



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Diseño de concreto hidráulico de alto desempeño y control de calidad

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Daniel Flores Cortés

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Isaac Felipe Lima Castillo



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025

Agradecimientos

A Dios: Porque gracias a él he podido seguir adelante.

A mi madre Juana Cortés: Gracias por todo el amor y apoyo recibido, sin usted no hubiera sido posible esta tesis.

A mis hermanos Ma. Fernanda y José Ángel: Por la paciencia y el apoyo recibido para continuar estudiando.

A mis hijos Daniela, Leonardo y Eduardo: Por ser una motivación para mi preparación y superación diaria.

A mi Tía Guadalupe y Tío Valentín por ser una inspiración, ejemplo de convivencia y unión familiar.

A las empresas que me dieron formación en la carrera práctica de Ingeniería Civil: Ingenieros Civiles Asociados (ICA), Prefabricados y Transportes (CAABSA), Constructora Internacional de Infraestructura (CIISA).

Al Dr. Isaac Lima Castillo: Por sus consejos y aplicación de sus conocimientos en esta tesis, un apoyo invaluable.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y la Facultad de Ingeniería: Por sus conocimientos y la oportunidad de ser uno de sus alumnos con un espíritu indomable para terminar la carrera.

A Luis Mendoza Rico quién fue mi mentor en este gran proceso de formación en el Laboratorio de Control de Calidad.

A mis amigos y compañeros de carrera: Gracias por su apoyo y dirección adecuada.

“Y al pie se recueste de la dura peña, de quién ella toma lección de dureza “.....Luis de Góngora.

Índice

Contenido	Pág.
I Agradecimientos	2
Ii Índice de figuras	5
Iii Índice de tablas	7
Iv Glosario de Términos (Nomenclatura y/o abreviatura)	8
V Introducción	9
Vi Objetivo y Campo de Aplicación	10
Capítulo I ANTECEDENTES DEL CONTROL DE CALIDAD DEL CONCRETO PRESFORZADO	11
1.1 Antecedentes del control de calidad	11
1.2 Prefabricado	12
1.3 Usos de los prefabricados	12
1.4 Tipos de prefabricados	12
1.4.1 Simplemente armados	13
1.4.2 Presforzados	13
1.4.3 Postensados	13
1.4.4 Lugar de fabricación	13
1.5 Concreto	14
Capítulo II NORMATIVAS REGULADORAS DE LA CALIDAD DEL CONCRETO	15
2.1 Normativa	15
2.1.1 Normativa mexicana (NMX)	16
2.2 Evolución de las normas	16
Capítulo III PRUEBAS DE CONTROL DE CALIDAD DEL CONCRETO	18
3.1 Generalidades	18
3.2 Descripción de las pruebas	18
3.3 Control de Calidad	18
3.4 Aseguramiento de Calidad	19
3.5 Validez de las Pruebas de Control de Calidad	19
3.6 Muestreo de Concreto Fresco (NMX-C-161-ONNCCE-2013)	20
3.7 Temperatura (NMX-C-435-ONNCCE-2008)	21
3.8 Revenimiento (NMX-C-156-ONNCCE-2010)	22
3.9 Masa unitaria del concreto fresco (NMX-C-162-ONNCCE-2014)	23
3.10 Elaboración y curado de especímenes de ensayo (NMX-C-159-ONNCCE-2016)	24
3.10.1 Cilindros, cubos y prismas de concreto	24
3.11 Cabeceo de Especímenes - Concreto (NMX-C-109-ONNCCE-2013)	25
3.12 Resistencia a la compresión de especímenes (NMX-C-083-ONNCCE-2014)	26
3.13 Resultados	27
Capítulo IV DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO	28
4.1 Marco Metodológico	28
4.2 Selección de materiales	29
4.3 Agregados (NMX-C-111-ONNCCE-2014)	29

Índice

Contenido	Pág.
4.4 Cemento Portland (NMX-C-414-ONNCCE-2014)	32
4.5 Agua de mezclado (NMX-C-122-ONNCCE-2019)	33
4.6 Aditivos para el concreto (ASTM-C-494/C 494M-99)	34
4.6.1 Clasificación de aditivos según norma (ASTM-C-494/C 494M-99)	35
4.6.2 Curado a Vapor (ACI-517-70)	36
4.7 Volumen Absoluto	38
4.7.1 Diseño de mezcla con base en datos de experiencia en campo	38
Capítulo V DOVELAS PREFABRICADAS	45
5.1 Proceso de fabricación de los prefabricados y especificaciones de proyecto	45
5.2 Marco geográfico	46
5.3 Sistema de prefabricación dovelas postensadas	46
5.4 Especificaciones de proyecto	51
5.4.1 Concreto	51
5.4.2 Acero de Refuerzo	51
5.4.3 Acero de Presfuerzo	52
5.4.4 Apoyos de Neopreno Zunchado	52
Capítulo VI RESULTADOS SATISFACTORIOS	53
6.1 Caso de estudio No.1	53
6.1.1 Análisis de resultados de las pruebas de laboratorio	53
Capítulo VII PRODUCTO NO CONFORME	57
7.1 Caso de estudio No.2	57
7.1.1 Deterioro del concreto	57
7.2 Descripción del problema	58
7.3 Causas de resistencias a compresión de concreto por debajo de la especificada	60
7.4 Extracción de núcleos de concreto endurecido	61
7.4.1 Criterio de Evaluación	61
7.5 Medición Ultrasónica Directa	63
7.6 Reparación de elementos estructurales	67
Capítulo VIII ANÁLISIS DE RESULTADOS	69
8.1 Caso de estudio No.1 Resultados Satisfactorios	69
8.2 Caso de estudio No.2 Producto No Conforme	69
Conclusiones y Recomendaciones	70
Referencias	71

Índice de figuras

Figura No.	Título	Pág.
1.1	Evolución del concreto en el tiempo y sus aplicaciones.	11
1.2	Avance de la resistencia a compresión del concreto a través del tiempo.	12
1.3 a)	Componentes del concreto: Cemento, agua, agregado fino y agregado grueso.	14
1.3 b)	Piedra de cantera de la Isla de Portland.	14
2.1	Esquema de Normas aplicables a un proyecto.	17
3.1	Muestreo de concreto en Planta Premezcladora.	20
3.2	Muestreo de concreto en Obra.	21
3.3	Toma de temperatura en concreto fresco.	21
3.4 a)	Toma de muestra del concreto fresco en laboratorio.	23
3.4 b)	Determinación del revenimiento del concreto fresco.	23
3.5 a)	Elaboración de la masa unitaria del concreto fresco.	24
3.5 b)	Determinación y pesaje de la masa unitaria del concreto fresco.	24
3.6 a)	Elaboración de muestras cilíndricas.	25
3.6 b)	Elaboración de muestras cúbicas.	25
3.6 c)	Elaboración de muestras prismáticas.	25
3.7 a)	Vaciado de mortero de azufre líquido en plato de cabeceo.	26
3.7 b)	Colocación del cilindro de concreto en el mortero de azufre.	26
3.7 c)	Medición del paralelismo y la perpendicularidad de ambas caras cabeceadas del espécimen.	26
3.8 a)	Muestras de especímenes cabeceados, previo a ensayarse a compresión.	27
3.8 b)	Ensayo a compresión de especímenes cilíndricos en prensa eléctrica de capacidad 200 ton.	27
3.8 c)	Especimen de concreto ensayado, dentro de la prensa.	27
4.1	Granulometría de arena triturada caliza N°4, (NMX-C-111 o ASTM-C-033).	30
4.2	Granulometría de grava caliza ½", (NMX-C-111 O ASTM-C-033).	31
4.3	Gráfico del ciclo térmico del curado a vapor del concreto.	36
5.1	Proceso de Fabricación de Dovelas.	45
5.2 a)	Colocación de la Dovela con la Cimbra autolanzable.	46
5.2 b)	Claro completo de Dovelas.	46
5.3 a)	Vista en planta de un claro de 35 m de vano a vano del acomodo de Dovelas.	47
5.3 b)	Vista en planta de un claro de 40 m de vano a vano del acomodo de Dovelas.	47
5.3 c)	Vista en planta de un claro de 45 m de vano a vano del acomodo de Dovelas.	48
5.4	Sección longitudinal de las Dovelas de vano a vano en claro de 45 m, de apoyo entre ejes de columnas.	48
5.5	Corte de la sección transversal de la Dovela.	49
5.6 a)	Habilitado de acero en molde para Dovela.	49
5.6 b)	Estructura de acero habilitada.	49
5.6 c)	Limpieza del molde metálico.	49
5.6 d)	Colocación de armado y de corazón.	49

Índice de figuras

Figura No.	Título	No.
5.6 e)	Colocación de Dovela anterior como tapa.	50
5.6 f)	Colado de la Dovela parte superior losa.	50
5.6 g)	Final de colado y detallado de losa.	50
5.6 h)	Detallado de base de Dovela.	50
5.6 i)	Dovela lado ancho, sección de cara dentada para colocación con la siguiente.	50
5.6 j)	Dovela desmoldada secciones transversal, lista para rotulación.	50
6.1	Gráfico de la resistencia a compresión a 28 días del concreto de Dovelas Prefabricadas ($f'c=500 \text{ kg/cm}^2$), durante el periodo de 2018, 2019, 2021 y 2022.	54
6.2	Consumo de cemento por m^3 , en la fabricación de Dovelas, periodo 2018, 2019, 2021 y 2022.	54
6.3	Carta estadística de medias, que se concentra en el promedio de las resistencias a compresión, y en la desviación estándar.	55
6.4	Carta estadística de medias de revenimiento del concreto fresco.	55
6.5	Carta estadística de medias para prueba de masa unitaria en el concreto fresco.	56
7.1	Causas físicas de deterioro del concreto.	57
7.2	Diagrama de factores que influyen en la resistencia del concreto.	58
7.3	Gráfico de los resultados a compresión del concreto $f'c - 600 \text{ kg/cm}^2$, a edades mayores.	59
7.4	Gráfico de los resultados a compresión del concreto vs resistencia de proyecto en, porcentaje %.	60
7.5	Carta estadística de Medias de los resultados a compresión del concreto de los 8 elementos que incumplen la resistencia de proyecto.	61
7.6	Alzado Frontal y Lateral del Capitel.	63
7.7	Variación de la velocidad de pulso ultrasónica directa.	64
7.8	Desprendimiento de concreto.	67

Índice de tablas

Tabla No.	Título	Pág.
2.1	Métodos básicos del control de calidad en concreto.	16
3.1	Plan de Inspección y Prueba (PIP) del control de calidad en prefabricados de concreto.	19
3.2	Resultados a compresión ejemplo.	27
4.1	Propiedades Físicas del agregado arena caliza.	31
4.2	Propiedades Físicas del agregado Grava Caliza de ½" (T.M.A.)	32
4.3	Ficha técnica del cemento (CPC 40 RS).	33
4.4	Estudio físico-químico del agua de mezcla (NMX-122-ONNCCE-2004).	34
4.5	Clasificación de aditivos para concreto.	35
4.6	Ficha técnica de aditivo clase Ay F.	35
4.7	Especificaciones técnicas del concreto.	37
4.8	Selección del revenimiento recomendado para concretos con y sin HRWR.	38
4.9	Selección de la desviación estándar.	39
4.10	Selección de la resistencia a compresión media requerida cuando no hay datos disponibles para establecer la desviación estándar.	39
4.11	Tamaño máximo sugerido para el agregado grueso (grava).	40
4.12	Volumen recomendado de agregado grueso por unidad de volumen de concreto.	40
4.13	Estimación de la cantidad de agua y de aire atrapado en la mezcla.	42
4.14	Datos de diseño de mezcla sin considerar el agregado fino (arena).	43
4.15	Diseño de mezcla final con el método de volumen absoluto.	44
5.1	Tipología de sección longitudinal para vano a vano de claro de 45 m.	48
5.2	Tipos de concretos.	51
6.1	Concentrado de pruebas al concreto fresco y endurecido, pruebas de revenimiento, masa unitaria, temperatura y resistencia.	53
7.1	Resultados a compresión del concreto endurecido que incumplen con la especificación de proyecto.	59
7.2	Resultados de la extracción de núcleos del concreto 600 kg/cm².	62
7.3	Niveles de Velocidad de Pulso ultrasónico (Vu) directa.	64

Glosario de Términos

Abreviatura Significado

C	- Masa del cemento.
Ca	- Masa de los agregados gruesos.
σ	- Desviación estándar de la muestra.
Fa	- Masa de los agregados finos.
f'c	- Resistencia a compresión de proyecto.
fci	- Esfuerzo a compresión mínimo para desmolde (80% f'c).
f'cr	- Resistencia a compresión promedio requerida.
Ma	- Masa de vacíos de aire.
MVsc	- Masa Volumétrica en seco.
Mw	- Masa del Agua.
Sc	- Peso específico del cemento.
Sca	- Peso específico de agregados gruesos.
Sfa	- Peso específico de agregados finos.
Sma	- Peso específico del aire.
Smw	- Peso específico del agua.
Va	- Volumen en litros del agregado fino.
Vc	- Volumen absoluto del concreto fresco compactado.

Nomenclatura y/o Abreviatura

AASHTO	- Asociación Americana de los Funcionarios de las Autopistas Estatales y del Transporte (American Association of State Highway and Transportation Officials).
ACI	- Instituto Americano del Concreto (American Concrete Institute).
APAC	- Cooperación de Acreditación Asia Pacifico.
ASTM	- Sociedad americana de ensayos y materiales (American Society for Testing and Materials).
CPC	- Cemento Portland Compuesto.
IAF	- Foro Internacional de Acreditación.
IAAC	- Cooperación Interamericana de Acreditación.
ILAC	- Cooperación Internacional de Acreditación de Laboratorios.
EMA	- Entidad Mexicana de Acreditación A.C.
HRWR	- Hight Range Water Reduction, Reductor de agua de alto rango.
IMCYC	- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C.
L	- Litros.
NMX	- Normas Mexicanas o Estándares.
NOM	- Normas Oficiales Mexicanas.
OEC	- Organismo de Evaluación de la Conformidad-Laboratorios.
ONNCCE	- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
PCA	- Asociación de Cemento Portland (Portland Cement Association).
PC	- Polixicarboxilato.
PIP	- Plan de Inspección y Prueba.
QA	- Aseguramiento de Calidad (Quality Assurance).
QC	- Control de Calidad (Quality Control).
RS	- Resistente a Sulfatos.
RR	- Resistencia Rápida.
w/(c+p)	- Relación agua entre cemento más materiales cementicios.

Introducción

Capítulo 1.- Se definen los antecedentes del control de calidad, historia del concreto y evolución en el tiempo, tipo de prefabricados y usos en la construcción.

Capítulo 2.- Se da a conocer el marco normativo que aplican generalmente al control de calidad y elementos prefabricados, evolución y esquema de las normas.

Capítulo 3.- Descripción de las pruebas de calidad, para el control del concreto empleado en la fabricación de los elementos prefabricados, y su validez oficial dentro de un esquema acreditado.

Capítulo 4.- Diseño de mezclas del concreto de Alto Desempeño ampliamente usado en la construcción y el prefabricado, tecnología de aditivos y curado a vapor.

Capítulo 5.- Proceso de fabricación de los prefabricados y especificaciones de proyecto del Sistema de Dovelas Postensadas.

Capítulo 6.- Resultados Satisfactorios Caso de estudio N°1, se analizan los datos y resultados con la evidencia objetiva de la fabricación de los elementos, terminando en el producto adecuado o conforme.

Capítulo 7.- Producto No Conforme Caso de estudio N°2, se analizan los resultados de elementos con problemas en el concreto, y las soluciones de reparación en general.

Capítulo 8.- Análisis de resultados, básicamente se analizarán ambos casos resultados satisfactorios y producto no conforme, dando información concluyente sobre el diagnóstico.

Finalmente se terminará con las conclusiones y recomendaciones de ambos casos, esperando sobre todo ser una guía útil, para aquellos estudiantes y profesionistas amantes del concreto y de los prefabricados.

OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Objetivo.

Fortalecer el conocimiento de los métodos prácticos para el control de calidad, diseño de concreto de alto desempeño, vinculación con la normatividad y con entidades de acreditación y/o certificación, para su aplicación en las necesidades de obras de infraestructura.

La tesis está compuesta de 4 orígenes de fuentes de información:

- 1.-El conocimiento de autores de libros en este rubro, a quienes hago referencia y cito textualmente.
- 2.-Normas Mexicanas e Internacionales.
- 3.-Experiencia propia de diversos proyectos de Infraestructura en México.
- 4.-Sitios en la web.

Campo de aplicación.

Se emplea actualmente en edificios altos, rascacielos, en puentes, vialidades, pisos industriales, viviendas, museos, y estadios deportivos, etc. Es muy amplio, debido al crecimiento tecnológico del concreto de alto desempeño,

Cabe mencionar que también se utiliza ampliamente en la construcción en general, al ser un material fundamentalmente de uso extendido, que se emplea para complementar un sistema integral, que se aplica en las plantas de prefabricados de concreto.

Los avances del estudio del concreto han sido extraordinarios, una gran cantidad de Obras y trabajos lo confirman. Sin embargo, los concretos de alto desempeño (CAD), representan la evolución de la tecnología con sus muchas aplicaciones, su empleo nace de la necesidad de satisfacer requerimientos especiales, y el Laboratorio de Control de Calidad es un pilar para las pruebas y resultados satisfactorios. La Normatividad Nacional e Internacional, los Sistemas de Gestión, y la norma NMX-EC-17025-IMNC-2018, para acreditar a los laboratorios de ensayo y/o calibración, han permitido y fortalecido en México este desarrollo, junto con la aplicación de estándares ISO internacionales.

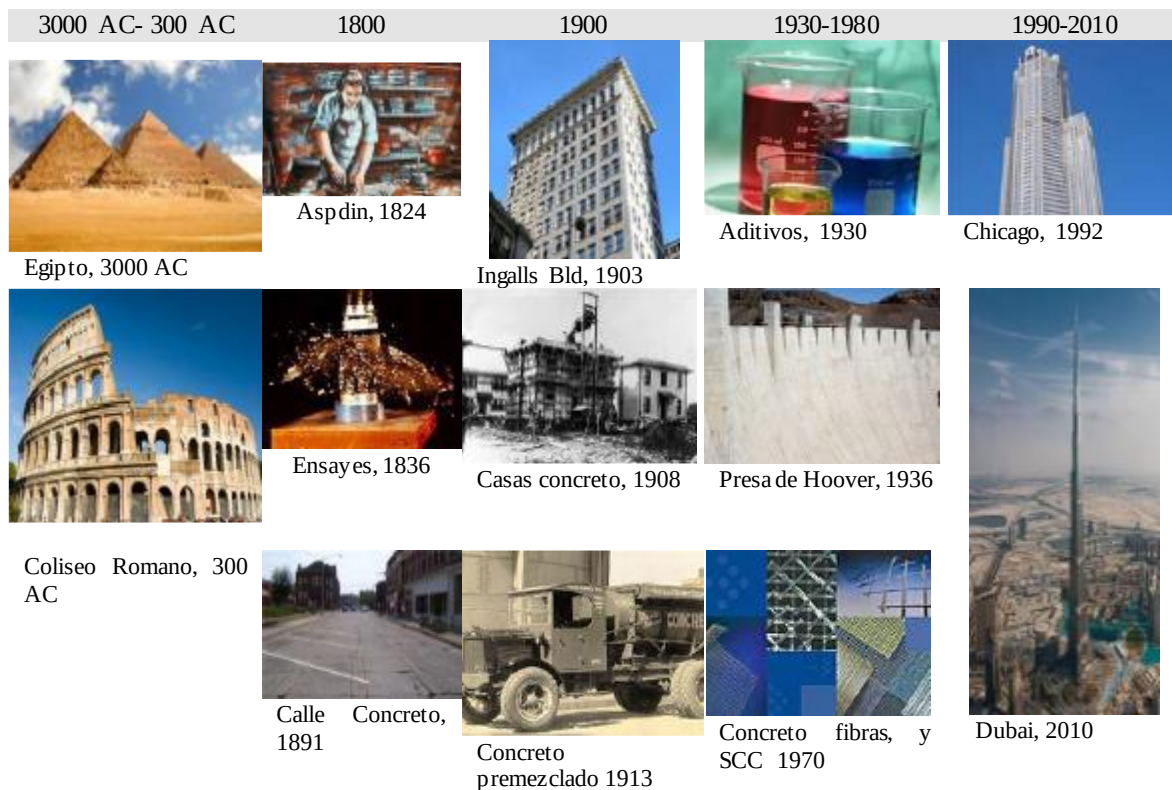
ANTECEDENTES DEL CONTROL DE CALIDAD DEL CONCRETO PRESFORZADO

1.1 Antecedentes del control de calidad

Se inició en la década de 1920 con el enfoque sistemático de Walter A. Shewhart, conocido como el ciclo PDCA (Planificar, Hacer, Verificar, Actuar). Posteriormente, Armand Feigenbaum dio a conocer el concepto de control de calidad total (TQC) en 1961, con un enfoque en el interés por el cliente. En los años treinta, los primeros modelos de calidad surgieron en Estados Unidos y Japón, y llegaron a Europa en los años 80. Referencia web <https://lahistoria.info/historia-de-la-calidad/>

Para el concreto fue hasta el siglo XVIII donde John Smeaton determinó algunas propiedades hidráulicas de las cales básicamente puras, es conocido como el “padre de la ingeniería civil en Inglaterra”, al realizar pruebas con calizas impuras y blandas, se dio cuenta que contenían materiales arcillosos, que ayudaron a fabricar mejores cementos hidráulicos. Referencia 15 PCA Kosmatka, Steven H, Ea tl. Illinois, EE.UU., 2004. A continuación, un resumen de eventos:

Fig. No. 1.1 Evolución del concreto en el tiempo y sus aplicaciones.



Referencia 11.- Asociación Mexicana de Concreteros Independientes AMCI.

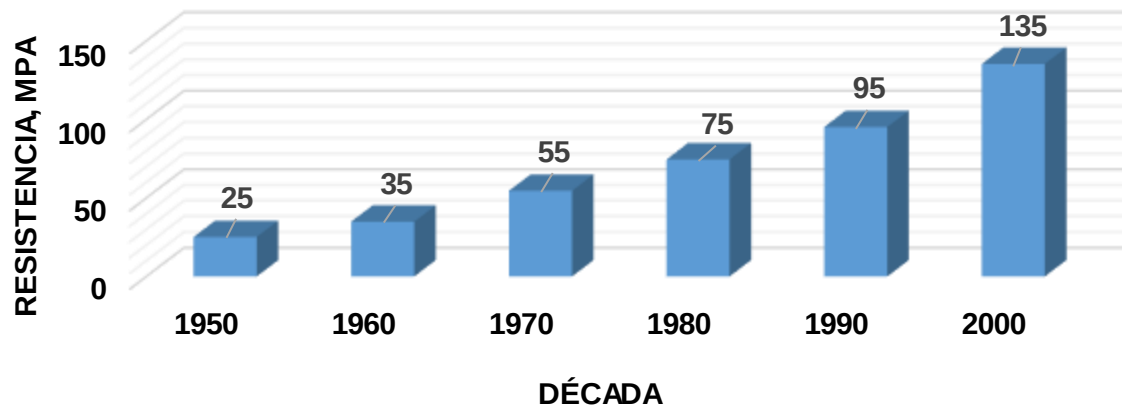


Fig. 1.2 Avance de la resistencia a compresión del concreto a través del tiempo.

Referencia 10.- Asociación Argentina del Hormigón Elaborado.

