

## DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS

1979

FECHA	HORA	TEMA	PROFESORES
LUNES 9 DE JULIO	9:00- 9:15	INTRODUCCION	ING. FERNANDO FAVELA LOZOYA
"	9:15-10:30	GENERALIDADES SOBRE- MECANICA DE SUELOS	DR. EULALIO JUAREZ BADILLO
"	10:30-10:45	R E C E S O	
"	10:45-12:15	GENERALIDADES SOBRE MECANICA DE SUELOS	DR. EULALIO JUAREZ BADILLO
"	12:15-12:30	R E C E S O	
"	12:30-13:30	MATERIALES PARA PAVI- MENTOS	ING. FELIPE LOO GOMEZ
"	13:30-15:00	C O M I D A	
"	15:00-16:00	MATERIALES PARA PAVI- MENTOS	ING. FELIPE LOO GOMEZ
"	16:00-16:15	R E C E S O	
"	16:15-17:30	ESTABILIZACION DE SUELOS CON ADITIVOS	ING. CARLOS FERNANDEZ LOAIZA
"	17:30-17:45	R E C E S O	
"	17:45-19:00	ESTABILIZACION DE SUELOS CON ADITIVOS	ING. CARLOS FERNANDEZ LOAIZA

FECHA	HORA	TEMA	PROFESORES
MARTES 10 DE JULIO	9:00-10:30	IMPORTANCIA DE LAS TERRACE- RIAS	ING. MIGUEL QUINTERO NARES
"	10:30-10:45	R E C E S O	
"	10:45-12:15	DISEÑO DE PAVIMENTOS EN CA- RRETERAS	ING. LUIS MIGUEL AGUIRRE M.
"	12:15-12:30	R E C E S O	
"	12:30-13:30	DISEÑO DE PAVIMENTOS EN CA- RRETERAS	ING. LUIS MIGUEL AGUIRRE M.
"	13:30-15:00	C O M I D A	
"	15:00-16:45	DISEÑO DE PAVIMENTOS EN CA- RRETERAS	ING. LUIS MIGUEL AGUIRRE M.
"	16:45-17:00	R E C E S O	
"	17:00-19:00	DISEÑO DE PAVIMENTOS EN CA- RRETERAS	ING. LUIS MIGUEL AGUIRRE M.
MIERCOLES 11 JULIO	9:00-11:00	TALLER DE DISEÑO DE PAVIMEN- TOS EN CARRETERAS	ING. MIGUEL QUINTERO NARES
"	11:00-11:15	R E C E S O	
"	11:15-12:15	EVALUACION DEL COMPORTAMIE- NTO DE PAVIMENTOS EN CARRETE- RAS Y CRITERIOS PARA SU RE-- HABILITACION	ING. MIGUEL QUINTERO NARES
"	12:15-12:30	R E C E S O	

FECHA	HORA	TEMA	PROFESORES
MIERCOLES 11 DE JULIO	12:30-13:30	EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO DE PAVIMENTOS EN CARRETERAS - Y CRITERIOS PARA SU REHABILITACION.	ING. MIGUEL QUINTERO NARES
"	13:30-15:00	C O M I D A	
"	15:00-16:45	DISEÑO Y EVALUACION DE PAVIMENTOS EN AEROPUERTOS	ING. FERNANDO RODARTE LAZO
"	16:45-17:00	R E C E S O	
"	17:00-19:00	DISEÑO Y EVALUACION DE PAVIMENTOS EN AEROPUERTOS	ING. FERNANDO RODARTE LAZO
JUEVES 12 DE JULIO	9:00-10:30	PLANEACION DE LOS TRABAJOS DE CONSTRUCCION	ING. CARLOS MANUEL CHAVARRI M.
"	10:30-10:45	R E C E S O	
"	10:45-12:15	PRODUCCION DE AGREGADOS	ING. PEDRO LUIS BENITEZ E.
"	12:15-12:30	R E C E S O	
"	12:30-13:30	PRODUCCION DE AGREGADOS	ING. PEDRO LUIS BENITEZ E.
"	13:30-15:00	C O M I D A	
"	15:00-16:30	BASES Y SUBASES	ING. ALFREDO GUERRA GUAJARDO
"	16:30-16:45	R E C E S O	
"	16:45-17:45	COMPACTACIONES EN EL CAMPO	ING. FEDERICO ALCARAZ LOZANO

