**, 32
- Mortero**, 124  
empacado en seco, 129  
cubos de, 23  
para adherencia, 124  
prueba de barra, 45
- Módulo**  
de elasticidad, 6, 173  
de finura, 35-36, 85-86  
de ruptura, 5
- Muestreo de concreto fresco**, 186
- Negro de humo**, 79
- Nivelación**, (enrase) 118
- Normas ASTM**  
*véase apéndice A*
- Normas Mexicanas**  
*véase apéndice B*
- pH**, 42, 78, 176, 188
- Pachómetro**, 186, 191-192
- Pasta**, 1, 3, 13
- Patrones y texturas**, 121, 131
- Perlita**, 199
- Permeabilidad**, 8-9, 74, 76; 189, 212
- Peso**  
del agregado  
volumétrico, 38  
específico, 38  
del cemento, 25  
del concreto, 6  
específico, 25, 38, 187  
unitario, 5, 32, 38, 91, 183  
volumétrico, 38
- Pérdida por ignición**, 25
- Piedra pómez**, 198
- Pinturas**, 132
- Pisos de dos capas**, 122
- Pisos**, 117, 128
- Plasticidad**, 2, 86
- Prácticas de construcción**, 103-112
- Precauciones**, 140, 160
- Premezclado-concreto**, 104
- Prevención de problemas de humedad**, 118, 189
- Procedimientos mediante mezclas de prueba**, 40
- Productos químicos descongelantes y descascamientos**, 7, 12, 78
- Proporciónamiento de mezclas**, 83-101  
aditivos, 88, 92  
agregados, 84-86  
aire incluido, 86  
características de selección, 83-88  
cálculos, 91  
concreto de alta resistencia, 198, 202  
concreto ligero aislante, 195  
concreto ligero estructural, 195  
contenido de agua, 87  
contenido de aire, 86  
contenido de cemento, 88  
datos de campo, 89  
dosificación, 91  
ejemplos de, 91-100  
mediciones, 91-94  
mezclas de prueba, 90  
método de la relación  
agua-cemento, 95-99  
método por pesos, 91
- métodos de, 91, 95  
módulo de finura, 86  
objetivo del, 83  
para trabajos pequeños, 99  
peso volumétrico, 91  
por asignación arbitraria, 89-90  
por volúmenes absolutos, 91, 92, 95  
procedimientos para las mezclas de prueba, 90  
puzolanas (aditivos minerales), 75, 84-85, 95  
relación agua-cemento, 83-84  
rendimiento, 91  
resistencia, 83-88  
revenimiento, 86  
tipo de cemento, 88  
trabajabilidad, 86, 94
- Protección durante el período de curado**, 140, 160-162  
*véase también curado*
- Prueba**  
de absorción por microondas, 191  
de agregados, 38, 180  
de arranque (pullout), 190  
de barras de mortero, 45  
de control, 179-194  
de cilindro de roca, 45  
de curado acelerado, 185  
de esclerómetro, 189  
de manchado con lechada de cal, 43  
de penetración, 144, 189  
de rayos x, 192  
de sanidad por expansión en autoclave, 23, 78  
de sondeo Windsor, 189  
del concreto endurecido,  
absorción, 187  
análisis petrográficos, 188  
del contenido de cemento, 186  
Vebe, 182, 210
- Pruebas de control**, 179-194
- Pruebas del concreto endurecido**, 186-192  
absorción, 187  
análisis petrográfico, 118  
cambio volumétrico, 188  
cambio de longitud, 188  
carbonatación, 188  
concepto de madurez, 164  
contenido  
de aditivos minerales, 188  
de aditivos orgánicos, 188  
de aire, 187  
de cemento, 188  
de cloruros, 188  
de humedad (relativa), 189  
corazones, 186, 191  
de arranque (pullout), 190  
densidad, 187  
durabilidad, 187  
evaluación de resultados de pruebas  
de compresión, 191  
muestreo, 186  
permeabilidad, 189  
peso específico, 187