1.2 Prefabricado

Son elementos estructurales de concreto y acero, los cuales son fabricados en un lugar distinto de donde van a ser colocados. Por un lado, se tiene la obra civil, y por otro la planta de prefabricados, entendiendo por obra el lugar donde se va a fijar el elemento definitivamente.

1.3 Usos de los prefabricados

El incremento en el uso, se debe a la velocidad de fabricación simultánea con la obra civil, es decir mientras se está dejando listo el tramo donde se va a colocar el prefabricado, en otro sitio se está fabricando el prefabricado. El elemento prefabricado se transporta a la obra una vez que estén listos para el montaje, estas actividades son programadas mediante el uso de la ruta crítica o Project.

1.4 Tipos de prefabricados

Existen muchas estructuras de elementos prefabricados, sin embargo, se pueden considerar las siguientes:

1.4.1 Simplemente armados

Son aquellos elementos que no requieren de un pre o post tensado (esfuerzo inducido). Se constituyen de acero de refuerzo y concreto hidráulico. En algunos casos únicamente de concreto hidráulico y fibras de acero o polipropileno. Las fibras de polipropileno son un material compuesto a su vez por otras fibras continuas y discontinuas de polipropileno que, a su vez, se ensamblan en una matriz plástica. Entre las múltiples ventajas reduce los agrietamientos por contracción y por temperatura, funcionando, así como un refuerzo secundario a la flexión y a la tensión, el refuerzo primario es el acero de refuerzo.

1.4.2 Presforzados

Son aquellos elementos o estructuras que requieren un esfuerzo inducido antes de ser colados con el concreto hidráulico, se logra a través de la tensión del acero de presfuerzo o torón. Esta actividad de tensado de torones se realiza antes del vaciado del concreto hidráulico. El siguiente paso es liberar el presfuerzo una vez que el concreto alcanzó una resistencia mínima especificada (esfuerzo de compresión del concreto), es común emplear el 80% del f'_c .

1.4.3 Postensados

Una vez que se vacía el concreto hidráulico, y alcanza una resistencia mínima especificada, f_{ci} (80% del f'_c). La siguiente actividad es el postensado, que se realiza mediante la tensión de los torones.

En ambos casos del pre o postensado de los torones, se espera una deformación longitudinal máxima y mínima, también una contra flecha del elemento sujeto a estos esfuerzos de tensión.

1.4.4 Lugar de fabricación

La fabricación se realiza en plantas fijas donde se cuenta con la infraestructura suficiente para desarrollar los proyectos. Para cumplir con la producción en serie, y también acorde a las dimensiones del proyecto, se utilizan moldes metálicos de la forma geométrica del elemento requerido. Por otra parte, también en la planta se realiza el habilitado de acero y el colado mediante plantas mezcladoras de concreto. Además de contar con el laboratorio de control de calidad, maquinaria, almacén y oficinas. En particular, la planta requiere un área lo suficientemente grande para almacenar los elementos fabricados, y por las maniobras hechas por los equipos que requieren suficiente espacio para trabajar.

1.5 Concreto

Sus componentes principales son : Agregados pétreos y pasta, esta última está conformada por cemento portland, agua , arena (Fig. 1-3a), y el agregado grueso conocido como grava (puede emplearse piedra triturada, piedra manufacturada, piedra machacada, pedrejón); de la mezcla de materiales se obtiene una masa con características parecidas a una roca (Figura 1-3b). El comportamiento de la mezcla, es endurecer el cemento por la adición del agua, reacción química que abarca toda la masa de la mezcla. Para los agregados pétreos se considera la siguiente división: Finos y gruesos, (Figura No. 1.3 a).



Figura No. 1.3 a) Componentes del concreto: Cemento, agua, agregado fino y agregado grueso, b) Piedra de cantera de la isla de Portland.

Referencia 15.- Diseño y Control de Mezclas de Concreto ,PCA, Kosmatka, Steven H,Ea tl. Illinois.

Se puede incluir adiciones minerales y materiales cementicios en la pasta. En ocasiones se compone de adiciones de materiales cementantes como las cenizas volantes, humo de sílice, que favorecen otras propiedades buscadas en la mezcla, adicional a el agua y aire atrapado o aire incluido. La pasta está compuesta de aproximadamente del 25% hasta 40% del volumen total del concreto. El contenido de cemento se encuentra entre el 7% y 15%, y el volumen del agua está entre 14% y 21%. El contenido de aire atrapado oscila entre el 4% y el 8% del volumen, los agregados pétreos constituyen del 60% al 75% del volumen total del concreto, de acuerdo al tipo de concreto la selección varia. Ref. 15.- Diseño y Control de Mezclas de Concreto ,PCA, Kosmatka, Ea tl. Illinois.

Los agregados finos pueden ser arena natural o artificial (manufacturadas-trituradas) con partículas que pasan por la malla 4.75 mm (tamiz No.4) y es retenida por la malla 0.075 mm (tamiz No. 200). Los agregados gruesos son las partículas retenidas en la malla 4.75 mm (tamiz No.4) y pasa totalmente por la malla 75 mm (3 in). Los agregados pétreos están conformados de partículas con resistencia mecánica adecuada y con resistencia a las condiciones de exposición al medio ambiente, no deben contener materiales que puedan causar daño en el concreto. La granulometría continua es deseable para el uso eficiente de la pasta. Ref. 27.- Agregados para concreto hidráulico, NMX-C-111.

NORMATIVAS REGULADORAS DE LA CALIDAD DEL CONCRETO

2.1 Normativa

La normatividad en el ámbito de la construcción es necesaria para la realización y evaluación de proyectos a nivel nacional e internacional que requiere el país. Se puede utilizar una combinación de normas nacionales e internacionales. Existen organismos nacionales e internacionales de certificación e instituciones que evalúan procedimientos para lograr un control de calidad adecuado. En México existen entidades encargadas de proponer, cambiar y elaborar las normas para evaluar el control de calidad, conocidas como: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE), Cámara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero (Organismo Nacional de Normalización-CANACERO), algunas de las normas más comunes en nuestro país son:

- Normas Oficiales Mexicanas (NOM), son de carácter obligatorio.
- Normas Mexicanas (NMX), son de carácter opcional, se definen como estándares.
- Normativa de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT).
- Normas de la Comisión Nacional de Electricidad (CFE).
- Normas Internacionales o americanas: ASTM, ASSTHO y ACI.
- Normas UNE, (normas Europeas) - Comunidad Internacional.
- Código AWS.D1 (Código de Soldadura Estructural en Acero).
- Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones de CDMX.

El diseño de Viaductos para el Tren Férreo, ha sido realizado de acuerdo con las normas:

- Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF) y sus Normas Técnicas Complementarias (NTC).
- AASHTO LRFD - Especificaciones de Diseño de Puentes 2010 5ª Edición.
- AASHTO LRFD - Especificaciones de la guía para el diseño de puentes sísmicos LRFD. 2010.
- AREMA - Manual de Ingeniería Ferroviaria.
- Manual de diseño del Ferrocarril Metropolitano del DF.
- Manual de diseño de obras civiles del CFE (Comité Federal de Electricidad).
- UIC Code 774-3 Interacción vía/puente. Recomendaciones para los cálculos.
- UIC Code 776-3 Deformación de puentes.
- Eurocódigos EN 1993-1-9:2005 & EN 1993-2:2006 - Viaductos de ferrocarril.

Referencia 17.- Índice y Notas Generales – Tren México Toluca.

2.1.1 Normativa mexicana (NMX)

Las Normas Mexicanas (de uso voluntario), las cuales contienen la información acerca de la metodología aplicable a cada una de las pruebas de calidad en materiales y/o productos. En los que se requiere evaluar las especificaciones requeridas en el proyecto, es decir deben cumplir un plan de calidad. Por ejemplo, se utilizan para evaluar las características mecánicas de diversos materiales tales como: El cemento, agregados pétreos (grava y arena), agua, aditivos, concreto premezclado, y concreto hecho en obra.

Las normas empleadas deberán estar de acuerdo con la nueva Ley de Infraestructura de la Calidad (LIC) que rige la normatividad en México, que sustituyó a la cancelada Ley Federal de Metrología y Normalización (LFMN). Todos los métodos deberán ser avalados por un organismo de certificación. Para el control de calidad del concreto tenemos las siguientes pruebas o métodos (Tabla No. 2.1).

Tabla No. 2.1 Métodos básicos del control de calidad en concreto

Norma Mexicana NMX-C-ONNCCE	Método
083-2014	Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes
109-2013	Determinación del Cabeceo de Especímenes
156-2010	Determinación del Revenimiento en el Concreto Fresco
159-2016	Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo
161-2013	Concreto Fresco – Muestreo
162-2014	Determinación de la masa unitaria, cálculo del rendimiento y contenido de aire del concreto fresco por el método gravimétrico
435-2008	Método para determinar la temperatura en el concreto fresco

Referencia 16.-El Autor

2.2 Evolución de las normas

Conforme a las necesidades de los proyectos y las obras de infraestructura, las normas se actualizan y se revisan antes de su aplicación. Los órganos colegiados realizan aportaciones a las normas, por métodos de investigación y los resultados se utilizan para la modificación de las normas correspondientes.

Con el tiempo las normas van siendo obsoletas por lo que se realizan actualizaciones para una nueva edición.

Capítulo II

Las modificaciones se revisan por todos los organismos que participan, y estos cambios son evaluados por los organismos de certificación y entidades de acreditación, la más reconocida a nivel nacional, es la Entidad Mexicana de Acreditación A.C. (EMA); quien es la responsable de acreditar a los Laboratorios de Ensayo o Calibración (OEC- Organismo Evaluador de la Conformidad). Es obligación de cada organismo llevar a cabo una revisión cuando menos anualmente sobre la actualización de las normas en México.

La Dirección General de Normas que pertenece a la Secretaría de Economía (Referencia página web <https://www.gob.mx/busqueda?utf8=%E2%9C%93#gsc.tab=0&gsc.sort=&gsc.q=normas%20mexicanas>), publica las normas correspondientes a las pruebas del control de calidad que se utilizan en la construcción, y otros rubros como salud, seguridad, etc; por medio de la EMA y el ONNCCE (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.), se verifica su contenido para empleo del público en general, Referencia página web .- https://www.ema.org.mx/portal_v3/index.php/iaf, a continuación, se presenta un esquema de normas:

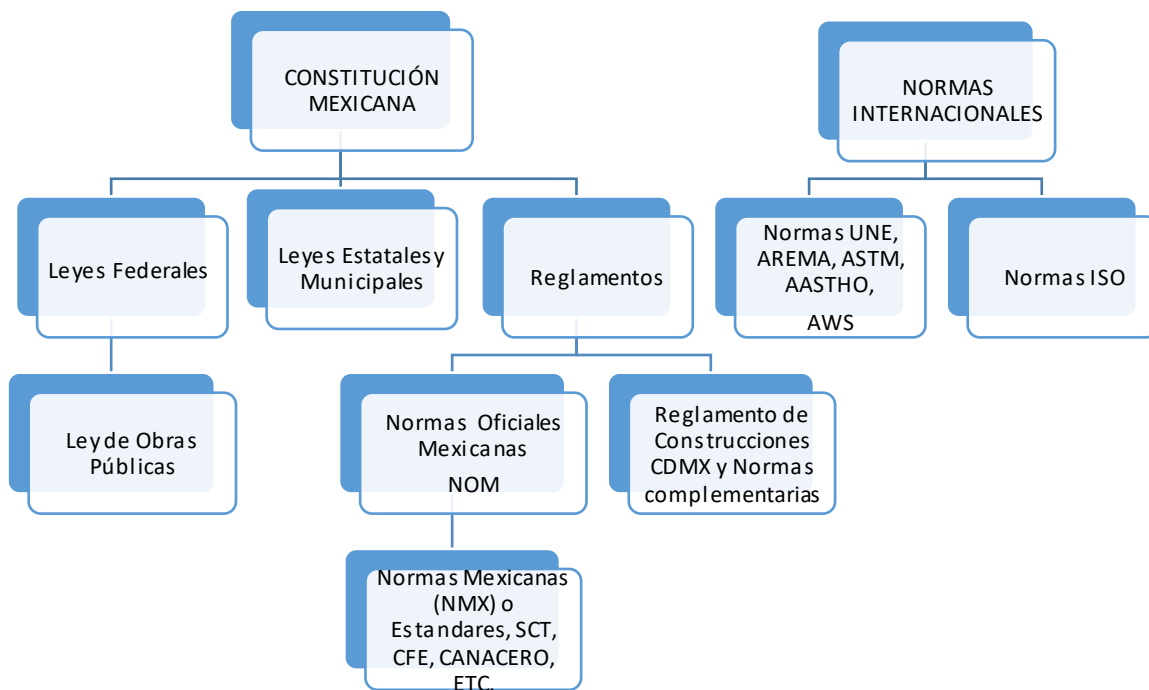


Figura No. 2.1 Esquema de normas implicadas en un proyecto.

Referencia 16.- El Autor

PRUEBAS DE CONTROL DE CALIDAD DEL CONCRETO

3.1 Generalidades

Las pruebas de control de calidad, forman parte de un sistema integrado por procedimientos bien definidos y entrelazados armónicamente que permiten estimar la calidad de elementos prefabricados de concreto hidráulico y los problemas que se tienen sobre el mismo. Entre los que podemos mencionar son: Fisuración, grietas, resistencias bajas, problemas de vibrado, rotura, descascamiento, etc.

3.2 Descripción de las pruebas

Para cada norma existe un método que describe detalladamente su ejecución sobre las pruebas de calidad en el concreto. En cada método se describe el procedimiento, tomando las consideraciones siguientes: Contar con el equipo calibrado, personal capacitado, instalaciones adecuadas y los controles necesarios para su ejecución.

A partir del inciso 3.5, las pruebas sobre el concreto se describen en forma más detallada.

3.3 Control de calidad

Son los métodos, acciones y herramientas desarrolladas para determinar la(s) solución(es) de error(es). Por lo que existen laboratorios de construcción que realizan pruebas con el fin de asegurar la calidad de los elementos estructurales y no estructurales. Estos laboratorios requieren estar acreditados, como se mencionó antes la entidad mexicana de acreditación a.c. (EMA), reconoce la competencia técnica del personal, y la confiabilidad de los laboratorios de ensayo y/o calibración en México. La EMA, a su vez es reconocida a nivel nacional por la estructura de la Evaluación de la Conformidad que emplean los servicios de laboratorios confiables, unidades de verificación, organismos de verificación y de certificación, acreditados en el territorio nacional. En el ámbito internacional es reconocida por IAF (Foro Internacional de la Acreditación), y el ILAC (Organismo de Cooperación Internacional de Laboratorios), mediante los alcances del acuerdo de reconocimiento multilateral (MLA) o del acuerdo de reconocimiento mutuo (MRA). La calidad se basa en una cultura de prevención asumiendo que es más rentable prevenir los fallos que corregirlos o lamentarlos.

Referencia página web .- https://www.ema.org.mx/portal_v3/index.php/iaf

3.4 Aseguramiento de calidad

Es la toma de acciones por el propietario o el representante del propietario para proporcionar la seguridad de lo que se está haciendo de acuerdo a los estándares aplicables de la buena práctica para la obra. Los responsables del aseguramiento de calidad son todos los implicados en el proceso de fabricación y entrega del producto: Proveedores, Producción, Control de Calidad, Ventas, Gerencia, Clientes. El Control de Calidad y Aseguramiento de Calidad ambos mejoran la calidad del producto terminado y es necesaria su presencia en la construcción.

Referencia página web: https://es.wikipedia.org/wiki/Control_de_calidad

3.5 Validez de las pruebas de control de calidad

Las pruebas deben ser evaluadas con métodos que cumplan con la normatividad y con las especificaciones de proyecto. Es importante evaluar la competencia técnica del personal técnico que realiza la prueba, así como verificar si el equipo esta calibrado, revisar las instalaciones y el sistema de gestión del laboratorio. La entidad mexicana de acreditación (EMA) se encarga de revisarlo para que sus pruebas tengan validez oficial. Se presenta un extracto de pruebas para el concreto a continuación:

Tabla No. 3.1 Plan de Inspección y Prueba (PIP) del control de calidad en prefabricados de concreto. Referencia 16.-El Autor.

Prueba o inspección al material	Documento(s) aplicable(s)	Norma o especificación de referencia	Frecuencia de inspección o ensaye	Registro(s) a generar
MUESTREO DEL CONCRETO HIDRÁULICO FRESCO				
Determinación del revenimiento en el concreto fresco	PROYECTO EJECUTIVO Y ESPECIFICACIONES.	NMX-C-156-ONNCCE- 2010	Una prueba por cada unidad recibida	Informe de pruebas y resultados
Determinación de la masa unitaria del concreto fresco	PROYECTO EJECUTIVO Y ESPECIFICACIONES.	NMX-C-162-ONNCCE- 2014	Una prueba por cada día de colado para un mismo tipo de concreto.	Informe de pruebas y resultados
Método para determinar la temperatura del concreto fresco	PROYECTO EJECUTIVO Y ESPECIFICACIONES.	NMX-C-435-ONNCCE-2010	Una prueba por cada unidad recibida	Informe de pruebas y resultados
Elementos horizontales de Concreto Estructural Clase I	PROYECTO EJECUTIVO Y ESPECIFICACIONES.	NMX-C-159-ONNCCE- 2016	Cada 40 m3 o fracción.	Informe de pruebas y resultados
ENSAYE A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO				
Determinación de la resistencia a la compresión del concreto hidráulico (F'c)	PROYECTO EJECUTIVO Y ESPECIFICACIONES.	NMX-C-083-ONNCCE- 2014	Al desmoldar 7, 14 y 28 días de edad del espécimen.	Informe de pruebas y resultados
Determinación del módulo de elasticidad estático del concreto hidráulico.	PROYECTO EJECUTIVO Y ESPECIFICACIONES.	NMX-C- 128-ONNCCE-2013	Una muestra de 4 especímenes mensual, por tipo de concreto.	Informe de pruebas y resultados
Concreto - Extracción de Especímenes Cilíndricos o Prismáticos de Concreto Hidráulico Endurecido	PROYECTO EJECUTIVO Y ESPECIFICACIONES.	NMX-C-169-ONNCCE-2009	Una muestra de al menos 3 especímenes, por tipo de concreto según aplique.	Informe de pruebas y resultados

3.6 Muestreo de concreto fresco (NMX-C-161-ONNCCE-2013)

En esta etapa se lleva a cabo el muestreo del concreto fresco, existen distintos tipos de muestreo:

1. Muestreo de concreto en mezcladoras estacionarias (fijas y basculantes).
2. Muestreo de concreto en pavimentadoras.
3. Muestreo de concreto en la olla del camión mezclador o agitador.
4. Muestreo en camiones de volteo con o sin agitadores u otros tipos de contenedores.

Para el caso en estudio tomaremos el muestreo en camión mezclador (Figura No. 3.1), el cual se subdivide en dos: 1.- Muestreo en Planta de concreto, y 2.- Muestreo en Obra.



Figura No. 3.1 Muestreo de concreto en Planta Premezcladora. Ref. 16 El Autor.

1.- Para el muestreo en la planta premezcladora, al salir la olla de la planta dosificadora, se debe dar un tiempo mínimo de 7 minutos de mezclado, se debe alcanzar la velocidad de mezclado de 6 a 18 rpm (revoluciones por minuto), este tiempo de mezclado debe ser medido a partir de que todos los materiales de la mezcla de concreto incluida el agua se encuentran en el interior de la olla revolvedora, se tiene que completar de 70 a 100 revoluciones del tambor, la velocidad de agitación normal es de 2 a 6 rpm, finalizado el tiempo necesario, se debe realizar un despunte de concreto aproximado de 10 L (Litros) mínimo. El siguiente paso es tomar la muestra con un recipiente que tenga un volumen de al menos 15 L, mediante la carretilla, se intercepta totalmente el flujo de descarga del canalón.

Referencia 30.- NMX-C-155-ONNCCE-2014.

2.- En el segundo caso es el muestreo en obra, la muestra se obtiene interrumpiendo el flujo completo de la descarga. En forma inmediata se vacía en la carretilla, y se procede a realizar las pruebas de temperatura, revenimiento, masa unitaria y contenido de aire si fuese el caso, ver la Figura 3.2.

Referencia 33.- NMX-C-161-ONNCCE-2013. Concreto Fresco - Muestreo

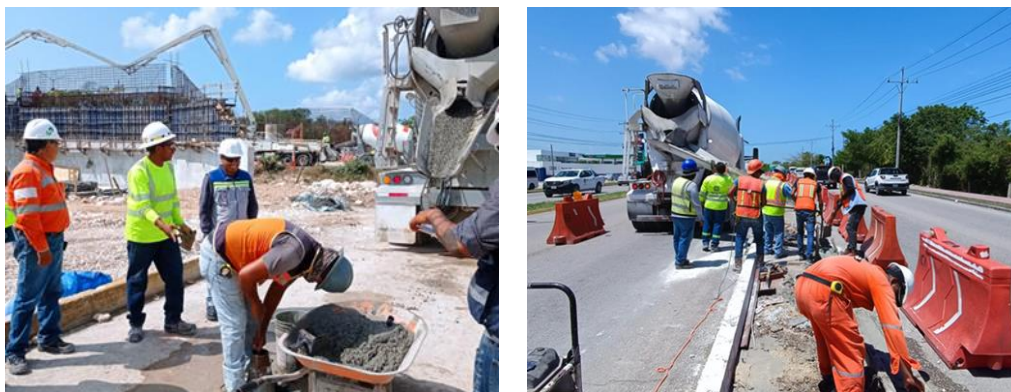


Figura No. 3.2 Muestreo de concreto en Obra. Referencia 16.- El Autor

Para la elaboración de los cilindros de concreto, la muestra se deberá obtenerse entre el 15% y el 85% del volumen de la unidad, esto debe hacerse sin segregar el concreto. Después de tomar la muestra se procede a realizar la toma de la temperatura.

3.7 Temperatura (NMX-C-435-ONNCCE-2008)

El dispositivo de medición de temperatura, debe estar calibrado anualmente. Cuando exista duda de su precisión, se puede realizar una comparación de dos lecturas separadas entre sí por lo menos 15° con un dispositivo de referencia que deberá estar preferentemente calibrado.

Se coloca el termómetro dentro del concreto fresco en una porción donde este sumergido un mínimo de 7.5 cm (3 in). Se presiona suavemente alrededor del mismo, evitando que la temperatura del ambiente no afecte la lectura, se espera en un tiempo aproximado de 2 minutos la estabilización de la lectura, para posteriormente registrarla correctamente.

La temperatura del concreto fresco deberá tomarse dentro de los primeros cinco minutos después de que se obtiene la muestra (Figura No. 3.3). La lectura no debe variar en más de 0,5°C (°C - grados Celsius) del promedio de tres lecturas de la misma muestra dentro de un tiempo de 5 minutos.

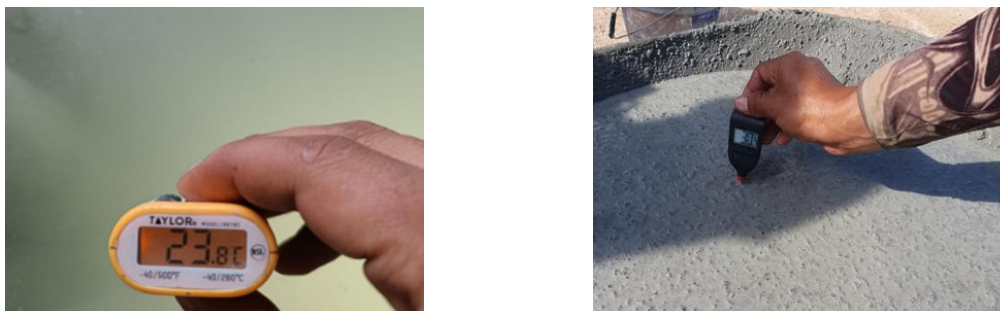


Figura No. 3.3 Toma de temperatura en concreto fresco. Referencia 16.- El Autor

Referencia 40.- NMX-C-435-ONNCCE-2008.