FECHA	HORA	TEMA	PROFESORES
JUEVES 12 DE JULIO	17:45-18:00	R E C E S O	
"	18:00-19:00	CARPETAS DE RIEGOS	ING. FEDERICO ALCARAZ LOZANO
VIERNES 13 DE JULIO	9:00-10:30	CARPETAS DE MEZCLAS	ING. EMILIO GIL VALDIVIA
"	10:30-10:45	R E C E S O	
"	10:45-11:45	SELECCION DEL EQUIPO DE COMPACTACION	ING. ROBERTO PASQUEL LUJAN
"	11:45-12:00	R E C E S O	
"	12:00-13:30	TRANSPORTE, COLOCACION Y COMPACTACION DE MEZ- CLAS ASFALTICAS	ING. ROBERTO PASQUEL LUJAN
"	13:30-15:00	C O M I D A	
"	15:00-16:00	PROCEDIMIENTOS DE CONS- TRUCCION DE PAVIMENTOS- RIGIDOS	ING. LUDWIG LINDNER STRAUSS
"	16:00-16:15	R E C E S O	
"	16:15-17:30	PROCEDIMIENTOS DE CONS- TRUCCION DE PAVIMENTOS- RIGIDOS	ING. LUDWIG LINDNER STRAUSS
"	17:30-17:45	R E C E S O	
"	17:45-19:30	CONTROL DE PRODUCCION	ING. FERNANDO FAVELA LOZOYA

FECHA	HORA	TEMA	PROFESORES
SABADO 14 DE JULIO	8:00-10:00	CONTROL DE CALIDAD	ING. ALFONSO RICO RODRIGUEZ
"	10:00-10:15	R E C E S O	
"	10:15-14:00	PANEL: RECUPERACION Y RECICLAJE DE PAVIMENTOS ASFALTICOS.	ING. PEDRO LUIS BENITEZ E. ING. CARLOS FERNANDEZ LOAIZA ING. RAFAEL ANGEL LIMON LIMON ING. MARIO LOPEZ COELLO ING. ROBERTO PASQUEL LUJAN ING. ALFONSO RICO RODRIGUEZ ING. CARLOS VALENCIA RODRIGUEZ



DIRECTORIO DE PROFESORES DEL CURSO DISEÑO Y CONSTRUCCION  
DE PAVIMENTOS 1979.

ING. LUIS MIGUEL AGUIRRE MENCHACA

GERENTE

GEOSOL Y GEOFIMEX, S.A.

ANT. TAXQUEÑA NO. 174

MEXICO 21, D.F.

Tel.544.66.02 y 03

ING. FEDERICO ALCARAZ LOZANO

Director General

Grupo de Ingeniería Integral

Piladelphia No. 128-402

México, D.F.

Tel.536.03.29

ING. PEDRO LUIS BENITEZ ESPARZA

Compacto, S.A. de C.V.

Tonalá 130-1°

México 7, D.F.

Tel.584.41.88 Ext.148

ING. CARLOS M. CHAVARRI MALDONADO

Gerente de Nuevos Proyectos

Dextrum Agrupación

Salvador Alvarado No.144

México 18, D.F.

Tel.277.47.00

ING. FERNANDO FAVELA LOZOYA

Vicepresidente

ICA Internacional

Minería 145 Ent. 1 Edif.2-3°

México 18, D.F.

Tel.516.04.60 Ext.320

ING. CARLOS FERNANDEZ LOAIZA

Jefe de Laboratorio de Pavimentos y Terracerías

Dirección General de Servicios Técnicos

SA.H.O.P.