- prueba de penetración, sondeo Windsor, 189  
 prueba de rebote, 189  
 pruebas dinámicas, 191  
 pruebas no destructivas, 192  
 resistencia, 191  
 vacíos, 187
- Pruebas del concreto fresco, 181-186**  
 consistencia, 181  
 contenido  
 de aditivos minerales, 186  
 de agua, 186  
 de aire, 59, 183  
 de cemento, 186  
 de cloruros, 186  
 curado acelerado, 185  
 densidad (peso volumétrico), 183  
 descascaramiento, 51, 189  
 frecuencia, 179  
 muestreo, 181  
 resistencia, 184  
 revenimiento, 181  
 sangrado, 186  
 temperatura, 182  
 tiempo de fraguado, 144, 151-152
- Pruebas**  
 dinámicas, 191  
 no destructivas, 192-193  
 nucleares, 191
- Puzolanas, 18, 45, 73-74, 84, 95**
- Quemaduras con cemento, 133**
- Radiografía gamma, 192**
- Reactividad a los álcalis,**  
 véase agregados, reactividad con los álcalis
- Reactividad de los agregados**  
 véase agregados, reactividad con los álcalis
- Recintos, 161**
- Reciclado de concreto viejo, 46**
- Recubrimientos, 132**
- Relaciones edad-resistencia, 4, 6, 25, 76, 135, 141, 152, 153, 157, 205-207**
- Relación agua-cemento, 6, 25, 83, 84**  
 diseño por mezclas de prueba, 85  
 hermeticidad, 8  
 máxima, 84  
 mínima, 3  
 proporcionamiento de mezclas, 83  
 resistencia a la  
 congelación-deshielo, 7  
 resistencia, 6, 35, 83-85
- Relación de Poisson, 174**
- Relleno de densidad controlada**  
*véase suelo-cemento*
- Relleno fluido,**  
*véase suelo-cemento*
- Remezclado del concreto, 106**
- Rendimiento, 91**
- Reparación, 128-129**
- Reapuntalamiento, 165**
- Resanes, 128-130**
- Resistencia, 5-6**  
 a la compresión, 5-6, 53-54, 83-85  
 a la congelación y deshielo, agregados, 39  
 concreto, 7, 50-52, 63, 78  
 a la corrosión y sustancias corrosivas, 48, 77-78  
 a la flexión, 5  
 a la tensión, 5  
 al derrapamiento, 41  
 al desgaste, 41  
 acelerada, 184-185  
 al fuego, 42, 169  
 alta, 5, 202-204  
 cilindros, 5, 186  
 contra los descascaramientos, 54  
 correspondencia con la relación agua-cemento, 5  
 de los agregados, 29, 205  
 desarrollo de, 135  
 efecto del curado sobre la, 135  
 efectos de los aditivos minerales, 76  
 especificada a compresión, f'c, 5, 84-86, 89  
 evaluación de la, 141  
 pruebas de, 186  
 relación con la edad, 4, 5, 25, 76, 135, 141, 151-152, 157, 204  
 relación entre la flexionante, a cortante, a tensión y a compresión, 5  
 torsionante, 5
- Revenimiento, 3, 58-60, 87**  
*véase también consistencia*
- Revibrado, 116**
- Rociado**  
*véase curado*
- Rocas, 32**
- Salamandra, 163**
- Salas, 29**
- Salas de hierro, 29**
- Sangrado, 2, 50, 75-76, 186**  
 en losas (defectos), 119
- Sanidad de los aditivos minerales, 78**
- Sanidad del cemento portland, 23**
- Saturado y superficialmente seco, 38**
- Sedimentos, 30**
- Segregación, 75, 114**
- Selladores, 52, 132**
- Sobrecapa de concreto, 122, 129**
- Subrasante, 117, 158**  
 congelada, 159
- Sub-base, 117, 158**
- Suelo-cemento, 210**
- Sulfato de sodio, 40**
- Sulfatos, ataque de, 17, 28, 53, 77**
- Superplastificantes, 71, 74**
- Tablas de conversión,**  
*véase apéndice*
- Temperatura**  
 cálculos para concreto fresco, 144-146, 156  
 concreto masivo, 207  
 efectos sobre  
 la inclusión de aire, 58  
 la resistencia a compresión, 143, 151, 168-169  
 los cambios volumétricos, 167  
 los requisitos de agua, 143
- Termómetros, 157, 183**
- Tiempo de fraguado, 3, 75, 144, 153**
- Tiras rústicas para juntas, 127**
- Torsión y deformación unitaria por torsión, 5, 174**
- Trabajabilidad, 2, 54, 75, 86, 96**
- Transformaciones de compuestos, 22**
- Transporte del concreto, 107-112**
- Tratamiento de superficies, 53**
- Urea, 52**
- Vacíos, 187**
- Velocidad**  
 de evaporación, 148  
 de secado, 4, 170
- Vermiculita, 198**
- Vibrado y vibradores, 115-117**  
 efecto sobre el contenido de aire, 58  
 externo, 116  
 interno, 115  
 superficial, 116  
*véase también consolidación*
- Volumen absoluto, 89, 91-95**
- Yeso, 13, 15, 21-22**