En algunas ocasiones se presentan dificultades de colocación y endurecimiento prematuro, cuando el concreto alcanza una temperatura de 32 °C, sobre todo en clima caluroso, en forma práctica no debe exceder 38°C. Para el caso de clima frío depende de la sección del elemento a colar, la temperatura del concreto va desde 5 °C hasta 13 °C como mínimo. Referencia 30.- NMX-C-155-ONNCCE-2014.

3.8 Revenimiento (NMX-C-156-ONNCCE-2010)

Es la medida de la consistencia del concreto fresco. Primero se humedece el cono y se coloca sobre la placa en una superficie plana horizontal, rígida, húmeda y no absorbente, una vez obtenida la muestra de concreto fresco en la carretilla o recipiente impermeable y no absorbente. La persona a cargo de la operación coloca firmemente sus pies en cada estribo, se remezcla el concreto con el cucharón para que este homogénea la mezcla. El siguiente paso es llenar el cono truncado en 3 capas del mismo volumen aproximadamente. Se llena la primera capa de un espesor de 7 cm, la segunda capa con el concreto hasta llegar a 15 cm, y la tercera capa hasta llenar el cono al extremo de su borde rebosando en 3 mm. Cada capa se compacta con 25 penetraciones de la varilla de acero, introduciéndola por el extremo redondeado, distribuyendo las penetraciones uniformemente en cada capa, la mitad de las penetraciones aproximadamente se realizan cerca del perímetro del cono, es conveniente inclinar la varilla ligeramente. Posteriormente la segunda mitad de penetraciones con la varilla en posición vertical, se continua en espiral hacia el centro. La segunda y tercera capa, compactar a través de todo su espesor, de manera que se penetre con la varilla 2 cm aproximadamente la capa anterior. En la última capa, si a consecuencia de la compactación, el concreto se asienta, se puede detener en la décima o vigésima penetración, se agrega más concreto en exceso para mantener su nivel por encima del cono todo el tiempo. Terminada la compactación de la última capa, se enrasa mediante un movimiento de rodamiento de la varilla sobre el cono en su parte superior. Limpia la superficie de la placa e inmediatamente se levanta el cono en su totalidad. Es importante, tener cuidado de que el movimiento al levantarlo sea en la dirección vertical todo el tiempo, sin movimiento lateral o torsional. La operación de levantar completamente el cono en los 30 cm de su altura debe hacerse en 5 ± 2 segundos. El procedimiento completo se debe realizar en un tiempo máximo de 2.5 minutos (Figura No. 3.4 a), desde el comienzo del llenado hasta que se levante el cono sin interrupción. Se coloca el cono de revenimiento vacío junto al concreto de manera inversa, se sitúa la varilla horizontalmente sobre él, y a su vez sobre el concreto sin tocarlo. Se mide la diferencia de alturas de la varilla al centro desplazado de concreto (Figura No. 3.4 b), y esta medida es el revenimiento en centímetros (cm).

Referencia 31.- NMX-C-156-ONNCCE-2010.



Figura 3.4 a) Toma de muestra del concreto fresco en laboratorio,
b) Determinación del revenimiento del concreto fresco. Referencia 16.-El Autor

3.9 Masa unitaria del concreto fresco (NMX-C-162-ONNCCE-2014)

Después de obtener la muestra, se llena en el recipiente y se compacta. En concretos con un revenimiento mayor de 80 mm, debe compactarse por varillado, y también debe varillarse el concreto en recipientes menores de 10 litros, evitando así la pérdida excesiva de aire incluido. En recipientes de 10 L de capacidad o mayores, el método de compactación puede ser por varillado o por vibración interna. Para seleccionar el método de compactación debe estar basado en el revenimiento con el siguiente criterio: Para un revenimiento mayor a 80 mm, se debe varillarse el concreto, con revenimientos de 30 a 80 mm se pueden varillar o vibrar los concretos, y para los concretos con revenimientos menores de 30 mm, deben vibrarse. El paso siguiente será colocar el concreto en 3 capas de aproximadamente igual volumen, para recipientes de 14 L o menores, compactar con 25 penetraciones cada capa con el extremo redondeado de la varilla y distribuidas uniformemente. En este caso se utiliza un recipiente de 5 L debido a que el agregado grueso es de 13 mm. En la primera capa de espesor $\frac{1}{3}$ del volumen, la varilla debe penetrar en todo su espesor. En las capas subsecuentes, la varilla debe penetrar aproximadamente 20 mm la capa inmediata inferior. Después de varillar cada capa se elimina el aire contenido con golpes laterales alrededor en el recipiente metálico con un mazo de neopreno, se golpea un mínimo de veces necesarias para que el agregado grueso se asiente o empiece a desaparecer, sin producir segregación. Posteriormente se enrasa con la placa metálica cubriendo los $\frac{2}{3}$ del recipiente, usando toda la base y avanzando hacia el frente en movimiento de sierra, y posteriormente con los cantos se detalla la superficie de concreto, y se limpia de excesos, para su pesaje en la báscula y el cálculo de la masa unitaria.

Referencia 34.- NMX-C-162-ONNCCE-2014.

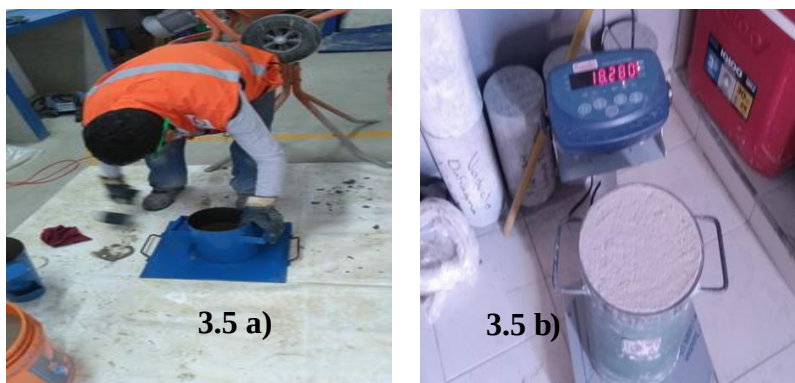


Figura 3.5 a) Elaboración de la masa unitaria del concreto fresco, b) Determinación y pesaje de la masa unitaria del concreto fresco. Referencia 16.-El Autor

3.10 Elaboración y curado de especímenes de ensayo (NMX-C-159-ONNCCE-2016)

Existen tres tipos de moldes: Cilíndricos, cúbicos y prismáticos.

Para el caso en estudio se emplearon moldes metálicos cilíndricos de 15 cm de diámetro y con 30 cm de altura, también moldes cúbicos de 15 x 15 cm. La elaboración de las muestras de concreto con moldes cilíndricos se emplea la varilla larga de compactación con un diámetro de 16 mm y con una longitud de 600 ± 30 mm. Para los moldes cúbicos de 15 x 15 cm se emplea la varilla corta de 10 mm de diámetro y 300 ± 15 mm.

3.10.1 Cilindros, cubos y prismas de concreto

En la elaboración de muestras de cilindros de concreto, los moldes metálicos deben ser previamente aceitados, y colocados en una superficie horizontal, plana y libre de vibraciones. Tomando la muestra como lo indica la norma NMX-C-161-ONNCCE-2013, se procede a su llenado en tres capas de aproximadamente igual volumen. De la misma forma que la masa unitaria se varilla o se vibra de acuerdo con su revenimiento, en nuestro caso se varilla con 25 penetraciones por cada capa de aproximadamente igual volumen. La primera capa se penetra totalmente, las otras dos capas subsecuentes la varilla penetrará 2 cm la capa inferior. El varillado será en espiral en la zona perimetral avanzando hacia el centro. Se expulsa el aire contenido con golpes del mazo de neopreno, los cuales se realizan en el molde metálico por la parte exterior. El concreto se enrasa, la muestra se identifica y se protege con bolsas de plástico o algún otro material no absorbente.

Por último, se deja en el lugar plano y seguro para que sean recolectadas las muestras en un periodo de 24 a 48 horas, para ser llevadas al laboratorio. Referencia 32.- NMX-C-159-ONNCCE-2016.



Figura 3.6 a) Elaboración de muestras cilíndricas, b) Elaboración de muestras cúbicas, c) Elaboración de muestras prismáticas. Referencia 16.- El Autor.

Para el caso en estudio que nos ocupa el concreto es de resistencia rápida (RR), se recolectan las muestras a las 17 horas, y se ensayan a compresión a la edad de 18 horas aproximadamente. Esta edad se calcula tomando el tiempo en horas, desde el muestreo hasta la hora de su ensayo a compresión.

3.11 Cabeceo de especímenes - Concreto (NMX-C-109-ONNCCE-2013)

El procedimiento de cabeceo se realiza en especímenes de concreto con el fin de obtener la planicidad y perpendicularidad en sus bases para su ensayo, en este caso en muestras cilíndricas de 15 x 30 cm, Se emplea un plato cabeceador móvil con barra guía, y mortero de azufre para el cabeceo. El mortero de azufre es un material sólido que al calentarse a temperaturas de $140\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, pasa de un estado sólido a un estado líquido, y es necesario mantenerlo seco, es decir sin humedad, con ello se logra que no varíe su resistencia a compresión y su comportamiento en estado fluido.

A continuación, se precalienta el plato cabeceador y demás aditamentos necesarios, con ello se evita los choques térmicos. Se aplica una capa de aceite mineral al plato cabeceador, ya que servirá como desmoldante, una vez que se endurezca el mortero de azufre.

Debe limpiarse cualquier material o residuo que interfiera con la adherencia de la capa de cabeceo, material aceitoso, exceso de agua, o de cera, que se encuentre en las bases del espécimen, debido a que esto provoca la formación de huecos, burbujas de vapor de agua o de espuma, y como consecuencia se tienen agrietamientos del mortero de azufre en el cabeceo.

Lo siguiente es verter el mortero de azufre líquido sobre el área del plato cabeceador. Colocar por encima el espécimen cargándolo, acto seguido apoyarlo contra la barra guía con ambas manos.

Se desliza el espécimen hacia abajo lentamente, no dejar que se despegue de la barra guía porque se perdería el alineamiento, continua sin soltarlo hasta que el espécimen toque el fondo del plato.

Capítulo III

Se debe mantener sujetando y sin movimiento el tiempo suficiente hasta que el mortero de azufre se endurezca o solidifique. Una vez hecho esto repetir el mismo procedimiento con la otra base faltante de cabeceo. Una manera de revisar si las capas de cabeceo están bien adheridas al espécimen cilíndrico es golpearlo con un elemento metálico o con los nudillos de la mano, mediante el sonido nos damos cuenta si está correctamente cabeceado.

Referencia 26.- NMX-C-109-ONNCCE-2013.



Figura 3.7 a) Vaciado de mortero de azufre liquido en plato de cabeceo, b) Colocación del cilindro de concreto en el mortero de azufre, c) Medición del paralelismo y la perpendicularidad de ambas caras cabeceadas del espécimen.
Referencia 16.- El Autor.

3.12 Resistencia a la compresión de especímenes (NMX-C-083-ONNCCE-2014)

Una vez verificada y calibrada la prensa a compresión, se realiza la limpieza de las platinas superior e inferior en sus bases, y las cabezas del espécimen previamente cabeceadas con mortero de azufre. Posteriormente se coloca el cilindro dentro de la máquina y se utilizan los círculos concéntricos de las platinas para guiarse, colocar correctamente el espécimen sobre las bases cabeceadas.

Es necesario cuidar que durante la aplicación de la carga axial se tenga una velocidad constante, que no provoque impacto, y que a su vez no se exista una pérdida de carga. Durante la prueba se acepta una velocidad controlada mayor a la de aplicación, mientras se tiene la primera mitad de la carga máxima esperada, debiendo respetar la velocidad de aplicación especificada durante la segunda mitad de la carga máxima esperada. La velocidad especificada debe estar dentro de los parámetros de la norma, que son $2.55 \pm 0.51 \text{ kg/cm}^2/\text{segundo}$.

Una vez realizada la prueba se registra la carga y se obtiene la resistencia a compresión del espécimen se obtiene de acuerdo a lo siguiente:

$$f'c = \frac{F}{A} \quad \text{Ec. (3.1)}$$

donde:

$f'c$ – Resistencia a compresión, en $\frac{kgf}{cm^2}$, F – Carga máxima, en kgf

A – Área del espécimen (cm^2)

Se determina la resistencia a la compresión del ensayo a la edad especificada o convenida, con el promedio de dos especímenes como mínimo. Referencia 23.- NMX-C-083-ONNCCE-2014.



Figura 3.8 a) Muestras de especímenes cabeceados, previo a ensayarse a compresión.
b) Ensayo a compresión de especímenes cilíndricos en prensa eléctrica de 200 ton.
c) Especímen de concreto ensayado, dentro de prensa. Referencia 16.- El Autor.

3.13 Resultados

Ejemplo: Obtener la resistencia a compresión promedio en dos cilindros de concreto:

Tabla No. 3.2 Resultados a compresión ejemplo. Ref. 16.- El Autor.

Especimen No.	Fuerza en kgf (F)	Área en cm^2 (A)	Resistencia Individual en kgf/cm^2 (R)	Resistencia promedio en kgf/cm^2 $f'c$
1	96 250	176.7	544.7	541
2	94 760	176.7	536.3	

DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO

4.1 Marco metodológico

En el diseño de concreto se obtienen las cantidades de los componentes de la mezcla, como son el cemento, grava, arena, agua y aditivo. Es necesario verificar el cumplimiento de especificaciones, y sus propiedades del concreto en estado fresco y endurecido.

Para un concreto de resistencia normal se tiene un rango de 140 a 420 kg/cm². Para concretos de alta resistencia, generalmente se usan adiciones puzolánicas al cemento (humo de sílice), y aditivos químicos especialmente seleccionados. Además, se define en un rango de resistencia a compresión de 420 a 845 kg/cm² (Referencia 3.- ACI 211.4R-93). Un concreto de alta resistencia bien dosificado tiene las siguientes características:

- En estado fresco : Trabajabilidad y permanencia aceptable.
- En estado endurecido: Durabilidad, resistencia y apariencia uniforme.
- Economía en su totalidad.

La mezcla de concreto fresco deberá moverse homogéneamente con todos sus componentes, sin segregarse. Esta condición de concreto fresco como un fluido es una característica de la reología que debe cumplirse. La reología estudiada en la física, determina los principios de cómo se mueven los fluidos.

Para determinar el diseño de mezcla existe dos métodos:

- El método de las masas utilizando una masa conocida por unidad de volumen.
- El método del volumen absoluto. Emplea las masas específicas relativas de todos los componentes de la mezcla, cada uno con la parte que ocupa en una unidad de volumen de concreto, este último es el que se utilizará.

El método del volumen absoluto está basado en el principio del concreto compactado al máximo, donde es igual al volumen de todos los componentes del concreto, (cemento, agregados pétreos y agua). El volumen requerido de concreto está dado por:

$$V_c = (C * S_c) + (F_a * S_{fa}) + (C_a * S_{ca}) + (M_w * S_{mw}) + (M_a * S_{ma}) \quad Ec.4.1$$

donde:

V_c, C, F_a, C_a, M_w, M_a, V_a, S_c, S_{fa}, S_{ca}, S_{mw}, y S_{ma}, son los componentes y densidades de la mezcla.

Referencia 3.- ACI 211.4R-93.

El volumen para la arena o agregado fino se determina como sigue:

$$vfa = \left(1000 - \sum ((C * Sc) + (Ca * Sca) + (Mw * Smw) + (Ma * Sma)) \right) \quad Ec.4.2$$

También el concreto de alto desempeño, es empleado para aplicaciones y ambientes particulares. Algunas de sus características son: Elevada resistencia inicial y final, módulo de elasticidad estático, resistencia a la abrasión, durabilidad y vida útil extendida en condiciones severas, baja permeabilidad, resistencia al ataque químico, alta resistencia a la congelación, tenacidad y resistencia al impacto, estabilidad de volumen, fácil colocación, compactación sin segregación, inhibición del crecimiento de bacterias y moho, entre otros. Referencia 15.- PCA capítulo 17 pág. 1.

Los concretos de alto rendimiento (CAD) se fabrican con materiales de excelente calidad, escogidos meticulosamente para conseguir la mejora en el diseño de la mezcla. Los elementos de la mezcla se dosifican, combinan, colocan, compactan y curan con los más elevados estándares de calidad. Poseen una relación entre el agua y los materiales de cementantes de 0.20 a 0.45. La elección estará determinada por la resistencia requerida y los resultados alcanzados. Normalmente se utilizan aditivos reductores de agua, lo que promueve un aumento en la resistencia, además de una elevada fluidez y facilidad de manejo. Referencia 15.- PCA capítulo 17 pág. 1.

4.2 Selección de materiales

Es común que se tengan diversas opciones para iniciar con las pruebas de laboratorio. Es decir, se tienen de varios bancos de agregados, con diferentes combinaciones de cemento, también se cuenta con varias opciones de aditivos. En el presente caso se utiliza un aditivo reductor de agua y superfluidizante de alto rango (clase A y F), se describen sus características en la Tabla No. 4.6. Se considera para el concreto de alto desempeño los agregados calizos: Grava caliza de ½”, arena triturada caliza N°4, y tipo de cemento CPC 40 RS, la selección debe ser basada en resultados y en las especificaciones de proyecto.

4.3 Agregados (NMX-C-111-ONNCCE-2014)

Por definición son de naturaleza pétrea, la roca por su origen puede ser sedimentaria, ígnea o metamórfica, la mayor parte de las calizas se forman en un ambiente marino, y son sedimentarias. Los agregados son de procedencia de bancos de extracción, minas, trituración de concreto o resultante de algún proceso industrial. Los cuales al ser mezclados con cemento y agua son empleados para el uso del concreto o mortero. Referencia 27.- NMX-C-111-ONNCCE-2014.

Para el presente caso se considera el tamaño máximo de agregado de 12 mm (T.M.A.), debido al escaso espacio dentro del encofrado y a la alta densidad de acero de refuerzo, se requiere buena movilidad.

Con este tamaño de agregado y una relación agua/cemento adecuada, se puede obtener un buen acomodo dentro del molde y resistencias a compresión mayores a 700 kg/cm^2 .

Es importante mencionar que se debe cumplir con una granulometría óptima, para el concreto hidráulico clase I. Por especificación el agregado grueso deberá ser de origen calizo, se debe escoger adecuadamente por su influencia en la resistencia y estructuración del concreto, con suficiente dureza, y sin planos de falla. En caso de no poder corregir la granulometría del agregado, se deben realizar pruebas del diseño de mezcla considerando en las proporciones del concreto la compensación de las deficiencias granulométricas, como lo indica la normatividad de agregados en México. Referencia 27.- NMX-C-111-ONNCCE.

La granulometría y la forma de la partícula de la arena determinan significativamente la producción de un concreto de alta resistencia. Por lo que el contenido de vacíos afecta en la demanda de agua. Se estima que, con una diferencia del 1% en el contenido de vacíos en agregados finos con la misma granulometría, se tiene una demanda de 3.5 L/m^3 de agua, necesaria para alcanzar el revenimiento deseado en la mezcla. La caliza tiene un desempeño muy favorable para la fabricación del concreto de alta resistencia. Ref. 3.- ACI 211.4R.93

A continuación, se presenta la siguiente gráfica.

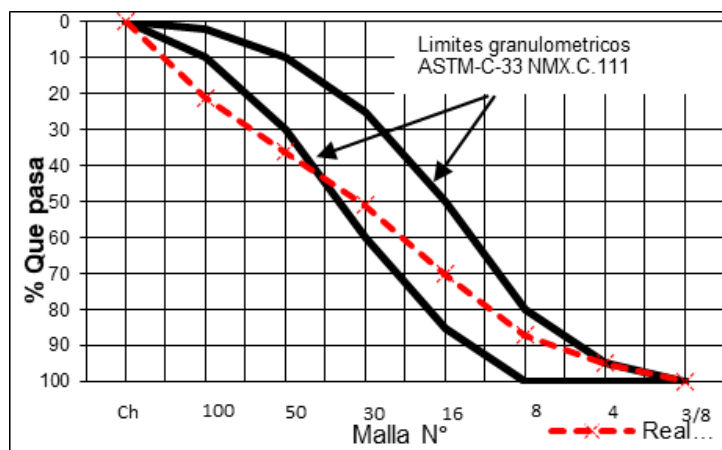


Figura No. 4.1 Granulometría de arena triturada caliza N°4, (NMX-C-111 o ASTM-C-033)

Referencia 16.- El Autor.

La gráfica de la arena triturada de la figura No. 4.1, se encuentra con dos puntos fuera de los límites granulométricos en malla No. 50 y No. 100. Exceden el máximo permitido del lado de los gruesos, por lo cual el módulo de finura es mayor a 3.1, es de 4.7. Por lo que puede solicitarse en el banco de trituración que corrijan las mallas. Las pruebas propuestas que deben cumplirse, se describen en la Tabla No. 4.1.

En cuanto a las propiedades físicas de los parámetros que incumplen con los datos especificados son pérdida por lavado y módulo de finura (Tabla No. 4.1).

Tabla No. 4.1 Propiedades Físicas del agregado arena caliza. Referencia 16.- El Autor.

PRUEBAS POR REALIZAR	NORM A NMX-C	RESULTAD O OBTENIDO	LIMITES ESPECIFICO
MASA VOLUMETRICA SUELTA (Kg/m ³)	73	1589	N/A
MASA VOLUMETRICA COMPACTA (Kg/m ³)		1704	N/A
PERDIDA POR LAVADO SOBRE MALLA N° 200 (%)	84	7.1	5.0
MASA ESP. SSS (kg / dm ³)	165	2.66	N/A
ABSORCION (%)		0.9	N/A
PARTICULAS LIGERAS (%)	72	-----	1.0
PARTICULAS DELEZNABLES (%)	71	-----	3.0
IMPUREZAS ORGANICAS	88	-----	N° 3 máximo
MODULO DE FINURA	111	4.7	2.3 a 3.1
EQUIVALENTES DE ARENA	416	90.2	80 % MIN

Se recomienda que se modifiquen las mallas 100 y 50, el módulo de finura reduce, modificando en el banco de agregados el despolve a la salida de las bandas para que se reduzca la perdida por lavado. A continuación, se presenta la segunda gráfica, es la Granulometría Grava Caliza de ½” Mina La Palma, Hidalgo Edo. México, norma NMX-C-111 o ASTM-C-33.