Xola y Av. Universidad

México 12, D.F.

Tel.530.30.00 Ext.403 y 519.76.60

ING. EMILIO GIL VALDIVIA

Subgerente de Obras Civiles

Comisión de Vialidad y Transporte Urbano

D. D. F.

Av. Juárez No. 42 Edif.,B-1°

México 1, D.F.

Tel.518.66.55

DR. EULALIO JUAREZ BADILLO  
Asesor  
Departamento de Geotecnia  
Oficina de Mecánica de Suelos  
Dirección General de Servicios Técnicos  
S.A.H.O.P.  
Xola y Av. Universidad P.B.  
México 12, D.F.  
Tel. 530.46.77

ING. LUDWIG LINDER STRAUSS  
Director Técnico  
Henro y Asociados  
Shakespeare No. 27-5°  
México, D.F.  
Tel. 250.60.08

ING. JOSE LUIS GUERRA GUAJARDO  
Director  
Guerra, S.A.  
Gral. Méndez 19-2°  
México 18, D.F.  
Tel. 271.24.00

ING. FELIPE LOO GOMEZ  
Jefe de la Oficina  
Control de Calidad  
Dirección General de Aeropuertos  
S.A.H.O.P.  
Xola 1755-3°  
México., D.F.  
Tel. 519.80.10

ING. ROBERTO PASQUEL LUJAN  
Gerente Técnico  
Guerra, S.A.  
Gral. Méndez No. 19-2Piso  
México, D.F.  
Tel. 271.24.00

ING. MIGUEL DE JESUS QUINTERO NARES  
Ingeniero Supervisor  
Dirección General de Servicios Técnicos  
S.A.H.O.P.  
Xola y Av. Universidad  
México 12, D.F.  
Tel. 519.13.46

ING. ALFONSO RICO RODRIGUEZ  
Jefe del Depto. de Geotecnia  
Dirección General de Servicios Técnicos  
S.A.H.O.P.  
Xola y Ave. Universidad  
México 12, D.F.  
Tel. 519.51.65

ING. FRANCISCO FERNANDO RODARTE LAZO  
Jefe de la Oficina de Estudios Especiales  
Departamento Técnico  
Dirección General de Aeropuertos  
Chiapas No. 121-6º  
México, D.F.  
Tel. 574.82.99



EVALUACION DE LA ENSEÑANZA

CURSO: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS 1979.