## CARTILLA DEL CONCRETO

Conozca los principios que rigen la preparación de mezclas de concreto y las propiedades del cemento para su aplicación en estructuras de concreto



## PROPORCIONAMIENTO DE MEZCLAS

Prácticos ejemplos para la selección y ajuste en las proporciones de mezclas de concreto de peso normal, pesado y masivo.

## COMPACTACION DEL CONCRETO

Procedimientos para extraer el aire atrapado en el concreto recién colado en la cimbra, y la influencia de factores, como las condiciones de colado, los requerimientos de reducción de aire atrapado, el manejo de la mezcla, etc.

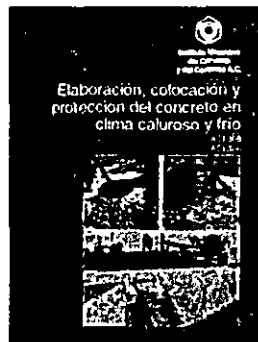


*¡Elimine los colados defectuosos!*



## EL CONCRETO EN LA OBRA

Recomendaciones y consejos prácticos sobre la preparación y el colado del concreto, abricación de especímenes de concreto para pruebas; juntas de construcción y preparación de cimbras.

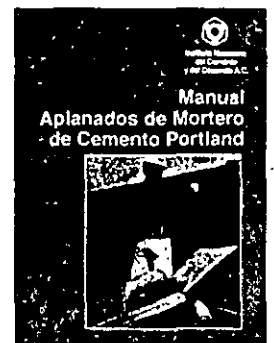


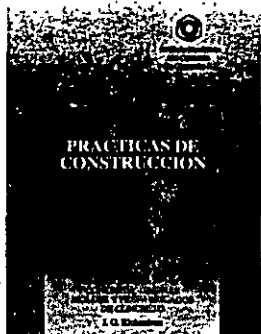
## ELABORACION, COLOCACION Y PROTECCION DEL CONCRETO EN CLIMA CALUROSO Y FRÍO

Tema dirigido especialmente a todos los profesionales que deben conocer los efectos de los factores ambientales sobre las propiedades del concreto fresco como son: condiciones de alta o baja temperatura, baja humedad, escaso viento, etc.

## MANUAL: APLANADOS DE MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

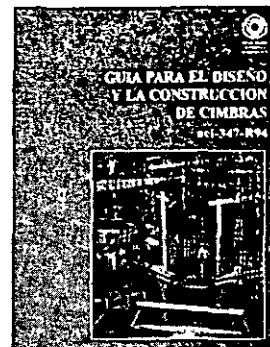
Guía para el diseño, mezclado y aplicación de aplanados de Cemento Portland. Presenta los materiales, texturas y acabados necesarios para lograr los objetivos arquitectónicos.





## PRACTICAS DE CONSTRUCCION

Guía gráfica para la construcción con concreto, apoyándose en croquis y apuntes. Ofrece además interesantes recomendaciones sobre moldes prefabricados.

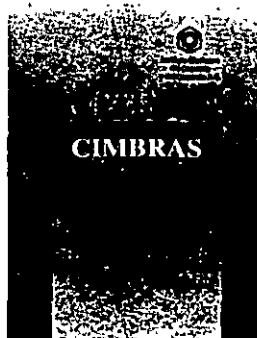


## GUIA PARA EL DISEÑO Y LA CONSTRUCCION DE CIMBRAS

La cimbra se debe diseñar de modo que las losas de concreto y otros elementos tengan los tamaños, formas, alineamientos y posiciones correctas dentro de las tolerancias establecidas.