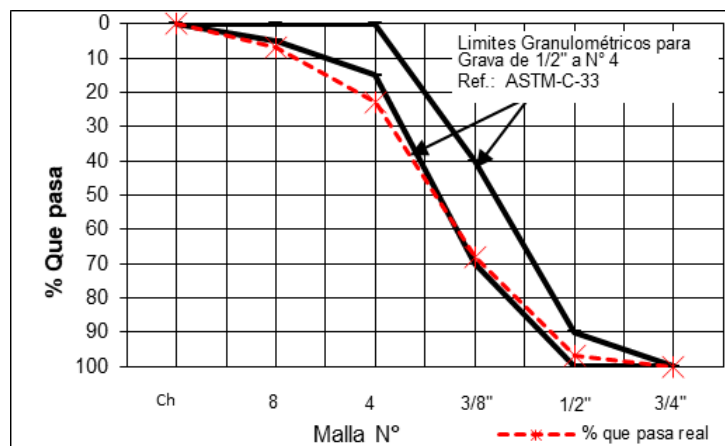


Figura No. 4.2 Granulometría de grava caliza de ½”, (NMX-C-111 o ASTM-C-033).

Referencia 16.- El Autor.

La grava caliza sobresale en dos mallas la No. 8 y No. 4 del lado de los gruesos fuera del límite, se recomienda corregir desde el banco de agregados, como lo indica la norma NMX-C-111-ONNCCE-2014. También se puede compensar en el diseño de mezcla como lo indica la misma norma.

Capítulo IV

Tabla No. 4.2 Propiedades Físicas del agregado Grava Caliza de ½” (T.M.A.)

Referencia 16.- El Autor.

PRUEBAS POR REALIZAR	NORMA DE REF.NMX-C	RESULTADO OBTENIDO	LIMITES ESPECIFIC.
MASA VOLUMETRICA SUELTA (Kg/m ³)	73	1523	N/A
MASA VOLUMETRICA COMPACTA (Kg/m ³)		1602	N/A
PERDIDA POR LAVADO SOBRE MALLA N°200 (%)	084	1.2	1.0
MASA ESP. SSS (Kg/dm ³)	164	2.64	N/A
ABSORCIÓN (%)	164	0.8	N/A
PARTICULAS LIGERAS (Carbón y lignito, %)	72	-----	0.5
PARTICULAS DELEZNABLES (%)	71	-----	5.0
CONTENIDO DE ARENA (%)	N/A	3.2	10 MAX
CONTENIDO DE GRAVA (%)	N/A	96.8	90 MIN

En la tabla No. 4.2, las propiedades físicas del agregado grueso, cumplen a excepción de la pérdida por lavado, es muy poco, sin embargo, se puede solicitar al proveedor de la mina de agregados, que cierre el despolve en la planta, para que se reduzca la pérdida x lavado.

Es de hacer notar que ambos agregados de arena y grava puede utilizarse sin ninguna modificación, siempre y cuando se compense la deficiencia de la granulometría en el diseño de mezcla y validado con pruebas de calidad en el laboratorio, lo permite la norma NMX-C-111 o ASTM-C-033.

4.4 Cemento portland (NMX-C-414-ONNCCE-2014)

La elección del tipo y origen de cemento es esencial, se toma en cuenta el tipo CPC 40 RS basándose en los resultados previamente alcanzados. El Cemento Compuesto Portland (CPC) está compuesto de clinker, yeso y dos o más aditivos. Las incorporaciones incluyen entre un 6% y un 35% de escoria y material puzolánico, entre un 1% y un 10% de humo de sílice y entre un 6% y un 35% de caliza. Sin tener en cuenta el tipo y la cantidad de material añadido, la proporción de Clinker y de yeso debe oscilar entre el 50% y el 94%. La clase resistente 40 para alcanzar una resistencia temprana mínima de 45 N/mm² en 28 días, la especificación RS para la protección del concreto en secciones enterradas en la tierra (ataque sulfatos), en puentes donde frecuentemente el agua se estanca y surgen plantas o hierbas que fomentan el desarrollo de bacterias y hongos. Ref. 38.- Norma NMX-C-414-ONNCCE-2014. Para cualquier elección de materiales, existe un contenido óptimo de cemento, ya que, aun incrementándolo, la resistencia no aumenta considerablemente, y podemos tener una mezcla demasiado pastosa, es necesario obtenerlo para el buen desempeño del diseño de la mezcla.

Ref. 3.- ACI 211.4R-93.

Capítulo IV

A continuación, se muestra la ficha técnica del cemento empleado en el presente trabajo.

Tabla No. 4.3 Ficha técnica del cemento (CPC 40 RS)

Especificaciones Físicas		Método de Prueba NMX-C-ONCCE	NMX-C-414- ONNCCE-2014		Unidades	Resultados
			Mínimo	Máximo		
Resistencia a compresión	a 3 días	061-2015	-----	-----	N/mm ²	33.4
	a 28 días *		40	-----	N/mm ²	43.8
Tiempo de Fraguado	Inicial	059-2013	45	-----	minutos	146
	Final		-----	600	minutos	302
Expansión en autoclave		062-2015	-----	0.80	%	-0.03
Contracción en autoclave			-----	0.20	%	-----
Exp.por ataque de Sulfatos (12 meses) ****		418-2015	-----	0.10	%	0.0912
Especificaciones Químicas		Método de Prueba	NMX-C-414- ONNCCE-2014		Unidades	Resultados
			Mínimo	Máximo		
SO ₃ **		131-2010	-----	4.0	%	3.3

Referencia 18.- Informe de Resultados CPC 40 RS. Cemex México, Planta Huichapan, Hidalgo.

4.5 Agua de mezclado (NMX-C-122-ONNCCE-2019)

El suministro de agua puede ser de diversas fuentes: Agua dulce, agua de mar, agua tratada o de pozos, agua residual, agua industrial, aguas negras, aguas magnesianas, aguas cloruradas, aguas sulfatadas, aguas alcalinas, acidas naturales y aguas puras.

Por este motivo se debe estudiar su composición química y su origen. En caso del contener principalmente iones de cloruro, este puede causar efectos adversos de corrosión sobre el acero de refuerzo, es habitual que, en caso de contener cloruros en el agua usada para la preparación del concreto, se deben realizar los estudios completos correspondientes, y revisar que cumpla con los valores característicos y límites tolerables. Es sabido que la red doméstica, agua de consumo humano que es agua potable cumple normalmente con estos parámetros.

Es importante una adecuada selección del agua para generar un buen desempeño en cuanto a la resistencia a compresión. En este caso, la fuente es agua de pozo, por lo que debe someterse a un estudio previo, para asegurarse que pueda emplearse y cumpla con los límites de la normativa aplicable. Ref. 15.- Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Kosmatka, Steven H, Ea tl. Illinois, EE.UU., 2004.

Los valores obtenidos se muestran en la Tabla No. 4.4, se refieren únicamente al material ensayado. Por sus características cumple con la norma de referencia y su empleo, los datos de procedencia del agua proporcionada por parte del cliente indican que su origen es agua de pozo.

Ref. 28.- Agua para Concreto .NMX-C-122-ONNCCE-2004.

Capítulo IV

Tabla No. 4.4 Estudio físico-químico del agua de mezcla (NMX-122-ONNCCE-2004)

Referencia 9.- Análisis Físico-Químico de Agua, Pozo Puramex, Texcoco, Edo. México.

Muestra -Agua de Pozo	No. 1 p.p.m. (mg/L)		
	Resultados Obtenidos	Cementos ricos en calcio	Cementos Sulfato- Resistentes
Sólidos en suspensión			
En aguas naturales (Limos y arcillas)	0	2 000	2 000
En aguas recicladas (Finos de cemento y agregados)	-----	50 000	35 000
Cloruros como Cl			
Para concreto con acero de pre-esfuerzo y piezas de puentes	53	400	600
Para otros concretos reforzados en ambiente húmedo o en contacto con metales como el aluminio, fierro galvanizado y otros similares	-----	700	1 000
Sulfato como SO ₄	38	3 000	3 500
Magnesio como Mg+2	24	100	150
Carbonatos como:			
Alcalinidad, (CO ₃):	-----	600	600
Alcalinidad, (HCO ₃):	152	600	600
Dióxido de carbono disuelto, como CO ₂ :	-----	5	3
Álcalis totales como Na ⁺ :	82	300	450
Total de impurezas en solución	50	3500	4000
Grasas y aceites	0	0	0
Materia orgánica (Oxígeno consumido en medio ácido)	0	150	150
Valor del PH	7.4	No menor de 6.0	No menor de 6.0
Calcio, (Ca+2)	19		
Color	INCOLORO		
Olor y sabor	INODORO		
Aspecto	DIAFANA		
Dureza total como CaCO ₃	-----		

4.6 Aditivos para el concreto (ASTM-C-494/C 494M-99)

Los aditivos para el concreto son de uso común y necesario, debido a las muy variadas aplicaciones. Principalmente las características de aditivo dependerán del elemento a colar. Se encuentra íntimamente vinculado con las necesidades de la obra, como el tiempo de ejecución conforme a un programa de obra.

Los aditivos superplastificantes con base policarboxilatos son de tercera generación y tienen alguno de los mecanismos mencionados a continuación:

- Absorción del polímero sobre las superficies de las partículas
- Repulsión electrostática (dispersión)
- Repulsión estérica
- Bloquea las partículas de cemento donde es reactivo superficialmente, por las moléculas de superfluidificante.

Ref. 46.- Tecnología del concreto Alto desempeño Pablo Portugal Barriga.

4.6.1 Clasificación de aditivos según norma (ASTM-C-494/C 494M-99)

Los aditivos superplastificantes son empleados como altos reductores de agua, muy eficientes en mezclas de concretos ricos en materiales cementantes, se agregan según su propósito, la tabla siguiente indica los diferentes tipos de aditivos:

Tabla No. 4.5 Clasificación de aditivos para concreto.

Tipo	Características de acción en el concreto
A	Reductores de agua.
B	Retardadores del tiempo de fraguado.
C	Acelerantes
D	Reductores de agua y retardadores de fraguado.
E	Reductores de agua y acelerantes.
F	Reductores de agua de alto rango.
G	Reductores de agua de alto rango y retardadores

La tabla No. 4.5, permite observar los distintos tipos de aditivos y su empleo, para este caso se utilizó como aditivo reductor de agua tipo A y superfluidizante tipo F. Ref.14 ASTM-C-494M-99.

Tabla No. 4.6 Ficha técnica de aditivo clase A y F.

Aditivo base PC para altas resistencias iniciales ASTM C494 Tipos A y F, y ASTM C1017 Tipo I			
Base	Polixicarboxilato (PC)	Cohesión del concreto	Mejorada con baja viscosidad, favorece colocación rápida
Clase	A y F	Acabado	Mejorado para superficies expuestas
Tipo	I, reductor de agua de alto rango, reducción del 12% al 30%.	Permanencia	Excelente
Gama de concretos	Convencionales hasta autocompactables	Relación a/c	Baja, da tolerancia y estabilidad
Resistencia Inicial	Alta, como se necesita en prefabricados	Dosis de aplicación	Desde 400 a 1400 ml/100 kg de materiales cementantes
Trabajabilidad	Extremadamente buena, sin segregación	Recomendación	No mezclar con aditivos de base naftaleno
Normas	ASTM-C-494	Condiciones de almacenaje	Se debe almacenar en tótem o recipientes herméticos, se congela al tener una temperatura de 0°C, sin embargo, retoma a su estado líquido.
Densidad específica kg/L	1.1	Contenido de aire	Normal dependiendo materiales, sin considerar congelación y deshielo (inclusor de aire).
Característica	No contiene cloruros	Es necesario realizar pruebas de laboratorio antes de usar cualquier tipo de aditivo en las condiciones y con los materiales definitivos para obtener los resultados satisfactorios deseados.	

Referencia 44.- Productos para concreto, aditivos GRACE,ADVACAST 542.

4.6.2 Curado a vapor (ACI 517-70)

El procedimiento a base de vapor, fue empleado especialmente en la prefabricación de elementos de concreto, gracias a que se alcanza un mayor aprovechamiento de los moldes, pudiéndose disponer de los elementos fabricados en un menor tiempo. El vapor de agua ofrece el calor y la humedad esenciales para lograr que el cemento Portland se mantenga hidratado, es un sistema idóneo para el endurecimiento del producto en condiciones satisfactorias, y sólo que no es aconsejable aplicarlo cuando se utilicen cementos aluminosos o sobresulfatados.

Para las grandes obras en prefabricación del concreto en masa, se aplica el procedimiento eléctrico, el cual se ha empleado en la construcción de presas en Japón y en la Unión Soviética.

Por su naturaleza y sencillez de las instalaciones para producir el vapor de agua y transmitirlo a la masa, resultó ser uno de los procedimientos más usados en la industria del prefabricado de concreto y una ventaja de incremento de resistencia a edades tempranas.

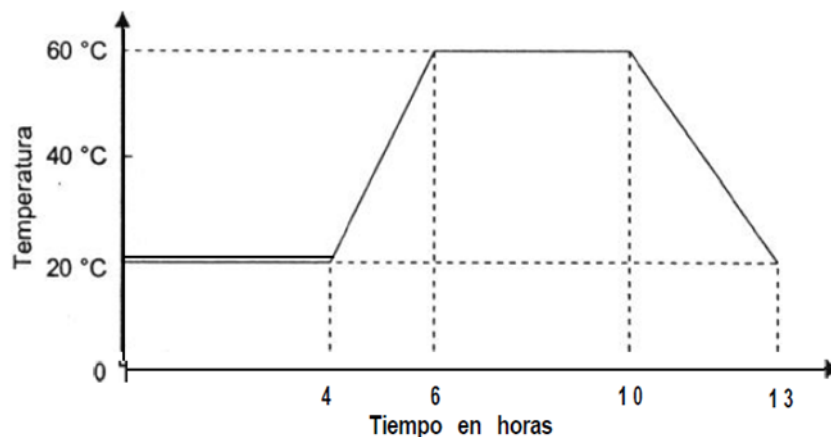


Figura No. 4.3 Gráfico del ciclo térmico del curado a vapor del concreto.

El ciclo térmico figura No. 4.3, se compone de las siguientes etapas: a) Periodo preliminar de 0 a 4 horas esperando el prefraguado inicial del concreto, b) Periodo de 2 horas, de incremento gradual de la velocidad de calentamiento y temperatura hasta llegar a la máxima de 60 °C, c) Periodo de permanencia de 4 horas en la temperatura máxima constante a 60 °C, y d) Periodo de enfriamiento de 3 horas, la generadora de vapor descende gradualmente la temperatura hasta llegar a temperatura ambiente, es de hacer notar que esta última parte es más que necesaria para evitar choques térmicos y fisuración prematura de la estructura, la edad promedio del concreto con el curado a vapor es de 13 a 15 horas.

Referencia 8.-ACI 517-70 Curado a vapor.

Para curado a vapor, es de tomarse en cuenta que los factores que propician altas resistencias a edades tempranas se oponen a los factores que favorecen las resistencias posteriores, por lo que el monitoreo, el cuidado de las muestras, y el cálculo adecuado de la cantidad de cemento asegura un resultado favorable, ya que en algunos casos se han detectado resistencias bajas a 28 días por curado a vapor, esto tiene que ver principalmente con los cuidados de las muestras a edades posteriores y su proceso de ensaye.

Los periodos inicial y final durante el curado a vapor, deberán determinarse de manera experimental, ya que para cada tipo de cemento varia su tiempo de fraguado inicial y final, dependiendo de la forma y el volumen de concreto, de esto dependerá cuanto tiempo tardará en bajar la temperatura del elemento a temperatura ambiente.

Hoy en día la tecnología de los aditivos químicos mediante un curado a humedad, logra sin vapor las resistencias rápidas a edades tempranas, un parámetro común son 18 horas después de finalizar el colado, puede incrementarse a 24 horas dependiendo del desarrollo de la resistencia a compresión, con un ahorro económico muy importante, por todo lo que implicaba el curado a vapor (caldera, químicos, generador, diésel, gran cantidad de agua, tuberías y operador, etc.).

Una vez definidas las características de los materiales, el siguiente paso es el diseño de la mezcla con los datos siguientes:

Tabla No. 4.7 Especificaciones técnicas del concreto

Resistencia a compresión (f'c)	500 kg/cm ²
Revenimiento	18 cm
Edad	14 días
Tipo de concreto	RR
Concreto estructural:	Tipo 1
Permanencia	2 horas
Resistencia al desmolde	400 kg/cm ² a 18 horas
Colocación	Bombeable
T.M.A.	12.5 mm

Referencia 17.- Índice y Notas Generales – Tren México Toluca.

En la tabla No.4.7, se muestra la edad de garantía a 14 días, el revenimiento es de 18 cm, la resistencia a compresión de proyecto es de 500 kg/cm². El tipo de concreto es de resistencia rápida (RR), con una permanencia de 2 horas y una resistencia inicial al desmolde de 400 kg/cm² a la edad de 18 horas, tipo de colocación bombeable (requiere de suficiente arena para lubricar tubería), tamaño máximo del agregado grueso (T.M.A.) de 12.5 mm.

4.7 Volumen absoluto

En materiales granulares como el cemento y los agregados, se refiere al volumen de la materia sólida presente en las partículas que lo constituyen, sin tener en cuenta el volumen de los espacios vacíos entre ellas. Se determina a partir de la masa de los materiales y las masas específicas relativas o densidad relativa, de la siguiente manera:

$$\text{Volumen absoluto} = \frac{\text{Masa del material suelto}}{\text{Masa específica relativa del material} \times \text{Densidad del agua}}$$

Referencia 15.-Diseño y Control de Mezclas de Concreto, PCA, Portland Cement Association, 2004.

4.7.1 Diseño de mezcla con base en datos de experiencia en campo

El procedimiento para proporcionar mezclas de concreto de alta resistencia puede emplearse con un concreto de peso normal, sin aire incluido. Considerando las propiedades del concreto de alto desempeño, y las resistencias altas de 420 kg/ cm² a 850 kg/ cm², se utiliza para lograrlo un aditivo de alta reducción de agua (HRWR) por sus siglas en inglés, ver tabla No. 4.6.

La mezcla se prueba sin aditivo, es para obtener un revenimiento de entre 50 y 100 mm, en el presente trabajo es de 100 mm. Los concretos de alta resistencia se utilizan en elementos que tienen una gran densidad de acero y se ha observado que en revenimientos mayores a 200 mm o 20 cm. La mezcla es colocada más fácilmente cuando tiene la trabajabilidad necesaria al incorporar los aditivos HRWR. Obteniendo un incremento considerable de las resistencias en todas las edades de prueba.

Paso 1.- Selección del revenimiento y de la resistencia del concreto requerido:

Se requiere elegir un revenimiento inicial con o sin la adición del aditivo como sigue:

Tabla No. 4.8 Selección del revenimiento recomendado para concretos con y sin HRWR

Tipo	Revenimiento inicial
Concreto hecho usando HRWR*	25 a 50 mm
Concreto hecho sin HRWR	50 a 100 mm

Referencia 3.- ACI 211.4R.

Se inicia con el concreto hecho sin incluir aditivo HRWR, con revenimiento inicial de 100 mm (10 cm), para ajustar bien el revenimiento. Debido a que no queremos estar adicionando en campo, preferimos que salga con el revenimiento requerido desde la planta de concreto. Por lo que un revenimiento de 22 cm (18 ±3.5) sería adecuado usando el HRWR, con este revenimiento se debe obtener la cantidad suficiente de agua para hidratar los agregados pétreos y el cemento principalmente. La resistencia requerida (f'_{cr}), está de acuerdo con la siguiente ecuación:

Capítulo IV

$$f'_{cr} = \frac{(f'c + 100)}{0.9} = \frac{(500 + 100)}{0.9} = 667 \frac{kg}{cm^2} \quad (Ec.4.3)$$

El código ACI – 318RS-14 recomienda la ecuación No. 4.3, que permite obtener mayor resistencia con base en observaciones, ya que las pruebas de laboratorio no llegan al 90% de la resistencia requerida. No se puede esperar que iguale la resistencia obtenida en laboratorio como la prueba industrial. Sería un error, para este tipo de resistencia también suele ensayarse a 56 días y 91 días o puede utilizarse una proyección de la resistencia a edades posteriores, cuando se requiere conocer el resultado antes del ensaye real, esto es una aproximación.

Cabe mencionar que para la resistencia a los 28 días como lo indica el PCA, se debe corregir la desviación estándar, se cuenta con 20 pruebas de mezclas de concreto para un $f'c = 500 \text{ kg/cm}^2$, normalmente solicitan 30 datos, quedando el ajuste de la siguiente manera:

Tabla No. 4.9 Selección de la desviación estándar.

Número de ensayos	Factor de corrección para la desviación estándar	Se tienen 20 pruebas de Laboratorio con una desviación estándar de 47 kg/cm ²
Menos de 15	Use la tabla 4-10	$\sigma = 47 \text{ kg/cm}^2$
15	1.16	Factor de corrección de 20 pruebas
20	1.08	igual a 1.08
25	1.03	La desviación estándar corregida queda:
30 o más	1.00	$\sigma_{cr} = 1.08 * 47 = 51 \text{ kg/cm}^2$

Referencia 7.- ACI 318S-14, autores Randall W. Poston, Basile G. Rabbat, Et al.

Tabla No. 4.10 Selección de la resistencia a compresión media requerida cuando no hay datos disponibles para establecer la desviación estándar.

Resistencia a compresión, kg/cm ²	
especificada, $f'c$	media requerida
Menos de 210	$f'c + 70$
210 a 350	$f'c + 84$
Más de 350	$1.10 f'c + 50$

Referencia 7.- ACI 318S-14, autores Randall W. Poston, Basile G. Rabbat, Et al.

La resistencia requerida se calcula de la siguiente manera:

$$f'_{cr} = f'c + 1.34 \sigma = 500 + (1.34 * 51) = 568.34 \frac{kg}{cm^2} \quad Ec. (4.4)$$

$$f'_{cr} = 0.9 f'c + 2.33 \sigma = (0.9 * 500) + (2.33 * 51) = 568.83 \frac{kg}{cm^2} \quad Ec. (4.5)$$

En donde σ , es la desviación estándar de la muestra en kg/cm².

Como se puede observar el resultado de la ecuación (4.3), el resultado es más alto que de las ecuaciones (4.4) y (4.5), y como se indicó por tratarse de alta resistencia se diseña empleando la ecuación (4.3).

Paso 2.- Selección del tamaño máximo de agregado:

De acuerdo a especificación , se recomiendan tamaños máximos de agregado grueso que no deben mayores a una quinta parte de la dimensión más corta, entre los lados de los moldes, no más de un tercio del peralte de las losas, ni de tres cuartos del claro mínimo entre las varillas de refuerzo individuales, paquetes de varillas, tendones de presfuerzo o ductos, en este trabajo se cumplen dichas especificaciones. Referencia 15.- Diseño y Control de Mezclas de Concreto Kosmatrka et al.2004, PCA.

De acuerdo con el análisis de resistencia se tiene que el $f'_{cr} = 667 \text{ kg/cm}^2$, y en función de este resultado el tamaño máximo del agregado seleccionado es de 12,5 mm ($\frac{1}{2}$ "), en la siguiente tabla se tiene :

Tabla No. 4.11 Tamaño máximo sugerido para el agregado grueso (grava). (Ref. 7.- ACI-318).

Resistencia requerida del concreto, kg/cm^2	Tamaño máximo sugerido en mm
Menor de 650	25
650	9.5 - 12.5

Para obtener resistencias a compresión del concreto en el rango de 650 a 850 kg/cm^2 , se emplean aditivos tipo HRWR, y agregados gruesos de tamaño máximo nominal mayor que el recomendado para resistencias de 650 kg/cm^2 (Tabla No. 4.11), en el ejemplo se emplea el tamaño máximo del agregado de 12.5 mm.

La determinación del contenido ideal del agregado grueso se lleva a cabo teniendo en cuenta las propiedades de resistencia y tamaño máximo nominal.