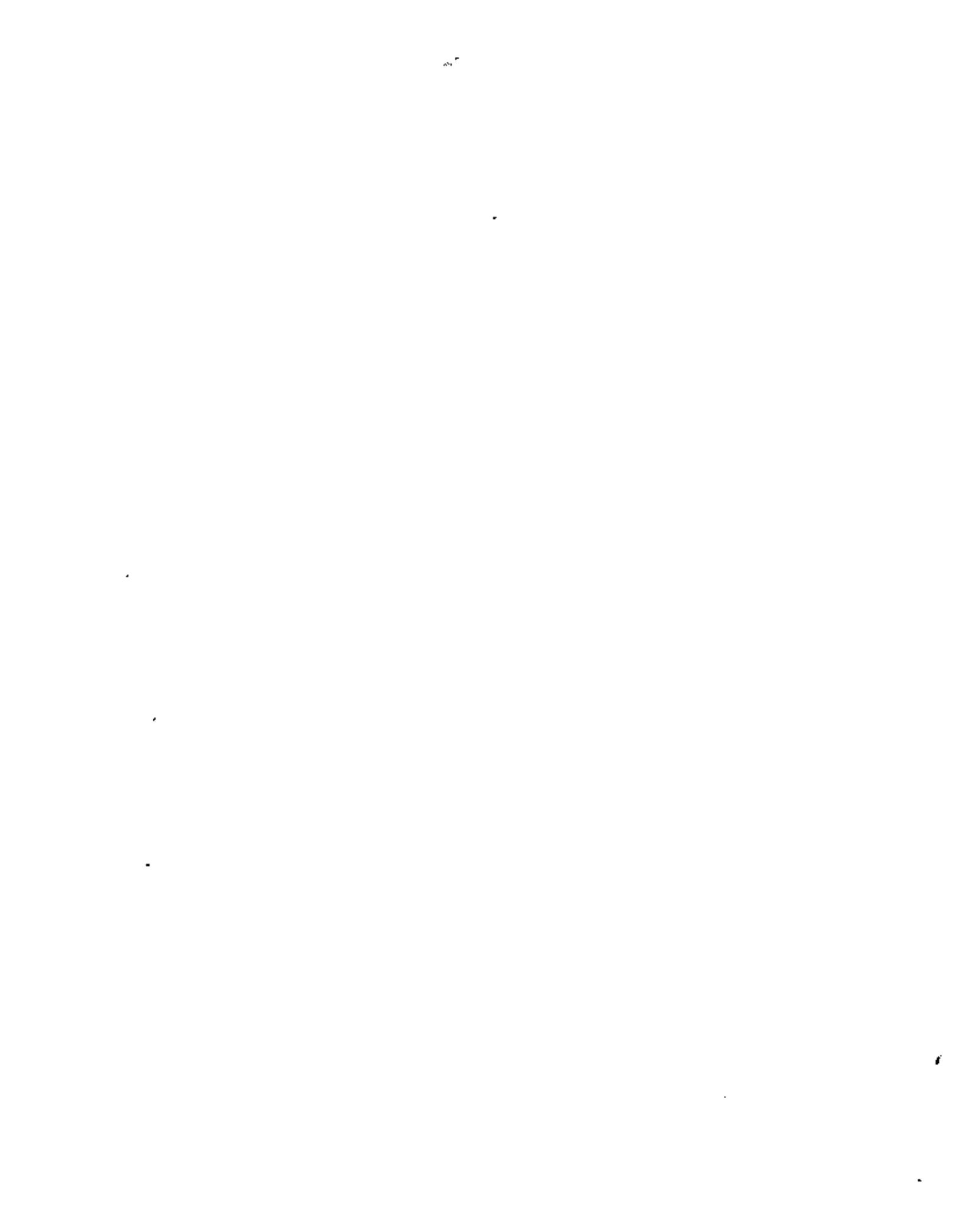
FECHAS: Del 9 al 14 de julio.

	DOMINIO DEL TEMA	EFICIENCIA EN EL USO DE AYUDAS AUDIOVISUALES	MANT. DEL INTERES (AMENIDAD, FACILIDAD DE EXPRESION, COMUNICACION CON LOS ASISTENTES)	PUNTUALIDAD
Introducción (Favela)				
Generalidades sobre Mecá. de Suelos (Juárez)				
Materiales para pavimentos (Loo)				
Estabilización de Suelos con Aditivos (Fernández)				
Importancia de las Terracerías (Quintero)				
Diseño de Pavimentos en Carreteras (Aguirre)				
Taller de Diseño de Pavimentos en Carre... (Quintero)				
Evaluación del comportamiento de pavimentos en carreteras y criterios para su rehabilitación. (Quintero)				
Diseño y evaluación de pavimentos en aeropuertos (Rodarte)				
Planeación de los trabajos de construcción (Chavarrí)				
ESCALA DE EVALUACION DEL 1 AL 10				



- 2 -

	DOMINIO DEL TEMA	EFICIENCIA EN EL USO DE AYUDAS AUDIOVISUALES	MANT. DEL INTERES (AMENIDAD, FACILIDAD DE EXPRESION, COMUNICACION CON LOS ASISTENTES)	PUNTUALIDAD
Producción de agregados (Benítez)				
ases y subases (Guerra)				
Compactaciones en el campo (Alcaraz)				
Carpetas de riegos (Alcaraz)				
Carpetas de mezclas (Gil)				
Selección del equipo de compactación (Pasquel)				
Transporte, colocación y compactación de mez. . (Pasquel)				
Procedimientos de construcción de pavimentos rígidos. (Lindner)				
Control de producción (Favela)				
Control de Calidad (Rico)				
ESCALA DE EVALUACION DEL 1 AL 10 edcs.				