## CIMBRAS

Este libro es una guía para el diseño y construcción de cimbras, en donde encontrará: sistemas de cimbras, detalles, gráficas, cimbras especiales, geometría de la cimbra, acabados aparentes y cimbras deslizantes.



*¿Es posible minimizar los desperdicios en la cimbra?*



## MANUAL PARA SUPERVISAR OBRAS DE CONCRETO

Este manual es una guía para la supervisión de obras de concreto y una herramienta valiosa, para quienes estén involucrados en la construcción con concreto como son ingenieros, arquitectos, superintendentes de construcción, supervisores, técnicos de campo y laboratorio y trabajadores.



## GUIA PRACTICA PARA LA COLOCACION DEL CONCRETO

Dosificación, bombeo, bandas transportadoras, curado y concreto ligero. Una serie de técnicas para el manejo y medición por peso y volumen de materiales para la fabricación de concretos de peso normal, ligero, estructural y pesado, en mezcladoras de planta y en la obra, así como colocación de concreto usando carretillas, cucharones, etc



## DISEÑO Y CONTROL DE MEZCLAS DE CONCRETO

Referencia sobre tecnología de concreto por más de 60 años, que refleja los avances y requerimientos de ingenieros y arquitectos sobre las características y aplicaciones de los tipos de cementos, agregados, aditivos, dosificación, mezclado, transporte y colado del concreto en la construcción



## ADOQUINES DE CONCRETO

Aplicaciones de los adoquines de concreto en la pavimentación de caminos; patrones para la colocación, reinstalación y pruebas de resistencia a la compresión.

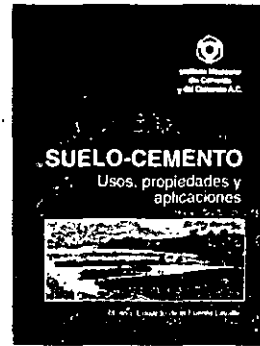


## FERROCEMENTO

Materiales, propiedades y aplicaciones del ferrocemento para la industria, la agricultura y la construcción de viviendas.

## SUELO-CEMENTO

Este libro reúne los resultados más significativos de las investigaciones realizadas sobre el tratamiento de suelos con cemento.



# PAVIMENTOS



## PAVIMENTOS DE CONCRETO Procedimientos de autoconstrucción

Una obra dirigida a todos aquellos que intervienen en los procesos de autoconstrucción y en la supervisión de la construcción de pavimentos de concreto.

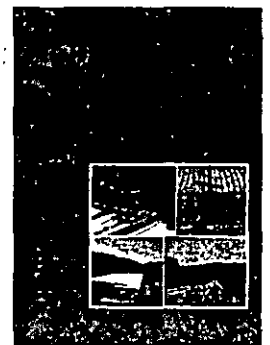
## CONSTRUCCION DE LOSAS Y PISOS DE CONCRETO

Una guía completa para obtener buena calidad en pisos y losas para diferentes tipos de servicio. Recomendaciones para la preparación del terreno de apoyo, la calidad de los materiales, proporciones de la mezcla, colado, curado, planicidad y horizontalidad de la superficie.



## PAVIMENTOS ACPA

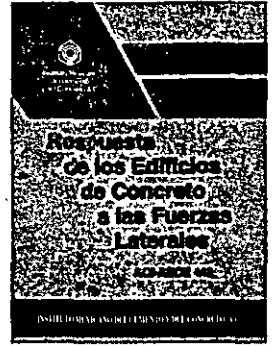
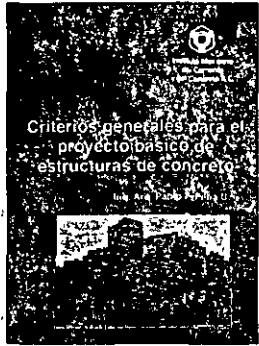
Se presta atención especial al diseño y construcción de las subrasantes y de las sub-bases, para obtener un apoyo uniforme durante toda la vida útil del pavimento, así como el diseño y construcción de juntas para pavimentos de concreto en carreteras. Se describe la construcción de una sobrecarpeta de concreto sobre un pavimento existente de asfalto y se hace énfasis en la construcción de pavimentos de concreto de apertura rápida al tráfico.





## CRITERIOS GENERALES PARA EL PROYECTO BASICO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO

Una obra que ofrece a los ingenieros y arquitectos, una serie de fundamentos elementales para el manejo, estimación y diseño estructural de proyectos y anteproyectos.