En la Tabla No. 4.12 siguiente, se coloca al volumen de agregado grueso varillado y secado al horno en función del tamaño máximo nominal y módulo de finura de la arena de 2.5 a 3.2, como una fracción de la masa volumétrica en seco. Ref. 3.- ACI 211.4R-93. Guía para seleccionar las proporciones para concreto.

Tabla No. 4.12 Volumen recomendado de agregado grueso por unidad de volumen de concreto.

Tamaño máximo nominal, mm (in)	9.5 (3/8")	12.5 (1/2")	20 (3/4")	25 (1")
Volumen fraccionario*	0.65	0.68	0.72	0.75

* Los volúmenes están basados en agregados en condiciones de secado al horno tal como se describe en ASTM-C-29 para la unidad de masa o densidad aparente de los agregados.

La tabla 4.12 nos indica que para agregado de $\frac{1}{2}$ " se tendrá un volumen fraccionario de 0.68.

Capítulo IV

El siguiente paso es obtener el peso del agregado grueso secado al horno (OD) por m³ de concreto, se calcula con la siguiente ecuación.

$$\text{Peso del agregado grueso secado al horno(OD)} (\% \times MV_{sc}) =$$

$$0.68 \times 1523 = 1036 \text{ kg/m}^3, \text{ donde : } MV_{sc} - \text{Masa Volumétrica en seco.}$$

Al tratarse de concreto de alto desempeño y autocompactable, la relación en porcentaje de participación del agregado grueso y el agregado fino es más estrecha, es más baja acercándose a ser casi iguales o muy parecidos ambos. Mientras para una mezcla normal el porcentaje de grava es del 45% y del 25% arena, para una CAC (concreto autocompactable) es del 36% grava y 26% arena, por lo que utilizaremos la tabla 9.4 del PCA para obtener el contenido de grava adecuado a emplearse, para 12.5 mm, T.M.A. en grava, se tiene un porcentaje de agregado grueso de 53% (0.53), y la masa volumétrica de la grava caliza suelta es 1523 kg/m³ de la tabla No. 4.2, sustituyendo queda como sigue:

$$\text{Contenido de grava} = 0.53 \times 1523 = 807 \text{ kg/m}^3$$

Para concretos de alta resistencia, su mezcla contiene una gran cantidad de material cementante, por lo que resulta crucial controlar la cantidad de agregado fino, ambos son útiles en la lubricación de la compactación del hormigón en estado fresco. De esta manera, los valores indicados en la tabla 4.12 son aconsejables para arenas con valores de finura de 2.5 a 3.2.

Paso 4.- Estimación del agua de mezcla y del contenido de aire.

La cantidad de agua por el peso unitario de concreto requerida para producir un revenimiento dado depende del tamaño máximo de la partícula, y la granulometría del agregado. Por lo tanto, la forma más efectiva de determinar las mejores proporciones para un conjunto dado de ingredientes es a través del proceso de pruebas y por lotes. Si se utiliza un lote un HRWR, el contenido de agua se calcula como parte de la relación agua/cemento y materiales cementicios, $w / (c + p)$.

Debido a que la conformación de las partículas y de la superficie del agregado fino pueden tener un impacto considerable en su contenido de vacíos, modificando los requerimientos de agua para la mezcla y pueden variar de los valores proporcionados.

El contenido de huecos de un agregado fino se puede calcular mediante la ecuación (4.6), y de la tabla No. 4.1 arena triturada caliza, densidad específica 2.66 kg/m³, y la masa volumétrica suelta 1704 kg.

$$\text{Contenido de huecos, } V \% = \left(1 - \frac{\text{masa unitaria varillada y seca al horno}}{\text{masa específica del material (seco)} \times 1000} \right) \times 100 \quad \text{Ec. 4.6}$$

$$V \% = \left(1 - \frac{1704}{2.66 \times 1000} \right) \times 100 = 35.94 \%$$

Capítulo IV

Debemos obtener la proporción del agua de mezcla requerida para concreto de alto desempeño, antes de agregar cualquier aditivo químico.

Los valores estimados correspondientes para el contenido de aire atrapado y cantidades de agua de mezclado son máximos para agregados gruesos angulares limpios, con buena calidad, considerando una arena con 35 por ciento de vacíos, los datos se obtienen de la siguiente tabla:

Tabla No. 4.13 Estimación de la cantidad de agua y de aire atrapado en la mezcla.

Revenimiento requerido en mm	Agua de mezclado, kg/m ³			
25 a 50	185	175	170	165
50 a 75	190	185	175	170
75 a 100	195	190	180	180
T.M.A grueso, mm	9.5	13	20	25
Contenido de aire atrapado % *	3.0	2.5	2.0	1.5
Contenido de aire atrapado % t	2.5	2.0	1.5	1.0

t - Mezclas hechas usando HRWR. Referencia 3.- ACI 211.4R-93

Tomando en cuenta la tabla No. 4.13, se obtienen inicialmente el primer dato a emplearse en la demanda de agua de mezcla y contenido de aire, ambos del concreto en estado fresco, con 35% de vacíos en finos. Es decir, contenido de agua para un agregado de 13 mm, y un revenimiento de 75 a 100 mm sin incluir aditivo HRWR, le corresponden 190 L de agua, y 2.5% de aire.

Ahora bien, se debe realizar un ajuste al contenido de agua, debido a una variación de los vacíos en los finos que no corresponden exactamente al 35%, aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{Ajuste del agua de mezclado, } \frac{kg}{m^3} = (V - 35) \times 5 \quad \text{Ec. 4.7}$$

$$\text{Ajuste de agua} = (35.94 - 35) \times 5 = 5 \quad \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

La corrección del agua en la mezcla queda como: $190 + 5 = 195 \text{ L/m}^3$

Paso 5.-Selección de la relación agua/material cementante.

La relación agua / material cementante $w/(c+p)$, se calcula dividiendo la masa del agua de mezclado entre la masa combinada del cemento y los materiales cementantes.

En el ACI 211.4R en las tablas 4.3.5. a) y 4.4.5.b), se encuentran las relaciones recomendadas máximas $w/(c+p)$, se establecen en función del tamaño máximo del agregado para alcanzar distintas resistencias a compresión a 28 o 56 días.

De la tabla 4.4.5 b), se obtienen los valores de la relación $w/(c+p)$, con los siguientes datos: $f'_{cr*} = 500 + 100 = 600 \text{ kg/cm}^2$ que es aproximadamente la resistencia de 635 kg/cm^2 , y con el T.M.A de 13 mm, da una relación agua/material cementante igual a 0.36. Emplear aditivos superfuidificantes resulta en el incremento de la resistencia a compresión del concreto.

Paso 6.- Cálculo del contenido de material cementante:

La cantidad de cementante necesaria por cada m^3 de concreto, puede calcularse dividiendo el contenido de agua adquirido en el paso 4 entre la relación agua/ cementante $w/(c+p)$ del paso 5.

$$\text{Masa de material cementante} = \frac{w}{(c + p)} = \frac{195}{0.36} = 542 = 545 \text{ kg/m}^3$$

Se ajusta de 5 kg en 5 kg la cantidad de cemento, por la simple razón que de 1 kg en 1 kg no es representativo el incremento en la resistencia a compresión.

Paso 7.- Proporción de la mezcla básica sin ningún otro material cementante:

De los pasos anteriores tenemos:

Tabla No. 4.14 Datos de diseño de mezcla sin considerar el agregado fino (arena).

Material	Cantidad	Densidad kg/dm^3	Vol. Litros
Agua de mezcla	195	1.00	195
Cemento	545	3.15	173
Grava	807	2.64	306
Aire	1%	10	10
		Suma	683.8

Referencia 16.- El Autor

Por el método del volumen absoluto se obtiene la cantidad de agregado fino (arena), para 1m^3 de concreto se tiene un volumen de 1000 litros, y la densidad de la arena es de 2.66, entonces se obtiene:

$$\text{Contenido de arena en litros} = 1000 - 683.8 = 316.2 \text{ litros}$$

$$\text{Contenido de arena en kg} = 316.2 * 2.66 = 841 \text{ kg}$$

Para el cálculo no se consideró el volumen del aditivo por ser muy pequeño. Es conveniente que el volumen de concreto a producir sea mayor a 1000 L, así se consideran las pérdidas por desperdicio y las pruebas de laboratorio, es decir su rendimiento sea mayor a 1.00 de m^3 , y se reporta con una aproximación de 0.01 de m^3 , con un rango de 0.99 a 1.01 de m^3 . De esta forma la mezcla queda de la siguiente manera:

Capítulo IV

Tabla No. 4.15 Diseño de mezcla final con el método de volumen absoluto.

Material	Procedencia	Densidad kg/dm ³	Cantidad	Unidad	Vol. (L)
Cemento tipo CPC 40 RS	Cemex Huichapan	3.15	545	kg	173
Agua Potable	Red Municipal	1.00	195	l	195
Grava 1/2" Caliza	La Palma	2.64	807	kg	306
Arena triturada caliza	Cerro Jardín	2.66	841	kg	316
Aditivo N° 2 ADVACAST- 542	Grace	1.10	4.905	l	4.459
Vacíos		10	1.0		10
					688
Vol. Teórico a producir	1000 Litros	Total, kg/ m ³ =	2393	L / m ³ =	1004

Ref. 16.- El Autor.

Finalmente, con este diseño validado a nivel laboratorio se procede a la prueba industrial en la planta de concreto, esta obtuvo resultados satisfactorios para su empleo en la fabricación de dovelas.

Cabe mencionar que un diseño no es definitivo, ya que sufre ajustes por distintas condiciones, una de ellas es el cambio de fuente de agregados, cambio de cemento o cambio de aditivos.

En caso de mantener la misma matriz de materiales empleados, otras situaciones a presentarse son las condiciones climáticas, clima frío durante el colado del elemento, una temperatura a considerarse son 4°C, en este caso debe bajarse la cantidad de aditivo retardante, porque se atrasará el fraguado inicial del concreto por un tiempo mayor al esperado.

En el clima caluroso, se considera las condiciones siguientes: Incremento en la temperatura ambiente, de la velocidad del aire, del concreto, por la presencia de radiación solar baja en la humedad relativa, y estos elementos naturales parcialmente o juntos provocan pérdida de agua, que reside en pérdida de revenimiento, agregar agua en el sitio, al agrietamiento por contracción plástica al perder humedad rápidamente, una mayor dificultad para controlar el contenido de aire incluido, en consecuencia aumenta considerablemente la hidratación del cemento, y el concreto endurece rápidamente. Es difícil controlar todos los inconvenientes que trae el clima caluroso, sin embargo algunas recomendaciones son: Enfriar el concreto (hielo en escarcha es lo más recomendable, enfriar el agua y agregados, mantener agua fría en tanques o tuberías), emplear una consistencia que permita la colocación del concreto rápidamente (aumento de aditivo y ajuste de agua), reducir el tiempo de traslado o reducir el volumen transportado en la unidad, durante el colado proteger rápidamente el elemento contra los efectos adversos y también en el curado, programar adecuadamente la secuencia del colado durante el clima caluroso. Referencia.- ACI 305R-99 Clima Caluroso, y ACI 306-88 Clima Frío.

DOVELAS PREFABRICADAS

5.1. Proceso de fabricación de los prefabricados y especificaciones de proyecto

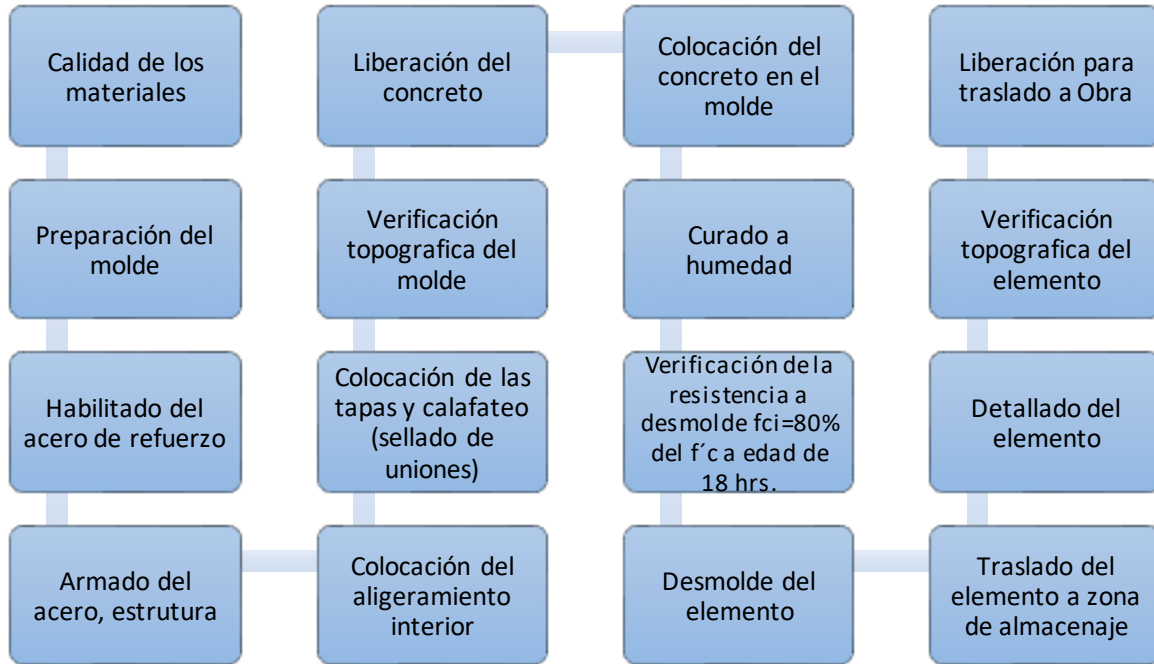


Figura No. 5.1 Proceso de fabricación de dovelas. Ref. 16.- El Autor.

Una vez que ya se tiene el diseño de la mezcla óptima para la fabricación, esto incluye la calidad de los materiales, en consecuencia, como se indica en la figura 5.1, se prepara el molde incluye instalación, nivelación, revisión geométrica, etc., y se tienen los siguientes controles:

- 1.- Lista de verificación de acero de refuerzo.
- 2.- Lista de verificación antes de poner en molde / patio prefabricado.
- 3.- Muestreo de concreto.
- 4.- Lista de control de inspección posterior al pedido y previo al embarque.
- 5.- Inspección de la dimensión.

5.2 Marco geográfico

La Obra del viaducto ferroviario que conecta la Ciudad de México con Toluca, contiene un segmento de tramo, que fue elaborado con dovelas de concreto postensado. Las dimensiones generales del tramo son: Longitud total de 57.70 km, el cual cuenta con 6 estaciones y un taller.

Las características geométricas de las dovelas corresponden a una sección transversal de 11.50 m (ancho variable de losa), 5.00 m de base y 3.293 m de altura.



Figura No. 5.2 a) Colocación de la Dovela con la Cimbra autolanzable.

b) Claro completo de Dovelas. Referencia web:

<https://victorypes.blogs.upv.es/2015/10/05/puentes-dovelas-cimbras-autoportantes/>

5.3 Sistema de prefabricación dovelas postensadas

Este sistema consta de viaducto isostático de dovelas prefabricadas, con claros tipo de 45 m, 40 m y 35 m, medidos entre ejes de columna. Vanos formados por dovelas prefabricadas de longitud variable de 2,60 m a 3,60 m. La sección cajón tiene una altura de 3.35 m y una losa superior de 11.50 m de ancho.

Vinculación tablero-subestructura:

- Verticalmente cuenta con 2 aparatos de apoyo elastoméricos separados 3,90 m.
- Transversalmente cuenta con coacción mediante topes de concreto dispuestos en los cabezales de las columnas.
- Longitudinalmente se permiten movimientos de la superestructura en servicio, pero se restringen los desplazamientos debidos al sismo, riesgo de colapso mediante dispositivos de concreto dispuestos en los cabezales de las columnas.

Se emplea en lugares donde el acceso a la zona de construcción es muy accidentado o donde es complicado tener equipos de grandes dimensiones para montar los elementos prefabricados en sitio.

Capítulo V

También es conocido por su tipología como puente continuo, construido vano a vano sobre cimbra autolanzable.

La nomenclatura de las Dovelas es la siguiente : D-01 a la , 00, 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 10 y 11, para un vano de 45 m, cada una de ellas detalladamente colocada según el arreglo del vano a vano. Ver figura 5.3 c).

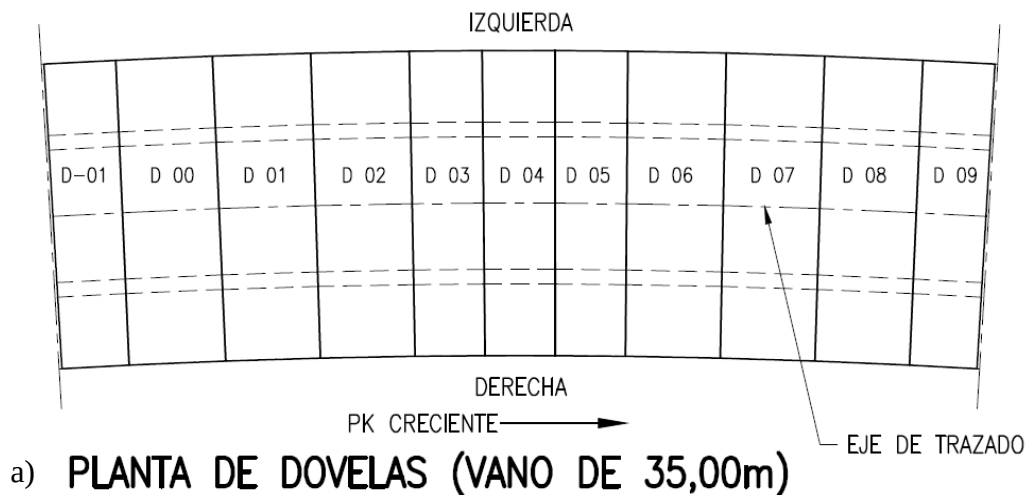


Figura No. 5.3 a) Vista en planta de un claro de 35 m de vano a vano del acomodo de Dovelas.
Ref.17.- Índice y Notas Generales - Tren México Toluca.

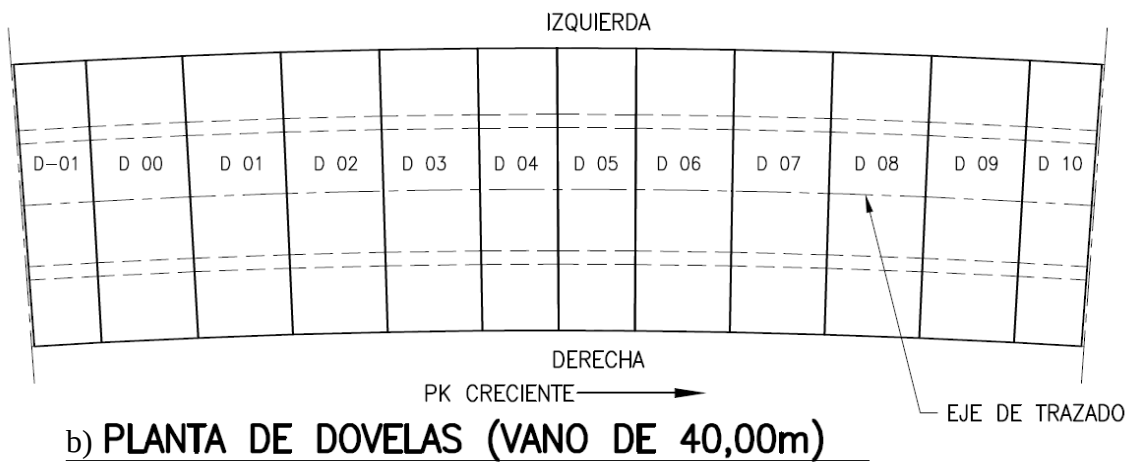


Figura No. 5.3 b) Vista en planta de un claro de 40 m de vano a vano del acomodo de Dovelas.
Ref.17.- Índice y Notas Generales - Tren México Toluca.

Capítulo V

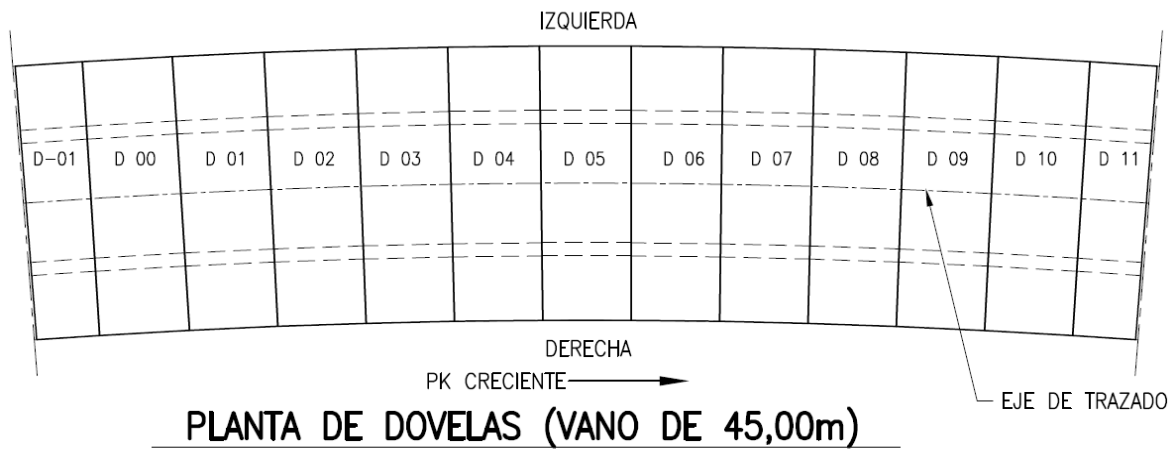


Figura No. 5.3 c) Vista en planta de un claro de 45 m de vano a vano del acomodo de Dovelas.
Ref.17.- Índice y Notas Generales - Tren México Toluca.

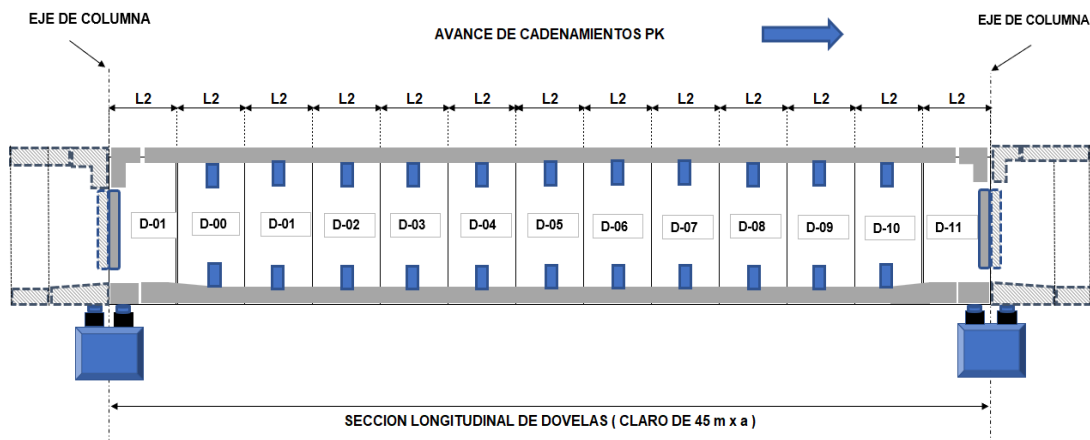


Figura 5-4. Sección longitudinal de las Dovelas de vano a vano en claro de 45 m, de apoyo entre ejes de columnas. Ref. 16.- El Autor.