EVALUACION DEL CURSO

	CONCEPTO	EVALUACION
1.	APLICACION INMEDIATA DE LOS CONCEPTOS EXPUESTOS	
2.	CLARIDAD CON QUE SE EXPUSIERON LOS TEMAS	
.	GRADO DE ACTUALIZACION LOGRADO CON EL CURSO	
4.	CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DEL CURSO	
5.	CONTINUIDAD EN LOS TEMAS DEL CURSO	
6.	CALIDAD DE LAS NOTAS DEL CURSO	
7.	GRADO DE MOTIVACION LOGRADO CON EL CURSO	

ESCALA DE EVALUACION DE 1 A 10



1. ¿Qué le pareció el ambiente del Centro de Educación Continua?

Muy agradable       Agradable       Desagradable

2. Medio de comunicación por el que se enteró del curso:

Periódico      Periódico      Folleto del  
Excelsior       Novedades       Curso

Cartel      Radio      Comunicación  
mensual       Universidad       carta, teléfono   
no, verbal, etc.

3. Medio de transporte utilizado para venir al Palacio de Minería:

Automóvil      Metro      Otro medio  
particular            

4. ¿Qué cambios haría usted en el programa para tratar de perfeccionar el curso?

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

5. ¿Recomendaría el curso a otras personas?      Si       No

6. ¿Qué curso le gustaría que ofreciera el Centro de Educación Continua?

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

7. ¿Qué servicios desearía que tuviese el CEC para los asistentes a cursos?

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

8. Otras sugerencias:

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_





centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



## DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS

DISEÑO DE PAVIMENTOS EN CARRETERAS

ING. LUIS MIGUEL AGUIRRE MENCHACA

JULIO, 1979.



las exigencias del tránsito a que hemos hecho men-  
ción, y por lo mismo, la necesidad de construir so-  
bra ellas (las terracerías), una o varias capas con  
materiales cuidadosamente seleccionados, a cuyo con-  
junto se le designa como pavimento, resulta igual-  
mente obvia.

No hay duda entonces, de que el pavimento cons-  
tituye tan solo una parte de la obra vial, a la -  
cual por su ubicación, le corresponde estar en con-  
tacto directo con el tránsito y por lo mismo, ser  
vir de elemento de transmisión de los esfuerzos pro-  
ducidos por éste, hacia la capa superior de las ter-  
racerías. Por su parte, éstas últimas proporcionan,  
a su vez, el apoyo o cimentación del mismo, -  
con adólogos requerimientos en cuanto a la estabili-  
dad e deformabilidad, que son comunes en la cimen-  
tación de cualquier otro tipo de estructura.

Podemos decir, en consecuencia, que los proble-  
mas que se plantean al diseñar un pavimento, no que-  
dan circunscritos a la capa o conjunto de capas que  
integran su estructura, sino que abarcan, con igual  
importancia, a las capas inferiores que constituyen  
propriadamente su cimentación, siendo en este particu-  
lar aspecto en donde, por principio de cuentas, la  
Mecánica de Suelos proporciona una importancia im-  
portante.