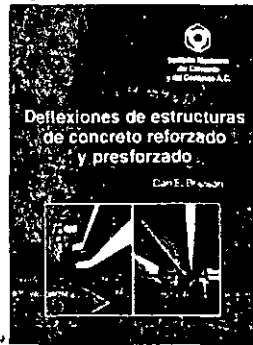


## RESPUESTA DE LOS EDIFICIOS DE CONCRETO A LAS FUERZAS LATERALES

Procedimientos básicos de diseño y técnicas para evaluar el comportamiento y los cambios de las estructuras sujetas a cargas de viento, explosión y sismo.

## DEFLEXIONES DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO Y PRESFORZADO

Manual sobre el cálculo de deflexiones de estructuras de concreto a corto y largo plazo, incluye ejemplos numéricos, propiedades de los materiales, peraltes mínimos, deflexiones permisibles, etc.



*¿Conoce las aplicaciones y usos de las silletas para acero de refuerzo?*

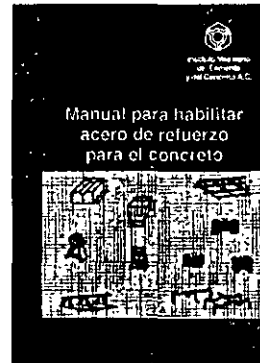


## DISEÑO DE EDIFICIOS DE CONCRETO DE POCA ALTURA

Presentación del análisis de marcos y diseño simplificado de trabes, losas, columnas, muros estructurales, zapatas y diseño de cimbras económicas.

## MANUAL PARA HABILITAR ACERO DE REFUERZO PARA EL CONCRETO

Recomendaciones para el uso de silletas, habilitación y colocación del acero de refuerzo, para facilitar la labor del ingeniero y asegurar la interpretación precisa de los requerimientos de los planos estructurales.



## DISEÑO DE ESTRUCTURAS RESISTENTES A SISMOS

Se presenta la importancia de los sismos como fenómenos físicos que perturban y afectan el comportamiento estructural, y el diseño en el que se utilizan el análisis dinámico y otros métodos.



# CONCRETO ARQUITECTONICO



## CONCRETO ARQUITECTONICO

En este libro se expone como las innovaciones tecnológicas del concreto, moldes y acabados han incrementado la calidad y posibilidades de utilización de este material, de tal manera que puede competir con los revestimientos de fachada más exclusivos: cómo los diseñadores pueden conseguir un excelente acabado similar a los de materiales de construcción más costosos con el uso del concreto, entre otros temas.



## COLOR Y TEXTURA PARA PISOS DE CONCRETO

Esta publicación es una guía dirigida a constructores, arquitectos e ingenieros para planear y construir pisos de concreto con superficies de acabados decorativos.

## CONCRETO ARQUITECTONICO COLADO EN OBRA

Se presenta la importancia de las especificaciones para los materiales, cimbra, colado, curado, tratamiento adicional, supervisión y efecto de estos factores en la producción del concreto arquitectónico colado en obra.



Este puede ser el momento para tener la mejor información sobre la Construcción, mediante las publicaciones del fondo editorial IMCYC.

Informes, ventas e inscripciones:

Insurgentes Sur 1673-5º piso, col. Guadalupe Inn, 01020 México, D.F. At'n. Ing. Raúl Huerta Martínez  
Tels. 662-5731, 663-4437, 661-6549. Fax. 661-3282 y 661-7159

Solicito me envíen las siguientes publicaciones:

Nº de miembro o suscriptor

Título	Cantidad	Precio NS	Total NS

El precio de los 34 libros de la colección es de NS 2.985 00  
Si usted compra toda la colección le haremos un descuento de NS 600 00

Gastos de envío  
1 a 3 libros NS 45 00  
4 a 6 libros NS 50 00  
7 a 9 libros NS 70 00  
toda la colección NS 150 00

Sub-tótal NS  
Gastos de envío NS  
**TOTAL A PAGAR NS**

Nombre \_\_\_\_\_  
 Empresa \_\_\_\_\_  
 Profesión \_\_\_\_\_ Cargo \_\_\_\_\_  
Care y número exterior e interior  
 Dirección \_\_\_\_\_  
 Colonia \_\_\_\_\_ C.P. \_\_\_\_\_  
 Ciudad/Estado/Pais \_\_\_\_\_  
 Lada/Código/Telefonos \_\_\_\_\_ Fax \_\_\_\_\_  
 RFC \_\_\_\_\_