Tabla No. 5.1 Tipología de sección longitudinal para vano a vano de claro de 45 m.

DOVELA	D-01	D-00	D-01	D-02	D-03	D-04	D-05	D-06	D-07	D-08	D-09	D-10	D-11
TIPOLOGIA	EJ-003	S1-001	S2-001	T1-001	T1-002	T1-303	T1-004	T1-003	T1-002	T1-001	S4-001	S3-001	EJ-001
LOG.TEORICA L2 (mm)	2600	3600	3600	3600 x a	3600 x a	3600 x a	3600 x a	3600 x a	3600 x a	3600 x a	3600	3600	2600
VOL.TEORICO (m3)	32.839	28.802	27.178	27.178	27.178	27.178	27.178	27.178	27.178	27.178	27.178	28.802	32.839

a – Factor de ajuste de la distancia real.

Referencia 17.- Índice y Notas Generales - Tren México Toluca.



Referencia 17.- Índice y Notas Generales - Tren México Toluca.

La figura No. 5.5. Consta de base y 2 muros por cada uno de ellos tiene 4 tubos de PVC para colocar el torón de postensado, 2 alerones y la losa en la parte superior.

A continuación, se presenta el proceso de fabricación de Dovelas en secuencia fotográfica:



a) Habilitado de acero en molde para Dovelas



b) Estructura de acero habilitada



c) Limpieza del molde metálico



d) Colocación de armado y de corazón



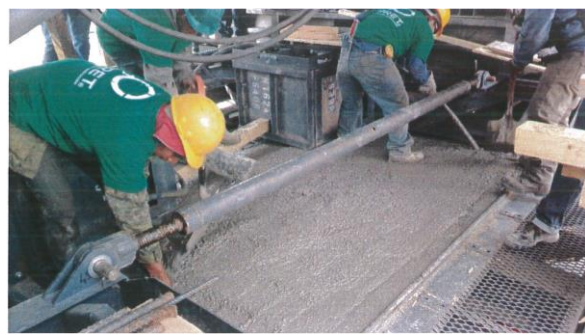
e) Colocación de Dovela anterior como tapa



f) Colado de la Dovela, parte superior losa.



g) Final de colado y detallado de losa



h) Detallado de base de Dovela



i) Dovela lado ancho, sección de cara dentada para colocación con la siguiente.



j) Dovela desmoldada secciones transversal, lista para rotulación

Figuras 5.6 a) Habilitado de acero en molde para dovela, b) Estructura de acero habilitada, c) Limpieza del molde metálico, d) Colocación de armado y de corazón, e) Colocación de dovela anterior como tapa, f) Colado de la dovela, parte superior losa, g) Final de colado y de tallado de losa, h) Detallado de base de dovela, i) Dovela lado ancho, sección de cara dentada para colocación con la siguiente, j) Dovela desmoldada secciones transversal, lista para rotulación.
Referencia 16.- El Autor.

Las fotografías de la figura 5.6, ejemplifican el proceso de fabricación de la dovela, conforme a su ciclo de fabricación en sus distintas etapas, para después de almacenarla y enviarse a montaje en tramo.

5.4 Especificaciones de Proyecto

5.4.1 Concreto

Las clases de concreto deberán ser las siguientes:

Tabla No. 5.2 Tipos de concretos.

ELEMENTO	$f'c$ (kg/cm ²)	Tipo de concreto	Tipo de árido	Tamaño máximo del agregado (mm)	E_c (Mpa) $4400*(f'c)^{1/2}$	Cemento mínimo (kg/m ³)	Máxima Relación Agua/Cemento	Recubrimiento libre (mm)
Dovelas prefabricadas	500	1	cálizo	12	31113	334	0.49	30
Bordes típicos y canaletas	300	1	cálizo	25	24100	307	0.58	30
Columnas y Cabezales in situ	400	1	cálizo	12	27828	334	0.49	40
Zapatas	300	1	cálizo	25	24100	362	0.49	75
Pilas	250	1	cálizo	25	22000	362	0.49	75
Plantillas de Concreto	150	1	cálizo	30	17041	307	0.58	--

Referencia 17.- Índice y Notas Generales - Tren México Toluca.

El concreto deberá tener las siguientes características:

- Resistencia mínima del concreto en el momento de desmolde 17 Mpa.
- Resistencia mínima del concreto en el momento de levantamiento 25 Mpa.
- Resistencia mínima del concreto en el momento de tensado 35 Mpa.
- Recubrimiento a la superficie o extremo final de la armadura principal según la tabla 5.12.3-1 de AASHTO LRFD Brige Design Specifications (excepto si se especifica otro valor).
- El recubrimiento a la superficie o extremo final de cercos, horquillas u otras armaduras secundarias podrá ser 12 mm, menor que el especificado para las varillas principales, pero nunca inferior a 25 mm.
- Cuando no se utilicen cimbras, el concreto reforzado deberá ser colado sobre una capa de 100 mm de concreto de limpieza de clase $f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$ (sin membrana impermeable).
- Se emplearán concretos de la resistencia requerida y se vibrará al instalarlos. Si el contratista requiere usar aditivos, deberá justificar de manera adecuada la cantidad y dosificación de estos productos proporcionando al ingeniero residente ensayos satisfactorios de su uso con los agregados y cemento a utilizarse.

5.4.2 Acero de Refuerzo

- Acero de refuerzo con límite elástico $f_y > 4200 \text{ kg/cm}^2$.
- Longitudes de desarrollo y traslapes de acuerdo con AASTHO LRFD 5.11.2 y 5.11.5.
- Los traslapes en barras contiguas se contrapearán excepto cuando en los planos se indique lo contrario.
- Las separaciones se acotan perpendiculares a las varillas.

5.4.3 Acero de Presfuerzo

El acero de presfuerzo deberá tener las siguientes características:

- El acero de presfuerzo será del tipo ATSM-A416-96a Y1860.
- Los cables estarán formados por torones de baja relajación (3.5% máx.) grado 270 K.
- Esfuerzo mínimo de ruptura: 18960 kg/cm².
- Módulo de elasticidad: 20 000.000 Tn/m².
- Esfuerzo máximo en anclajes al tensar: 0.80 fpu.

Las características de los torones diámetro $\varnothing = 0.6$ “ serán las siguientes:

- Diámetro nominal del torón: 15.24 mm.
- Área nominal del torón: 140 mm².
- Carga de ruptura del torón 26.6 Ton.
- Para la inyección de los tendones se utilizará lechada de cemento y se realizará de los cajetines de anclajes.
- Los recubrimientos del acero de presfuerzo serán de 1.5 $\varnothing_v$ al eje del cable, donde $\varnothing_v$ es el diámetro de la funda o vaina.
- Los tubos corrugados de presfuerzo ($\varnothing 110/116$ y $\varnothing 115/131$) deben ser de polipropileno.

5.4.4 Apoyos de Neopreno Zunchado

El material elastomérico estará constituido por caucho completamente sintético (cloropreno, neopreno), cuyas características deberán cumplir las especificaciones siguientes:

- Dureza Shore A (ASTM D 2240) = 60 ± 5 (escala de medición A, medio duro).
- Resistencia tracción a la ruptura (ASTM D 412) > 17.5 Mpa
- Alargamiento a la ruptura (ASTM D 412) > 350%.
- Las placas de acero empleadas en zunchos tendrán un límite elástico mínimo de 240 N/mm² y una carga en rotura mínima de 420 N/mm² (Clase CF-24).
- El módulo de deformación transversal para acciones lentas no será inferior a 0.9 N/mm².
- Acero de los Postes de Catenaria
- Los anclajes de los postes se realizarán con acero tipo ASTM F 1554 grado 55.

RESULTADOS SATISFACTORIOS

6.1 Caso de estudio No. 1

En el primer caso analizaremos los resultados del concreto en el periodo de fabricación de 2018, 2019, 2021 y 2022, en el año de 2020 no hubo fabricación por razones de la pandemia Covid-19.

6.1.1 Análisis de resultados de las pruebas de laboratorio

A continuación, se realizará una revisión de los resultados de las pruebas de laboratorio, con base en la resistencia a compresión de cilindros de concreto (casos de estudio No. 1).

Se realizaron muestreos de la resistencia de cilindros y cubos de concreto durante 4 años, lo que nos permite tener suficiente información. En la Tabla No. 6-1, se muestran los resultados de la resistencia a compresión al largo de 4 años, de especímenes de concreto de las dovelas prefabricadas.

Tabla No. 6.1 Concentrado de pruebas al concreto fresco y endurecido, pruebas de revenimiento, masa unitaria, temperatura y resistencia.

Año		2018	2019	2021	2022
Datos Generales	Nº de muestras	180	246	103	33
	Nº de ensayos	1080	1476	618	198
	m³ Totales	4631	7067.5	2929	1048
Masa Unitaria Kg/m³	Valor mayor:	2418	2420	2442	2432
	Valor menor:	2325	2241	2384	2401
	Promedio:	2359	2384	2407	2412
	Desvest:	18.1	24.2	11.9	7.7
Revenimiento cm	Valor mayor:	25	25	25	24
	Valor menor:	19	21	21	21
	Promedio:	23.0	23	23.0	23.2
	Desvest:	1.0	0.7	0.9	0.7
Resistencia a Desmolde a horas (kg/cm²)	Valor mayor:	551	520	526	543
	Valor menor:	270	215	321	365
	Promedio:	415.1	418	430.6	455.4
	Desvest:	46.7	41.2	44.3	42.6
Resistencia a 7 Días (kg/cm²)	Valor mayor:	594	651	676	673
	Valor menor:	418	422	445	476
	Promedio:	506.4	541	540.5	567.9
	Desvest:	34.8	39.8	37.4	42.4
Resistencia a 28 Días (kg/cm²)	Valor mayor:	662	763	747	718
	Valor menor:	504	521	556	582
	Promedio:	571.6	647	647.7	644.0
	Desvest:	41.0	50.9	44.7	37.4

Este concentrado permitirá analizar los resultados de forma gráfica y práctica.

Referencia 16.- El Autor

Capítulo VI

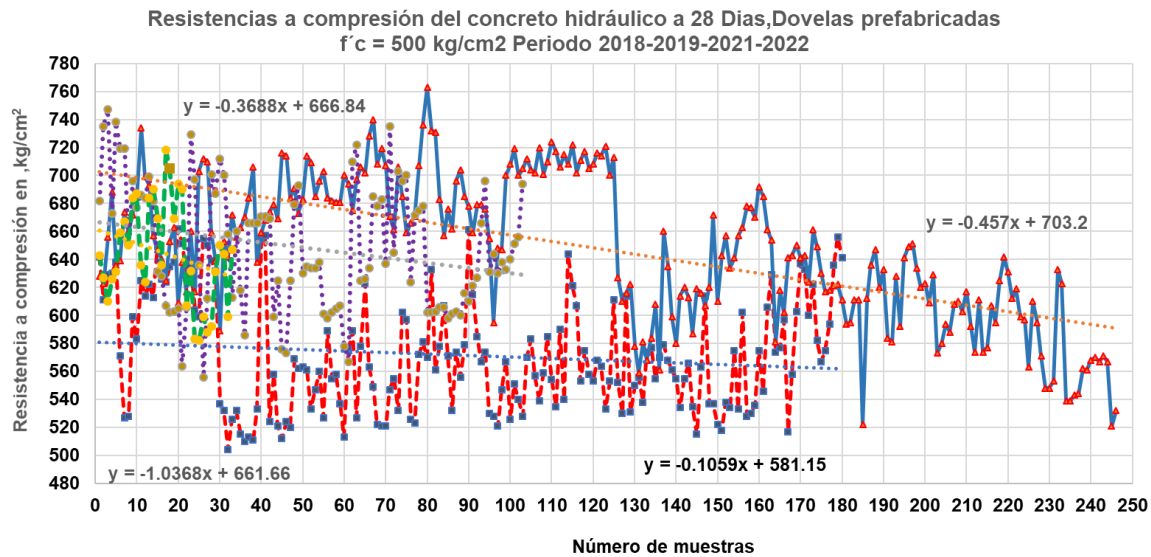


Figura No. 6.1 Gráfico de la resistencia a compresión a 28 días del concreto de Dovelas Prefabricadas (f 'c = 500 kg/cm²), durante el periodo de 2018, 2019, 2021 y 2022.

Referencia 16 .- El Autor

En la gráfica las resistencias del año 2018 (línea roja), se tenía un alto contenido de cemento y las resistencias no fueron altas, en 2019 (línea azul) se ajustó el cemento a 620 kg/m³ y las resistencias incrementan, 2021 (línea morada) se disminuyó el cemento hasta 550 kg/m³ y 2022 (línea verde) se optimizo hasta 530 kg/m³, en el año 2020 no hubo fabricación por la pandemia del Covid-19.

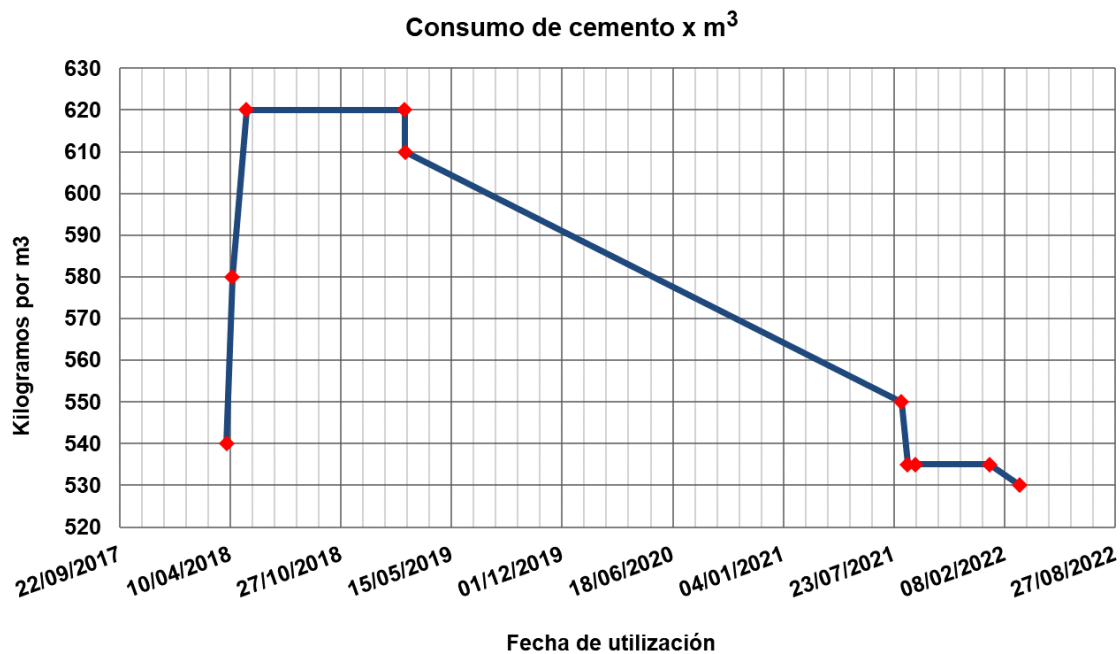


Figura No. 6.2 Consumo de cemento por m³, en la fabricación de Dovelas, periodo 2018, 2019, 2021 y 2022. Ref.16.- El Autor.

Capítulo VI

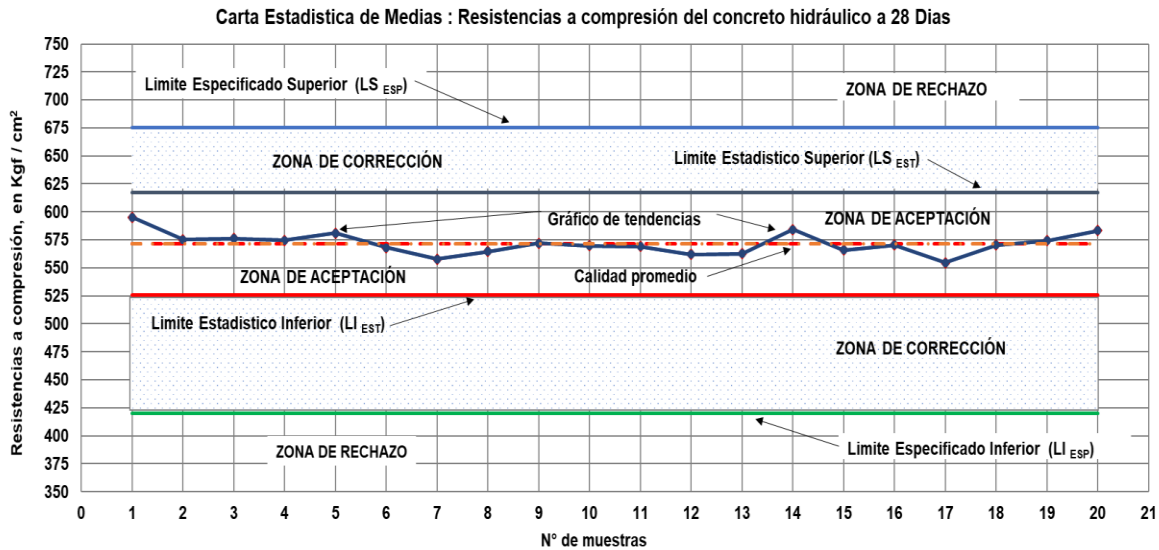


Figura No. 6.3 Carta estadística de medias, que se concentra en el promedio de las resistencias a compresión, y en la desviación estándar.

Ref.19.- M-CAL-1-03/03 - SCT - Análisis Estadísticos de Control de Calidad.

Como se observa en la figura 6.3, el proceso está controlado para las resistencias a compresión, marcando un promedio de medias de 575 kg/cm², cumpliendo con los límites estadísticos y especificados, conforme a la norma: M-CAL-1-03/03 Análisis Estadístico Control de Calidad.

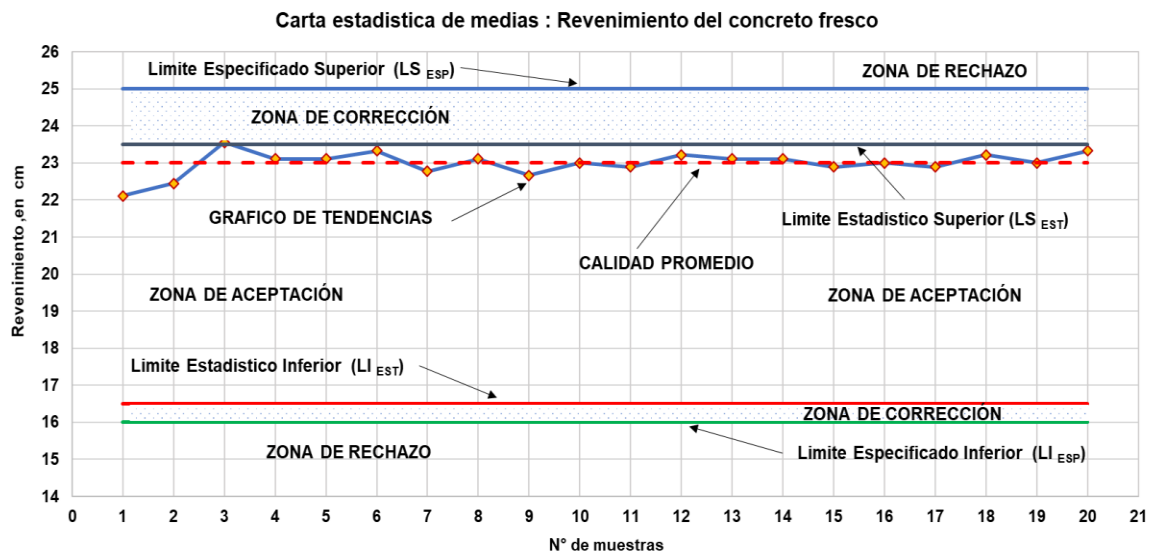


Figura No. 6.4. Carta estadística de medias de revenimiento del concreto fresco.

La gráfica muestra que los revenimientos promedios obtenidos tienen un rango de 22 cm y hasta 23.5 cm, cumplen con los límites especificados, en general en el prefabricado requieren que el concreto este más fluido para un mejor acomodo dentro del encofrado (molde). Los revenimientos, cumplen los criterios establecidos por la norma: M-CAL-1-03/03 Análisis Estadístico Control de Calidad.

Capítulo VI

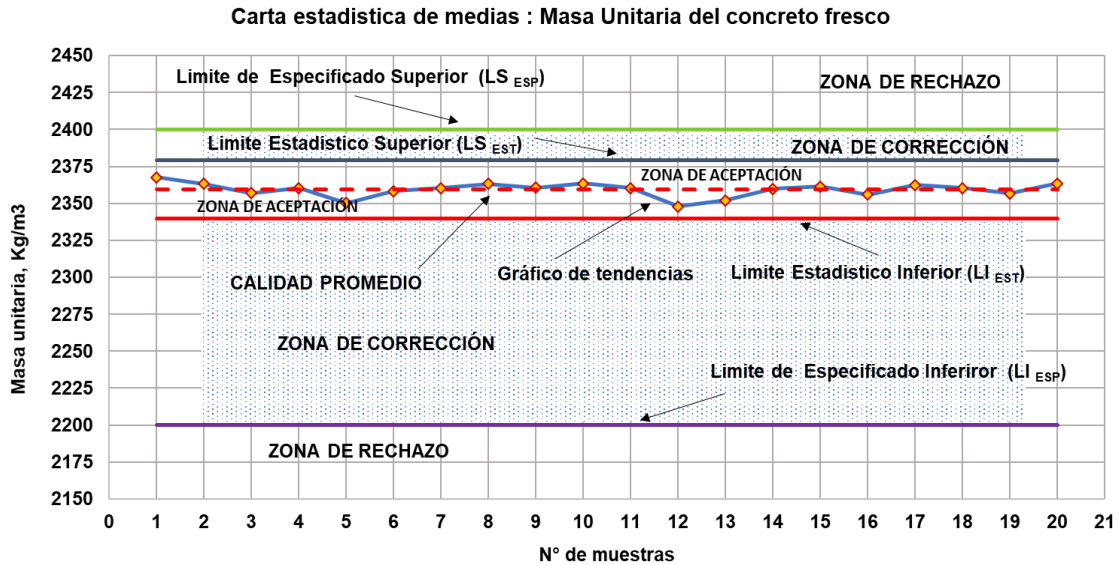


Figura No. 6.5 Carta estadística de medias para prueba de masa unitaria en el concreto fresco.

En la gráfica figura No. 6.5, puede observarse como cumple con los límites estadísticos y especificados para la masa unitaria del concreto fresco, es de hacer notar que el límite inferior es muy amplio debido a que los materiales que se constituyen la mezcla tienen una densidad específica importante, por esta razón está muy encima del 2,200 kg/m³.

Ref. 19.- M-CAL-1-03/03 - SCT - Análisis Estadísticos de Control de Calidad.

La zona de corrección nos sirve para identificar un incumplimiento potencial, ya que, si bien está cumpliendo dentro de los límites especificados, debemos realizar acciones preventivas para sanar la deficiencia a tiempo y hacer que posteriormente los resultados estén en la zona de aceptación.

Seguidamente de este ejemplo el caso de resultados satisfactorios ya que se tiene datos del control de calidad muy aceptables, y no hubo rechazo de estas piezas de concreto fabricadas bajo estándares del concreto de alto desempeño.

Este caso al ser de éxito deja en claro que instalar los controles necesarios para su atención a tiempo, da como resultado un elemento listo para montarse, sin necesitar ninguna otra consideración.