Ciertamente, es la regla y no la excepción que  
en la práctica los materiales que forman las terrac-  
erías y mantos subyacentes, dispongan de las caracte-  
rísticas o propiedades mecánicas apropiadas para  
satisfacer adecuadamente los requisitos de esfuerzo  
y deformación que les son necesarios para atender -  
a las sollicitaciones impuestas, tanto por la acción  
del tránsito, como por el peso propio y los agentes  
de intemperie; sin embargo, las excepciones a la re-  
gla, no por ser relativamente de poca frecuencia, -  
disminuyen su importancia; es decir cuando ello ocu-  
rre, adquiere una gran relevancia su estudio. Cite-  
mos como casos típicos, todas aquellas regiones en  
donde la obra vial sufre acción características por -  
sedimentos fluviales o lacustres, preponderantemen-  
te arcillosos, de consistencia blanda e muy blanda,  
tal como ocurre en una amplia región del sur este de  
nuestro país, en diversas zonas sujetas a frecuen-  
tes inundaciones por el desbordamiento de ríos y -  
arroyos, e inclusive al propio Valle de México, por  
mencionar los casos más familiares. Por cierto, a  
propósito de este último y para señalar un ejemplo  
concreto, es pertinente comentar que mientras no se  
tuvo conciencia del comportamiento mecánico de las  
arcillas del Valle y de sus características geotéc-  
nicas, descifradas por la Mecánica de Suelos, y no  
fueron aplicados estos conocimientos al proyecto de

### 1.1 Papel de la Mecánica de Suelos en la tecnolo- gía de pavimentos

Por lo que se refiere a las aportaciones de la  
Mecánica de Suelos a las prácticas de diseño y cons-  
trucción de los pavimentos, es indiscutible que éstas  
han sido y vienen siendo muy amplias y de gran  
 trascendencia.

Como todos sabemos, el pavimento constituye la  
superestructura de una obra vial que, en última in-  
stancia, hace posible el rodamiento de los vehí-  
culos de una manera confortable y segura. Se tra-  
ta, en consecuencia, de un elemento estructural -  
que recubre o reviste a la terracería, con el fin  
de lograr que la superficie final o de acabado, -  
reuna una serie de cualidades necesarias al apro-  
piado rodamiento de los vehículos, durante un lap-  
so o vida útil razonable, en el cual se ve expues-  
to no solo a la acción destructiva del tránsito, -  
sino también a la de los diversos fenómenos de in-  
temperie.

Puesto que los materiales que utiliza el inge-  
niere para la construcción de las terracerías u -  
"cbrados tierra" suelen ser, como norma general, -  
los que proporcionan en forma más inmediata la su-  
perficie de la corteza terrestre, es obvio que es-  
ta calidad se pueda ser la requerida para satisfacer-

los pavimentos en los aeropuertos de la zona (In - ternacional y Militar de Sta. Lucía), su comporta - miento fue por demás deficiente y su conservación - extraordinariamente costosa. En la actualidad, - creemos que gracias a la contribución proporcionada por la Mecánica de Suelos se ha llegado a solu - ciones altamente satisfactorias.

Otro ejemplo interesante al respecto, podemos encontrarlo en el campo de los pavimentos rígidos. El propio Terzaghi, en uno de sus artículos escri - to al principio de los años cuarenta, refiere el - hecho de que en los EUA una buena parte de la red carretera dotada con pavimento de concreto hidráu - lico, se encontraba en estado ruinoso o bien esta - ba siendo reconstruida para su aprovechamiento tem - poral, mediante la aplicación de capas renivelado - ras; la razón fundamental de ello la atribuye al - desconocimiento, por parte de los diseñadores, de - los fenómenos de interacción entre la losa y el - suelo de apoyo, bajo la acción no sólo de las car - gas, sino también de los diversos efectos de inter - parte, que se traducen por ejemplo, en expansiones y contracciones diferenciales por variación en el - contenido de agua del suelo, efectos producidos - por la acción de las heladas, etc.