Forma de pago:  Cheque Certificado  Giro Telegráfico  Giro Postal  Efectivo

Autonzo se cargue a mi tarjeta de crédito:  Amex Express  Banamex  Bancomer  Carnel

Numero de tarjeta \_\_\_\_\_  
 La cantidad de NS \_\_\_\_\_  
(Con letra)

Nombre y Firma del cuenta habiente

Abono a Cuenta IMCYC

Abono a cuenta de cheques BANAMEX No. 368357-9, suc. 270 San Angel, o BANCOMER No. 0653674-2 suc. 116 San José Insurgentes, en México, D.F. A nombre del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.

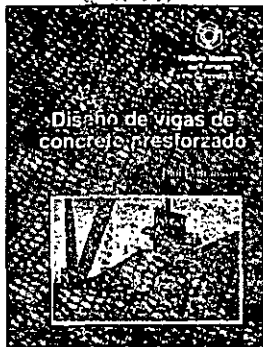
Favor de anexar al fax la ficha de depósito sellada por el Banco

\*Vigencia Diciembre 95

Forma de Pedido

Fotocopie esta forma, y envíela cuanto antes

Escriba a máquina o con letra clara, use tinta negra o roja para facilitar la transmisión del fax



### DISEÑO DE VIGAS DE CONCRETO PRESFORZADO

Reúne todos los datos necesarios para dominar el diseño de elementos de concreto presforzado compuestos y no compuestos que están sujetos a flexión.

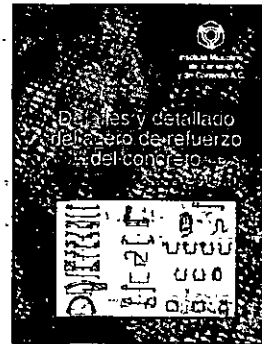


### ESPECIFICACIONES PARA CONCRETO ESTRUCTURAL EN EDIFICIOS

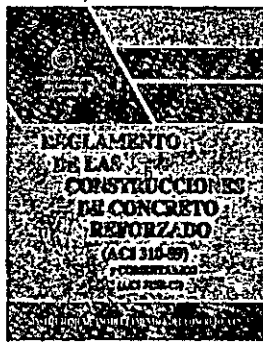
Un estándar de referencia que los ingenieros y arquitectos pueden aplicar en cualquier proyecto de construcción, abarcando el diseño, y construcción de cimbras, los materiales para concreto, los aceros de refuerzo y presfuerzo; los acabados y la reparación de superficies defectuosas.

### DETALLES Y DETALLADO DEL ACERO DE REFUERZO DEL CONCRETO

Todos los requisitos para el detallado y cuantificación del acero de acuerdo a los planos, especificaciones y cumpliendo con el reglamento de construcciones.



*Se ha preguntado de quién es la responsabilidad por armados deficientes?*



### REGLAMENTO DE LAS CONSTRUCCIONES DE CONCRETO REFORZADO

Una referencia importante para el diseño y la construcción de estructuras dentro de un reglamento general de construcción

### DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO CONFORME AL REGLAMENTO ACI 318

El propósito primordial de este manual es ayudar a ingenieros y diseñadores en la adecuada aplicación de las normas de diseño ACI 318-89. Se ha puesto énfasis en 54 ejemplos prácticos como utilizar el reglamento en el diseño por flexión, carga axial y flexión, efectos de esbeltez, cortante, torsión, mensulas, cartelas, reborde de vigas, cortante en losas, elementos de gran peralte, muros y zapatas así como concreto presforzado: a flexión, cortante y losas presforzadas



### ESTRUCTURAS SANITARIAS DE CONCRETO PARA EL MEJORAMIENTO DEL AMBIENTE

Recomendaciones para el diseño estructural, materiales, para la construcción de tanques, depósitos y estructuras de contención de aguas industriales o domésticas, y de tratamiento de aguas residuales donde se requiere un concreto denso, impermeable y con alta resistencia para minimizar las posibilidades de agrietamiento.