PRODUCTO NO CONFORME

7.1 Caso de estudio No 2

En este segundo caso se tiene el problema de las resistencias de elementos prefabricados, que no cumplen con la resistencia especificada de proyecto, que fueron rechazados por este motivo y en consecuencia también por la fisuración excesiva por retracción plástica y los cambios bruscos de temperatura, adicionalmente se mencionará como resolver temas de reparación como segregación, fisuración, apanelamiento, etc.

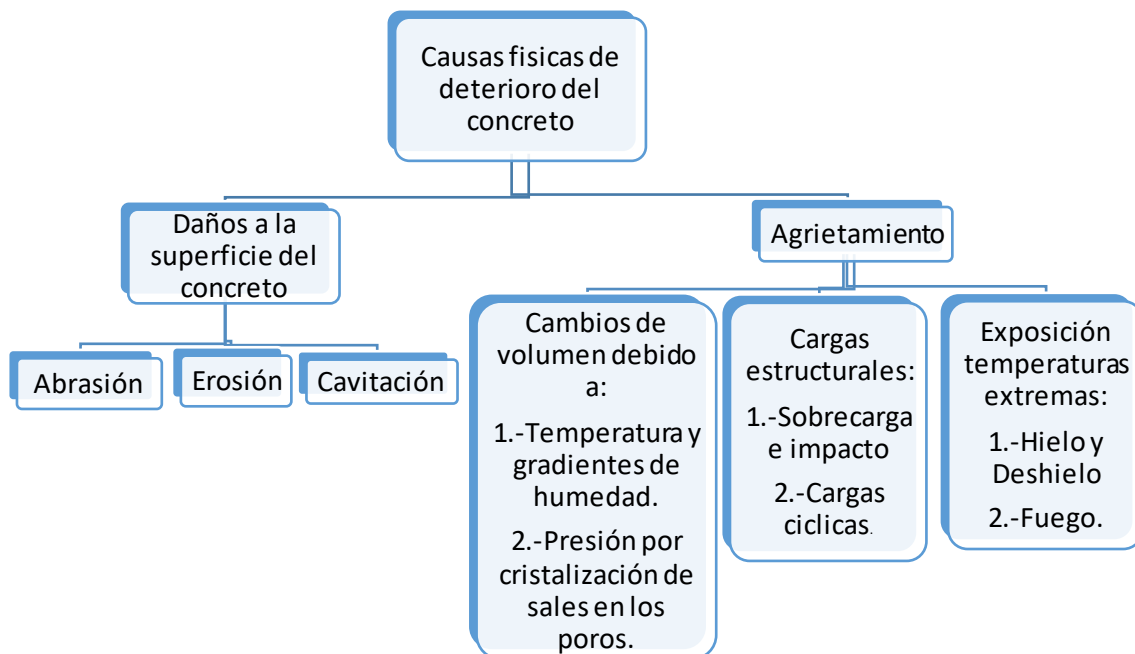
7.1.1 Deterioro del concreto

Las causas físicas por las cuales el concreto sufre el deterioro se divide en dos categorías principales:

- 1.-Por pérdida de masa por abrasión, erosión, y cavitación;
- 2.-Por agrietamiento por cambios de temperatura y gradientes de humedad, presiones por cristalización de sales en los poros, carga estructural y exposición a temperaturas extremas como el hielo y el fuego.

Referencia 46.-Tecnología del concreto de alto desempeño –Pablo Portugal Barriga-2007

Figura No. 7.1 Causas físicas de deterioro del concreto.



Referencia 46.- Tecnología del concreto de alto desempeño – Pablo Portugal Barriga-2007

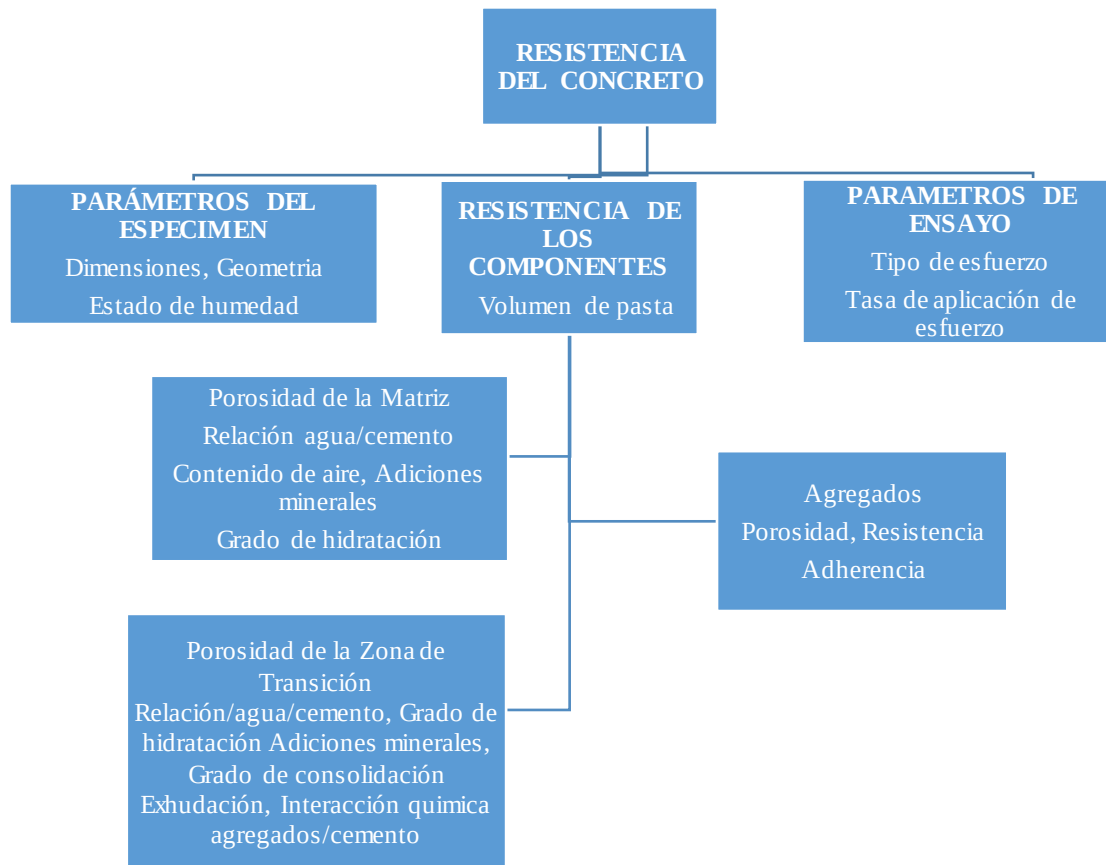


Figura No. 7.2 Diagrama de factores que influyen en la resistencia del concreto.

De manera general mencionaremos que la evaluación y/o diagnóstico de las estructuras de concreto es prácticamente una ciencia de aplicación, ya que los problemas patológicos en estructuras de concreto son cada vez más estudiados, algunas de las acciones perjudiciales sobre las estructuras de concreto son: Corrosión de la armadura, acción de los cambios de humedad y temperatura, acciones que general desintegran el concreto, acción de las cargas exteriores y procesos mecánicos, acciones inducidas, fallas típicas del proceso constructivo y la acción sísmica.

7.2 Descripción del problema

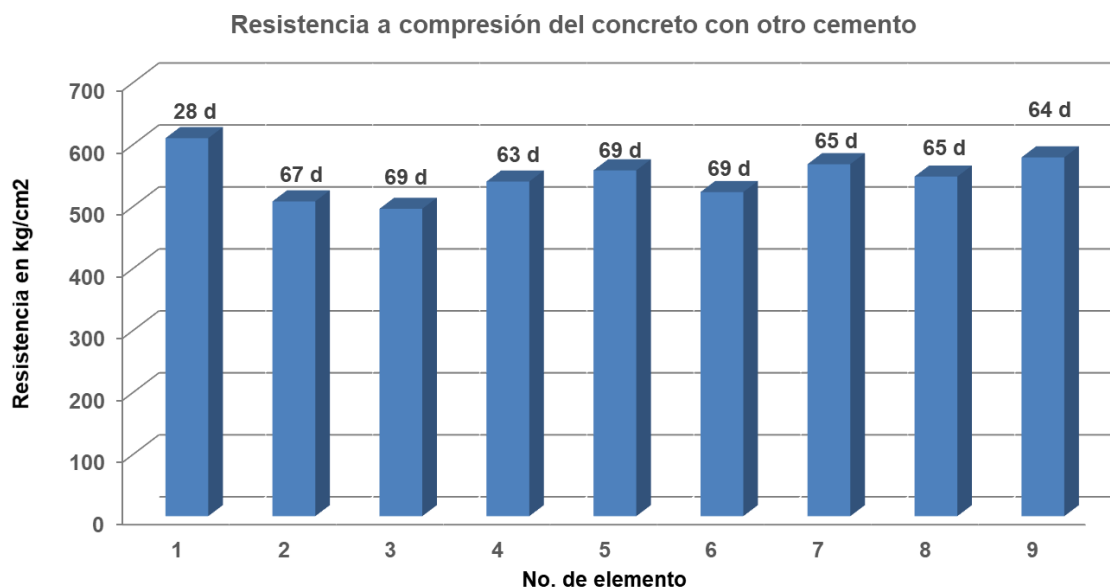
Se requería cambiar parte de la materia prima de la mezcla de concreto $f'c = 600 \text{ kg/cm}^2$, específicamente el cemento, necesario cambiar por economía, con el cambio en la procedencia del cemento a granel, necesariamente significa un cambio en la mezcla de concreto, antes de fabricar los elementos se obtuvieron pruebas de laboratorio satisfactorias y posteriormente con la prueba industrial los resultados del concreto también fueron satisfactorios.

Capítulo VII

En la fabricación del mes de agosto de 2017 se tuvieron resistencias bajas de 8 elementos mayores trabes y capiteles, en el concreto de resistencia $f'c = 600 \text{ kg/cm}^2$. Los resultados obtenidos se anexan en la siguiente tabla:

Tabla No. 7.1 Resultados a compresión del concreto endurecido que incumplen con la especificación de proyecto. Ref. 16.-. El Autor.

No.	Elemento	Fecha de colado	Edad de ensaye (Días)	Resistencia Promedio (kg/cm^2)	% de $f'c$ 600 kg/cm^2
1	Trabe 1	05/08/2017	28	610	101
2	Trabe 2	11/08/2017	67	508	85
3	Trabe 3	12/08/2017	69	496	83
4	Trabe 4	17/08/2017	63	540	90
5	Capitel 1	09/08/2017	69	558	93
6	Capitel 2	12/08/2017	69	523	87
7	Capitel 3	16/08/2017	65	568	95
8	Capitel 4	16/08/2017	65	548	91
9	Capitel 5	17/08/2017	64	579	96



d - días, Referencia 43.- Orden de Trabajo 461.Evaluación Técnica de Capiteles Prefabricados.

Figura No. 7.3 Gráfico de los resultados a compresión del concreto $f'c = 600 \text{ kg/cm}^2$, a edades mayores de 60 días en promedio.

Al ver que el concreto a sus edades nominales de 28 días no cumplió, se decidió dar tiempo para que aumentará su resistencia considerando que el tipo de cemento CPC 40 RS podría tener un desarrollo a mayor edad por sus componentes (Figura No. 7.1).

Capítulo VII

Se dio un tiempo de 60 días en promedio, y se realizaron nuevos ensayos a compresión, con resultados igualmente bajos, los 8 elementos en estudio registraron resistencia menor al f'_c especificado, cinco de ellos superaron el 90 % de la resistencia especificada, uno no logro superar el 85% y el otro solo llegó al 83%, solo uno fue obtuvo el 102% a 28 días, por esta razón fue separado de los que no cumplieron.

7.3 Causas de resistencias a compresión de concreto por debajo de la especificada

En la investigación de la causa raíz del problema de las resistencias a compresión por debajo de lo especificado, se obtuvo información de que el cemento que fue comprado tipo CPC 40 RS posteriormente, es decir para la fabricación, se surtió de una planta diferente a la del cemento de la primera compra. En el estudio de las razones por las que se obtuvieron estos resultados se solicitó un dictamen de parte de un tercero que sea experto en temas de patología de concreto y se obtuvo lo siguiente de la inspección en sitio:

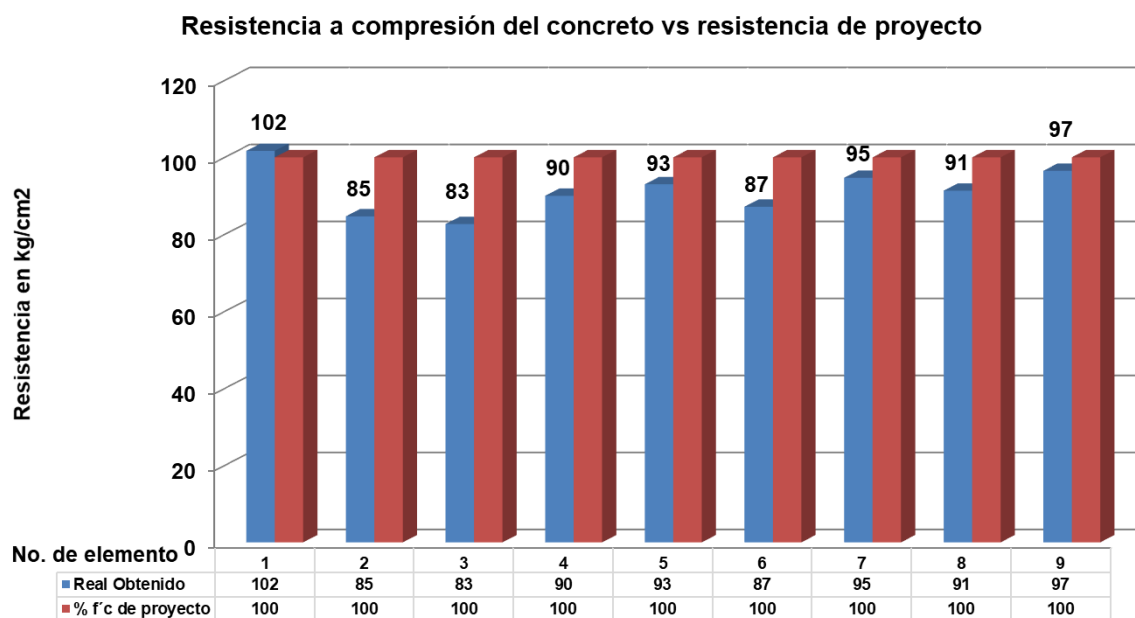


Figura No. 7.4 Grafico de los resultados a compresión del concreto vs resistencia de proyecto en, porcentaje %. Ref. 16.- El Autor.

En la figura 7.4, se puede observar perfectamente como 8 elementos incumplen con la resistencia de proyecto especificada de 600 kg/cm², las figuras de color café son el 100% de la resistencia a compresión especificada, y las de color azul son las resistencias reales obtenidas en porcentaje de la resistencia de proyecto.

Capítulo VII

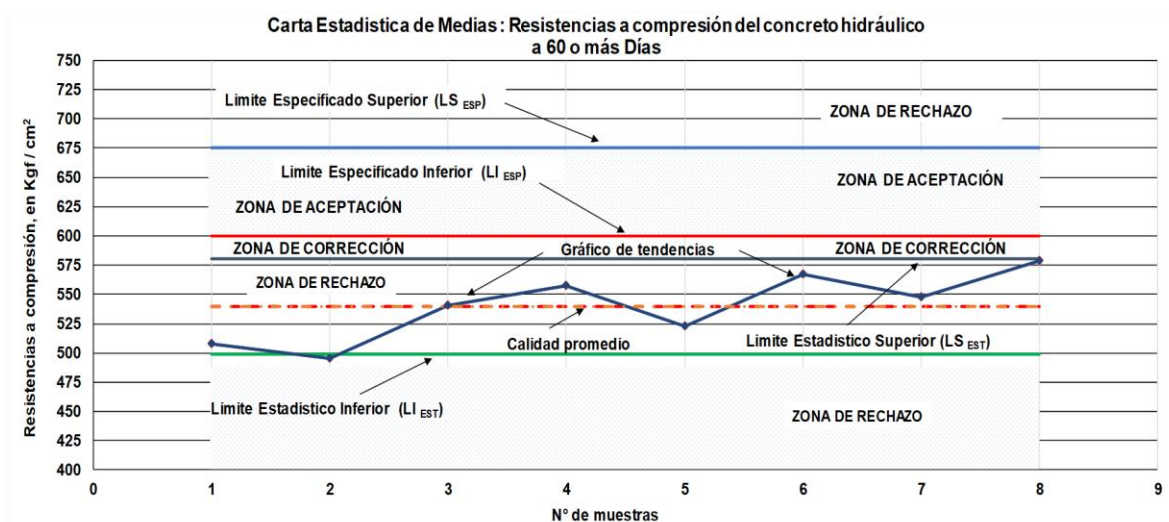


Figura No. 7.5 Carta estadística de medias de los resultados a compresión del concreto de los 8 elementos que incumplen la resistencia de proyecto.

Ref.19.- M-CAL-1-03/03 - SCT - Análisis Estadísticos de Control de Calidad.

En la carta de calidad se observa que todas las resistencias están por debajo de la línea especificada de proyecto (línea roja), y por debajo de la línea estadística superior (línea azul), aun con esto todas las resistencias a compresión están en zona de rechazo, se considera que el proceso está fuera del control, por causas asignables al proceso mismo que son ajenas y se desconocen sus variaciones (cambio de fuente de suministro cemento), para este caso deben eliminarse.

Las resistencias a compresión del concreto hidráulico incumplen los criterios establecidos por la norma: M-CAL-1-03/03 Análisis Estadístico Control de Calidad.

En el análisis de causa raíz se encontró que a partir del cambio de fuente de origen del cemento se empezó a notar un incumplimiento en la resistencia al desmoldar, 7 días y a los 28 días, etc., y un escaso o nulo control del almacén en las entradas de materiales a la planta de concreto, del análisis se concluyó en que se solicitaría la intervención de una institución certificada para realizar la extracción de núcleos y la prueba de ultrasonido sobre los elementos en estudio.

7.4 Extracción de núcleos de concreto endurecido

7.4.1 Criterio de Evaluación

Criterios de evaluación (concreto clase 1, $f'c \geq 600 \text{ kg/cm}^2$):

Referencia 30.- Norma NMX-C-155-ONNCCE-2014 Dosificado en masa - Especificaciones

Criterio No.1.- $f'c \text{ (laboratorio)} \geq 0.75f'c \text{ (proyecto)} = 450 \text{ kg/cm}^2$

Criterio No.2.- $\bar{x} = \sum_{i=1}^3 \frac{x_i}{n} \geq 0.85 f'c \text{ (proyecto)} = 510 \text{ kg/cm}^2$

Capítulo VII

Tabla No. 7.2 Resultados de la extracción de núcleos del concreto 600 kg/cm².

Fecha de Colado	Elemento colado	Ensaye extracción de Núcleos				f'c (kg/cm ²) supuesto	Criterio de Evaluación 1	Criterio de Evaluación 2
		N1 kg/cm ²	N2 kg/cm ²	N3 kg/cm ²	f'c (kg/cm ²) Laboratorio			
11-ago-17	TRABE 2	546	569	568	561	600	ok	ok
12-ago-17	TRABE 3	563	558	542	554	600	ok	ok
17-ago-17	TRABE 4	544	557	545	549	600	ok	ok
09-ago-17	CAPITEL 1	537	482	516	512	600	ok	ok
12-ago-17	CAPITEL 2	517	589	572	559	600	ok	ok
16-ago-17	CAPITEL 3	485	489	461	478	600	No cumple	ok
16-ago-17	CAPITEL 4	585	542	558	562	600	ok	ok
17-ago-17	CAPITEL 5	560	575	590	575	600	ok	ok

Ref. 43.- Orden de Trabajo 461. Evaluación Técnica de Capiteles Prefabricados.

En la tabla se observa que todos los elementos cumplen ambos criterios a excepción del Capitel No.3, esto quiere decir que en la evaluación se tienen resultados aceptables para siete elementos.

De la inspección en sitio por parte del DRO y con base en los resultados de la tabla No.7.2 de la institución de tercera parte, las trabes fueron liberadas ya que no presentaban fisuración, quedando pendientes los cinco capiteles por presentar una patología particular.

Los daños en los capiteles en craquelado, irregulares y sinuosos, con aberturas de 0.20 mm y 0.30 mm en promedio, algunas otras son más grandes, estas aberturas van hasta la profundidad del acero de refuerzo que es del orden de 10 cm. Este tipo de patología se asocia a contracciones térmicas, debido a la falta de control de la temperatura del concreto en masa al momento del colado (dimensiones de 6.90 m de ancho x 2.40 m de alto), también se detectó que el recubrimiento libre del acero de refuerzo tenía un calibre elevado que no era el indicado en el proyecto.

Adicionalmente en los núcleos extraídos se detectó concreto pastoso, con tendencia segura a la segregación, y por la falta de agregado grueso consecuencia del proceso de colado, en el entendido que los volúmenes de pasta y de contracciones térmicas son directamente proporcionales entre sí.

Debido a la falta de agregado grueso no hubo ayuda para la estabilización del material durante el desarrollo de contracciones térmicas y principalmente al cuidado de la temperatura durante el colado.

A continuación, se presenta una figura geométrica del capitel con vista frontal y lateral.

Capítulo VII

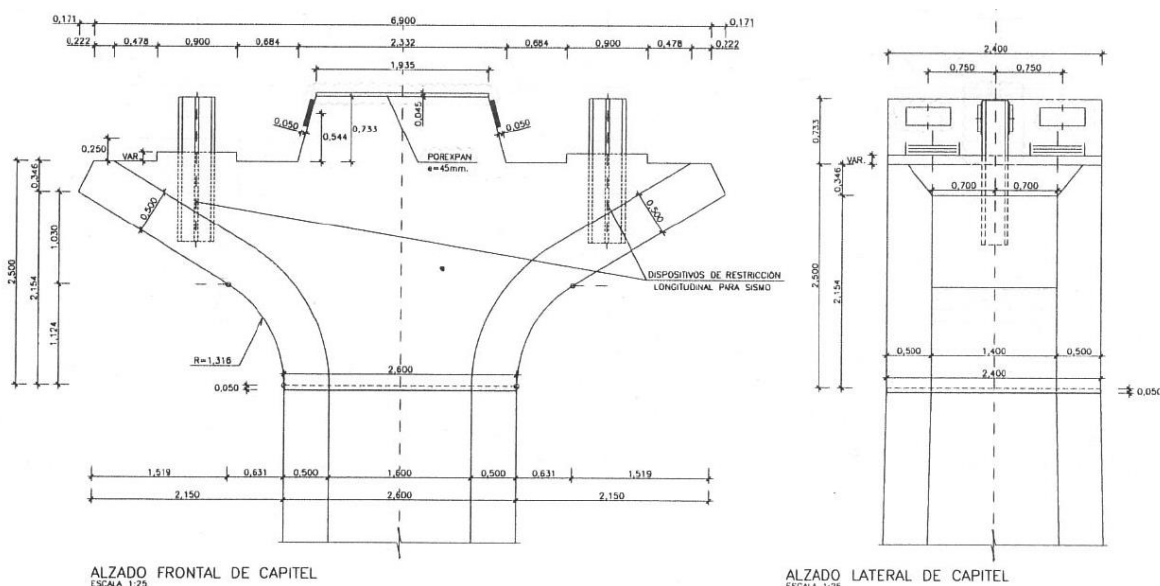


Figura No. 7.6 Alzado Frontal y Lateral del Capitel.