Como ustedes saben, hacia finales de los años 20 y principios de los 30, Westergaard dió a cono - cer una serie de trabajos sobre los esfuerzos pro - ducidos en una losa de concreto, bajo la acción - tanto del tránsito como de los cambios de tempera - tura. Una conclusión muy importante que se deri - vó de su teoría, la cual por cierto, dentro de - ciertos límites sigue siendo válida, fue que los - esfuerzos de tensión producidos en la losa de un - pavimento, eran prácticamente independientes de - las características del suelo que sirve de apoyo a la losa. Esta conclusión, aunque desde el punto - de vista de las hipótesis de Westergaard es correc - ta, su influencia por aquella época resultó defes - ta al descuidarse los factores antes mencionados, - siendo inclusive usual, apoyar el concreto directa - mente sobre la subrasante, cuyo material, a su vez, podía corresponder a cualquier tipo de suelo por - inconveniente que pudiera aparecer. Es indudable - que en el esclarecimiento de esta anómala actitud - mucho contribuyó la Mecánica de Suelos.

Pasando más concretamente a la estructura em - pírica de un pavimento, podemos decir que las técnicas utilizadas para su diseño se derivan en buena par - te, de los conceptos y desarrollos establecidos - dentro de la Mecánica de Suelos, lo que equivale a hablar de una Mecánica de Suelos aplicada al dise - ño de pavimentos, tal como puede decirse de la Me - cánica de Suelos aplicada a otros campos de la In - geniería Civil, como el de las cimentaciones, las - presas, los muros de retención, etc.

No es el momento, ni habría tiempo para ello, de hacer una descripción exhaustiva de todos y ca - da uno de los conceptos desarrollados por la Mecá - nica de Suelos, y que la tecnología de los pavimen - tos ha asimilado y utilizado en su beneficio, si - embargo, el enunciado de algunos de ellos con un - breve comentario, podría ser elocuente y sobre to - do, a propósito del tema que se me ha encomendado - para comentar ante ustedes.

1. Procedimientos para la determinación de las pro - piedades ingenieriles de los suelos y sus técnicas de ensayo.

De hecho, la generalidad de los materiales que - se emplean en la construcción de un pavimento, sea - vo obviamente, los aglutinantes o cementantes, se - alinean dentro de la definición ingenieril de suelo, y por lo mismo, es lógico que su estudio quede comprendido dentro de la Mecánica de Suelos no sólo por lo que se refiere a la determinación de sus propiedades índice; granulometría, plasticidad, - etc., sino al estudio concreto de su comportamiento: resistencia al esfuerzo cortante, compresibi - lidad, y cambios volumétricos en general.

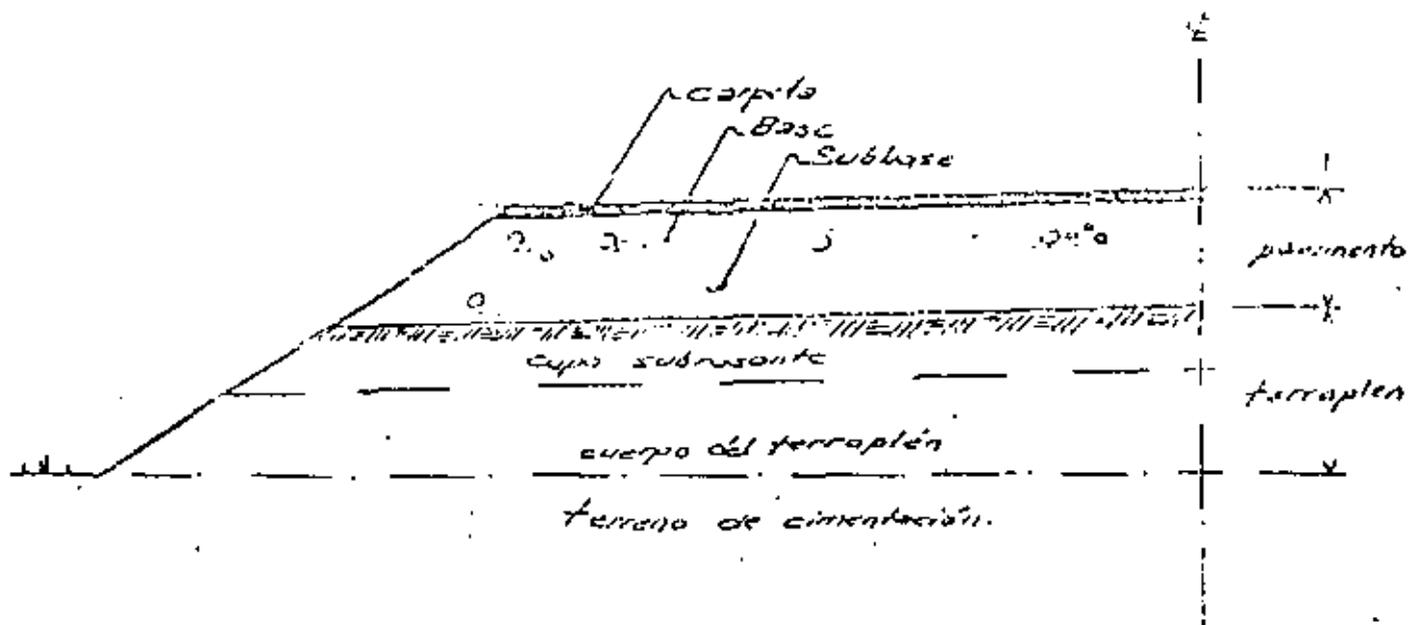
2. Teorías de capacidad de carga en cimientos su - perficiales.