Ref. 17.- Índice y Notas Generales - Tren México Toluca.

De la figura se puede observar que tiene dimensiones para un concreto masivo, y con la alta densidad del acero de refuerzo fueron juntos con los problemas del colado, los causantes de la fisuración excesiva.

7.5 Medición Ultrasónica Directa

Dado que no se tiene muestreo para la evaluación del módulo elástico, a fin de evaluar de manera aproximada la densificación del concreto muestreado con pruebas ultrasónicas de tipo directa, a través de las cuales se estima el módulo de elasticidad dinámico, por medio del cual se puede estimar el (módulo de elasticidad) estático; en el entendido de que usa la teoría de ondas que establece una formulación que correlaciona el módulo de elasticidad dinámico, con el producto de la densidad del material por el cuadrado de la velocidad de la onda ultrasónica (considerándose además el módulo de Poisson). De los resultados de las mediciones ultrasónicas directas obtenidas con las mediciones en laboratorio en cada una de las muestras de concreto endurecido (ver tabla No.7.3), resulta el diagrama que se gráfica en la figura No.7.7, considerando que el eje vertical se presenta la magnitud asociada a la velocidad de pulso, obtenida como el cociente entre el espacio definido entre el emisor y el receptor (en cada medición), y el tiempo de tránsito que tarda la onda ultrasónica en recorrer el espacio de referencia. Ref. 43.- Evaluación técnica de Capiteles Prefabricados IMCYC.

Se obtuvieron los siguientes resultados de la inspección ultrasónica:

Capítulo VII

Tabla No. 7.3 Niveles de Velocidad de Pulso ultrasónico (Vu) directa.

Elemento	Muestra	Lectura No.	Tiempo (µseg)	Distancia (m)	V (m/seg)
Capitel 1	M-1	U-1	20.7	0.082	3,961
	M-2	U-2	20.6	0.082	3,981
	M-3	U-3	21.1	0.081	3,839
Capitel 2	M-5	U-4	19.3	0.082	4,249
	M66	U-5	25.1	0.082	3,267
Capitel 3	M-9	U-6	19.6	0.064	3,265
	M-9A	U-7	23.8	0.082	3,445
	M-12	U-8	20.1	0.082	4,080
Capitel 4	M-14	U-9	18.3	0.073	3,989
	M-15	U-10	20.1	0.082	4,080
Capitel 5	M-15A	U-11	20.8	0.083	3,990
	M-16	U-12	19.7	0.078	3,959

Ref.43.- Orden de Trabajo 461.Evaluación Técnica de Capiteles Prefabricados.

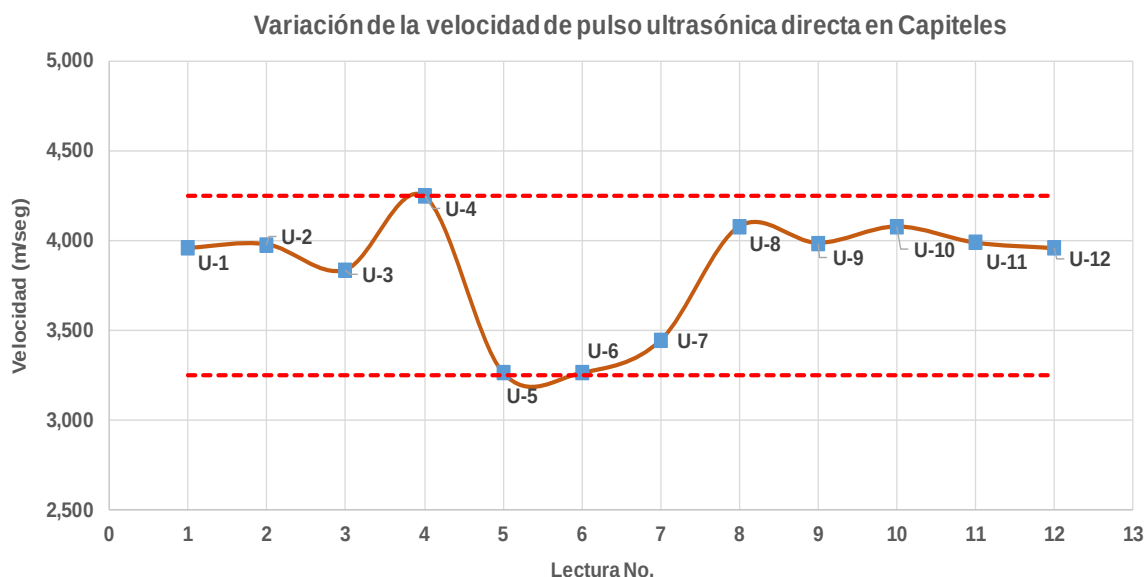


Figura No.7.7 Variación de la velocidad de pulso ultrasónica directa.

Referencia 48.- Velocidad de Pulsos de Ultrasonido, Capítulo III: Una prueba No Destructiva del Concreto

Los datos de la tabla No. 7.3 sirven como base para obtener la figura No. 7.7, la zona comprendida entre las dos líneas discontinuas en color rojo, que se tomarán como límites inferior y superior son ilustrativas de la calidad del concreto, la línea café son los resultados del concreto que se muestrea.

Capítulo VII

De acuerdo a lo anterior se trata de un concreto con resistencia a la compresión de 600 kg/cm², tiene un coeficiente adimensional “k” del orden de entre 2,500 y 7,000 (módulos de elasticidad de entre 171,000 y 281,000 kg/cm²), considerando que las magnitudes fueron obtenidas de la investigación de Leslie y Cheeseman. Referencia 43.- Orden de Trabajo 461. Evaluación Técnica de Capiteles Prefabricados.

La calificación del resultado ultrasónico que resulta de revisar los niveles obtenidos y compararse con los límites establecidos para calidad del concreto se tienen 3 puntos en cuestionables (de 3,050 a 3,660 m/s), y 9 puntos en buena calidad aceptable (de 3,660 a 4,575 m/s).

En base a lo anterior se tiene que el concreto tiene una calidad oscilante entre cuestionable y buena; lo cual de alguna manera corresponde con los resultados respecto a las magnitudes obtenidas de la masa volumétrica que fueron también bajas entre 1,995 kg/m³ y 2,237 kg/m³, lo cual indicaría que se tiene un concreto clase 2 y también un concreto clase 1.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, en nuestro caso más que evaluar la velocidad de la onda ultrasónica con respecto a los niveles característicos que se tienen para el concreto, el proceso de evaluación que prevalecerá será el correspondiente a la estimación del módulo elástico estático a partir de la correlación con el módulo dinámico. Como antes se comentó, de la teoría de ondas, se conoce que la relación entre el módulo de elasticidad dinámico (E_d) y la velocidad de propagación en un medio isotrópico y elástico, está dada por:

$$E_d = \rho v^2 \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)}$$

Donde:

ρ es la densidad del concreto

v corresponde a la velocidad de la onda longitudinal

μ es el coeficiente de Poisson dinámico

El módulo de elasticidad dinámico estimado se encuentra entre 260,000 y 320,000 kg/cm², en el entendido de que estas magnitudes se estiman considerando la masa volumétrica obtenida en laboratorio en cada una de las muestras, así como un coeficiente de Poisson correspondiente a un concreto de calidad entre buena y “cuestionable o dudosa” (0.28). Asimismo, en base a las funciones establecidas por J. M. Tobio (1967), en el que se relaciona el módulo de elasticidad dinámico (E_d) y el módulo de elasticidad estático (E_e) con la velocidad de propagación, es posible establecer una correlación para estimar el módulo de elasticidad estático del concreto en cada una de las muestras de concreto endurecido a partir del módulo elástico dinámico; en este caso estas magnitudes oscilan entre 165,000 kg/cm² y 220,00 kg/cm². Ref. 47.- ULTRASONIDO: “Aplicación para la determinación del módulo de elasticidad dinámico” Revista Construcción y Tecnología en Concreto, Vidaud, E y Vidaud, I. (2015).

Capítulo VII

Es de hacer notar que las magnitudes obtenidas por medio de la estimación del módulo de elasticidad en las muestras estudiadas son bajas correspondientes con las masas volumétricas y con las observaciones físicas del concreto pastoso faltante de grava.

Por ello es importante resaltar que el módulo de elasticidad del concreto es directamente proporcional a la cantidad y tipo de grava en una mezcla de concreto. Es decir, debe haber una correspondencia entre la resistencia a compresión f'_c , el módulo elástico estático y la masa volumétrica del concreto.

La conclusión de los trabajos de ultrasonido y núcleos que se obtuvo, dio como resultado que el concreto de los capitales debía repararse, y que en resistencia compresión solo uno de los muestreos dio 560 kg/cm^2 , la recomendación es la siguiente:

- 1.- Considerar la evaluación de un calculista responsable de la evaluación estructural, donde los valores a emplearse sean: $E=200,000 \text{ kg/cm}^2$ y $f'_c= 600 \text{ kg/cm}^2$, siendo importante la evaluación de desplazamientos laterales.
- 2.-Reparación de los elementos con un procedimiento de intervención por medio de una empresa especializada y calificada que, en conjunto con el proveedor de los productos de reparación también calificado, proporcione las garantías que correspondan.
- 3.- Proceder con inyección de resina epóxica de calidad certificada, en este caso se tendrían que inyectar las aberturas mayores a 0.25 mm . Así mismo después de la inyección de las grietas se deberá aplicar un material de protección superficial que ayude a evitar cualquier acción del medio ambiente en el concreto y acero de refuerzo, se recomienda un recubrimiento elastomérico, anticarbonatación y capaz de puentear fisuras.
- 4.-Con este procedimiento se podrá mejorar la durabilidad de estas piezas con un alto nivel de daño.
- 5.-Se sugiere un seguimiento en el tiempo a fin de corroborar que las grietas realmente sellaron y que no aumentan más grietas en el elemento reparado.
- 6.-En caso de observarse un comportamiento degenerativo del elemento reparado, es decir sigan apareciendo grietas que no estaban y/o las grietas reparadas se abran, se deberá rechazar poner en operación dicho(s) elemento(s), bajo reserva de la indicación del DRO.

Una vez realizada la reparación y la inspección del DRO se dictaminó que los cinco capiteles estaban rechazados y se tenían que volver a fabricar, por presentarse fisuras en zonas no detectadas o sanas anteriormente, así mismo por seguirse presentando aberturas en zonas reparadas con la resina mediante la inyección epóxica, los capiteles fueron marcados como NO CONFORME-RECHAZADO.

7.6 Reparación de elementos estructurales

El objetivo de esta sección es establecer el procedimiento de reparación de elementos estructurales de concreto, para proteger el acero expuesto contra la corrosión, mediante la aplicación de inhibidores de corrosión, y colocación de concreto nuevo o mezcla de grout.

El alcance aplica a la reparación de golpes, fisuras o desprendimientos de concreto y protección de acero expuesto en elementos de concreto presforzado y reforzado, sufrido durante el proceso constructivo.



Figura No. 7.8. Desprendimiento de concreto. Referencia 13.-El Autor.

El procedimiento de reparación general sería el siguiente:

1. Retirar todo el concreto suelto y/o mal adherido hasta encontrar concreto sano, con la finalidad de delimitar el área por proteger.
2. Perfilar de forma rectangular la zona anómala utilizando herramienta menor.
3. Las superficies de concreto y acero deben estar libres de suciedad, aceite, grasa y cualquier otro contaminante.
4. La junta de colado debe tratarse de ser necesario con algún equipo que garantice que las superficies del concreto estén ásperas o rugosas de ± 10 mm.
5. Tener listo los datos del concreto respetando la relación agua/cemento y con la resistencia a compresión ($f'c$) que corresponde al concreto anterior.
6. En el caso de ocupar Grout respetar las indicaciones del proveedor y las del laboratorio previo a su empleo.

Capítulo VII

7. Tener preparada la cimbra, previa a la aplicación de los productos de reparación.
8. La superficie del concreto deberá permanecer húmeda con agua limpia por 24 horas antes de iniciar la reparación.
9. Se procede a la reparación, utilizando primeramente el anticorrosivo y puente de adherencia (Sika Top-Armatec y 110 ExpoCem) aplicando una capa de 1mm, tanto al concreto como al refuerzo.
10. Antes de 8 hrs, después de la aplicación del anticorrosivo aplicar el mortero epóxico (Sikadur 42) por el lado de vaciado de la cimbra colocando en forma continua y rápida, asegurándose de preparar la cantidad suficiente para cada detalle hasta que escurra por las salidas o ductos preparados en la cimbra, garantizado así la eliminación del aire atrapado y el llenado completo de todos los espacios.
11. En casos especiales donde el aporte de material para la reparación es grande se considerará la posibilidad de utilizar concreto de $f'c$ 600 kg/ cm², donde de ser requerido se tendrá que vibrar y curar para evitar fisuras.
12. Retirar la cimbra después que la mezcla alcance al menos el 80% de su resistencia ($f'c$).
13. Aplicar en el perímetro de reparación y contornos (franja de 50 cm), un aditivo inhibidor de corrosión SIKA FERROGARD-903 para lo cual la superficie deberá estar seca, libre de polvo, mugre, aceite, grasa y demás contaminantes que interfieran en la aplicación del producto.
14. En caso de no encontrar la marca señalada se puede emplear anticorrosivos y puentes de adherencia de otra marca, previo a las pruebas de laboratorio que validen sus resultados, esto debe hacerse antes de reparar cualquier elemento estructural dañado.

Análisis de Resultados

8.1 Caso de estudio No.1 Resultados Satisfactorios

- Una vez que se tuvo la información suficiente se concluye que el caso No.1 fue satisfactorio, por las siguientes razones: No requirió estudios especiales o visitas del DRO para justificar su cumplimiento y cobro, por reunir las pruebas y elementos necesarios, antes, durante y después de su fabricación, y por tener un buen control de calidad en las distintas etapas.
- La competencia técnica y profesional del personal involucrado impactan en el resultado obtenido.
- Aplicar el conocimiento previo de control de calidad más la normas que se requieren nos dan información que resulta determinante al analizar un resultado.
- El respaldo de entidades acreditadas y/o certificadas, nos dan evidencia objetiva y verdadera de los procesos.

8.2 Caso de estudio No.2 Producto No Conforme

- En cuanto al caso 2 no fue satisfactorio al 100%, se rescataron 3 trabes presforzadas con la extracción de los núcleos y la inspección del DRO corresponde al 37.5%, sin embargo, por la patología de las grietas que presentaban los capiteles no fue posible rescatarlos, corresponde al 62.5% rechazado o No conforme.
- El análisis de la patología en los capiteles, resultó en que se presentaron grietas por las contracciones térmicas y por el cambio de cemento, sus resistencias fueron bajas, no hubo atención a tiempo, hasta que se presentaron los problemas serios en capiteles debido a excesivas y numerosas grietas, se procedió a realizar estudios más específicos a las afectaciones sufridas en el concreto, no se consideró un tratamiento de un concreto en masa, necesario desde el principio.
- El control de la temperatura del concreto en masa, debió ser obligado que antes de iniciar la fabricación del concreto, no se tenía claro el proceso de enfriamiento en los agregados y el agua de mezcla (hielo o frape).
- El alto revenimiento de más de 24 cm y la falta de balance en la relación grava/arena, junto con el alto contenido de cemento provocaron la segregación del concreto, al revisar la geometría del molde en el capitel tenía solamente que llenarse y lo realizaron sin interrupción, esto junto con las malas prácticas de construcción favorecieron a pedir una mezcla más fluida.

Conclusiones y Recomendaciones

- 1.-La elaboración del concreto en la planta premezcladora, debe realizarse con personal calificado y con suficiente experiencia para realizar las pruebas al concreto.
- 2.-Colocación del concreto en obra (personal competente y equipo en buen estado), es necesario que en el sitio se esté debidamente preparado con todo lo necesario, para recibir cada unidad de concreto.
- 3.-El curado del elemento, la resistencia y durabilidad del concreto de alta resistencia, se desarrolla completamente, si es apropiadamente curado por un periodo adecuado previo a su puesta en servicio.
- 4.-Descimbrado del elemento, se debe esperar el tiempo suficiente para evitar excesivos agrietamientos o fisuraciones por cambio de temperatura, e inclusive falta de cuidado al sacarlo del molde.
- 5.- El control de calidad no debe verse como un gasto, es una inversión a largo plazo, es una parte del aseguramiento de calidad, del sistema de gestión integral, ambos dependen y son responsabilidad de todas las áreas de la organización.
- 6.- Para evitar retrasos en la ejecución, debe realizarse a tiempo los estudios previos de los materiales a emplearse, junto con las pruebas especiales.
- 7.- En elementos de concreto en masa (masivos), debe cuidarse el cambio de cemento, se recomienda el tipo BCH (Bajo Calor de Hidratación), y con adiciones minerales al cemento, más fibras de acero o fibras de polipropileno para asegurarse de su durabilidad, incluidos las adiciones cementantes como humo de sílice.
- 8.-Se requiere tener un programa de atención de suministros y de ejecución al momento de fabricar concreto masivo, por ejemplo las adiciones de hielo, mantener el agua fría, enterrar tanques de agua, protección de tuberías y enfriamiento de agregados, este debe ser realizado y supervisado.
- 9.-El revenimiento de la mezcla del concreto en masa, deberá ser menor a 200 mm o 20 cm, para evitar la segregación, así mismo compensar bien la relación grava/arena en el nuevo diseño de mezcla.
- 10.-Los elementos de concreto en masa deben ser programados para que el tiempo de la colocación, curado y retirado de la cimbra sea mayor, así como evitar malas practicas de construcción.

Referencias

No.	Título/ Tema
1	AASHTO LRFD (2010). Bridge Design Specifications (5th Edition)
2	AASHTO LRFD (año). Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design.
3	ACI 211.4R-93 Guía para seleccionar las proporciones para concreto de alta resistencia con cemento portland y ceniza volante.
4	ACI 363.2R-98.Guía para el control de calidad y ensayos de concreto de alta resistencia.
5	ACI 224.1R-93.Causas,Evaluación y Reparación de Fisuras en Estructuras de Hormigón.
6	ACI 301-05.Especificaciones para el concreto estructural.
7	ACI 318S-14 y Comentario ACI 318SR-14.Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural y Comentario al reglamento.
8	ACI 517-70. Recommended Practice for Atmospheric Pressure Steam Curing of Concrete
9	Análisis Físico-Químico de Agua, Pozo Puramex, Texcoco, Edo. Mexico.
10	Asociación Argentina del Hormigón Elaborado, 40º Jornada de Actualización Técnica - 8 de Junio 2017 – Ciudad de Paraná
11	Asociación Mexicana de concreteros independientes AMCI “Control de Calidad del concreto”
12	ASTM-C29/C29M-09 Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate
13	ASTM-C-033 (2009). Standard Specification for Concrete Aggregates.
14	ASTM C 494/C 494M-99 Chemical admixtures for concrete
15	Diseño y Control de Mezclas de Concreto ,PCA ,Portland Cement Association,Kosmatka, Steven H,Ea tl. Illinois, EE.UU., 2004.
16	El Autor.
17	Índice y Notas Generales - Tren México Toluca
18	Informe de Resultados CPC 40 RS, Cemex México, Planta Huichapan, Hidalgo.
19	M-CAL-1-03/03 - SCT - Análisis Estadísticos de Control de Calidad.
20	NMX-C-071-ONNCCE-2004. Agregados-Determinación de Terrones de Arcilla y Partículas Deleznables.
21	NMX-C-072-1997-ONNCCE. Agregados - Determinación de partículas ligeras.
22	NMX-C-073-ONNCCE-2004. Agregados-Masa Volumétrica Suelta -Método de Prueba.
23	NMX-C-083-ONNCCE-2014. Concreto - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes-Método de ensayo.
24	NMX-C-084-ONNCCE-2018. Partículas más finas que la criba 0.075 mm (No. 200) por medio de lavado-Método de ensayo.
25	NMX-C-088-1997-ONNCCE. Agregados-Determinación de Impurezas Orgánicas en el Agregado Fino.
26	NMX-C-109-ONNCCE-2013. Concreto Hidráulico - Cabeceo de Especímenes.
27	NMX-C-111-ONNCCE-2014. Agregados para concreto hidráulico - Especificaciones y Métodos de ensayo.
28	NMX-C-122-ONNCCE-2004. Agua para Concreto-Especificaciones.
29	NMX-C- 128-ONNCCE-2013. Determinación del módulo de elasticidad estático del concreto hidráulico.
30	NMX-C-155-ONNCCE-2014. Concreto hidráulico - Dosificado en masa - Especificaciones y métodos de ensayo.
31	NMX-C-156-ONNCCE-2010. Concreto Hidráulico - Determinación del Revenimiento en el Concreto Fresco
32	NMX-C-159-ONNCCE-2016. Concreto - Elaboración y Curado de Especímenes de Especímenes de Ensayo.
33	NMX-C-161-ONNCCE-2013. Concreto Fresco - Muestreo

Referencias

- | No. | Título/ Tema |
|-----|--|
| 34 | NMX-C-162-ONNCCE-2014. Concreto - Determinación de la masa unitaria, cálculo del rendimiento y contenido de aire del concreto fresco por el método gravimétrico. |
| 35 | NMX-C-164-ONNCCE-2002. Agregados-Determinación de la Masa Especifica y Absorción de Agua del Agregado Grueso. |
| 36 | NMX-C-165-ONNCCE-2004. Agregados-Determinación de la Masa Especifica y Absorción de Agua del Agregado Fino-Método de Prueba |
| 37 | NMX-C-169-ONNCCE-2009. Concreto - Extracción de Especímenes Cilíndricos o Prismáticos de Concreto Hidráulico Endurecido |
| 38 | NMX-C-414-ONNCCE-2010. Cementantes Hidráulicos-Especificaciones y Métodos de Ensayo. |
| 39 | NMX-C-416-ONNCCE-2003. Muestreo de Estructuras Terreas y Métodos de Prueba. |
| 40 | NMX-C-435-ONNCCE-2008. Método para determinar la temperatura en el concreto fresco. |
| 41 | NMX-EC-17025-IMNC-2018. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y/o calibración. |
| 42 | NTC-DC, (2004), Normas Técnicas Complementarias para Diseño y construcción de Estructuras de Concreto. |
| 43 | Orden de Trabajo 461. Evaluación Técnica de Capiteles Prefabricados. IMCYC. |
| 44 | Productos para concreto, aditivos GRACE, ADVA CAST 542, ASTM C494 Tipos A y F, y ASTM C1017 Tipo I. |
| 45 | RCDF (2004), Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. |
| 46 | Tecnología del concreto de Alto Desempeño (HIGH PERFORMANCE CONCRETE), Pablo Portugal Barriga |
| 47 | ULTRASONIDO: Aplicación para la determinación del módulo de elasticidad dinámico”. Revista Construcción y Tecnología en Concreto, Vidaud, E y Vidaud, I. (2015). |
| 48 | Velocidad de Pulsos de Ultrasonido, Capítulo III:Una prueba No Destructiva del Concreto |

Páginas web consultadas

https://www.ema.org.mx/portal_v3/index.php/iaf
https://es.wikipedia.org/wiki/Control_de_calidad
https://www.academia.edu/34735384/Portland_Cement_Association.
<https://lahistoria.info/historia-de-la-calidad/>
<https://victorypes.blogs.upv.es/2015/10/05/puentes-dovelas-cimbras-autoportantes/>
<https://www.gob.mx/busqueda?utf8=%E2%9C%93#gsc.tab=0&gsc.sort=&gsc.q=normas%20mexicanas>