Ciertamente al considerar a un pavimento como - una especie de cimiento superficial, no deja de - ser una analogía un tanto simplista del problema. Sin embargo, la aceptación de este concepto, ana - lizado a la luz de las teorías de capacidad de car - ga, ha permitido reconocer la influencia de una ar - ris de factores que afectan el comportamiento de - un pavimento, cuando menos desde un punto de vista - cualitativo pero de gran utilidad. Por ejemplo, - la importancia de emplear materiales predominantemente friccionantes en las capas inferiores de un - pavimento flexible, y la necesidad de hacer inter - venir una componente de resistencia cohesiva en - las superiores; la influencia de la magnitud del - área de contacto de las llantas en la capacidad de - carga del pavimento, así como la importancia de - las presiones de confinamiento en las inmediacio - nes a las orillas del mismo.

Por otra parte, el conocimiento acumulado por - la Mecánica de Suelos en cuanto a los factores que - afectan la resistencia al esfuerzo cortante de los - suelos, particularmente en lo que se refiere a la - forma de las partículas, la granulometría, la com - posición, etc., ha sido grandemente utilizada de - una manera normativa en los criterios de selección y utilización de los materiales de pavimentación.

3. Otro aspecto importante, en donde los conoci - mientos adquiridos por la Mecánica de Suelos en - cuentran una amplia aplicación en el diseño de los - pavimentos, lo encontramos a propósito de la com - pactación de los suelos, en el estudio de los dife - rentes factores que la afectan y su influencia en - el comportamiento de los mismos.

4. Finalmente, podríamos decir que, independien - temente de las aportaciones más o menos concretas - a que se ha hecho referencia con anterioridad, la - Mecánica de Suelos, como una disciplina científica - co, sustentada en una labor que se ha distinguido - por su fecunda fuente de investigación creadora, - es innegable que ha ejercido y ejerce, una influen - cia definitiva en la evolución y logros alcanzados - por la tecnología de los pavimentos, la cual se - percibe incluso, en la actitud y mentalidad de los - técnicos e investigadores que encararon el importan - te y complejo problema de los pavimentos.



**Terrano de cimentación.** - Soportar la obra viat.

**Terraplén.** a) **Cuerpo del terraplén:** - Cubrir las funciones del terraplén.

b) **Capa subrasante.** - Apoyo adecuada del pavimento.

**Subbase.** - Transmitir esfuerzos a la capa subrasante

Transición entre base y subrasante.

Reducir efectos de cambios volumétricos y rebote elástico

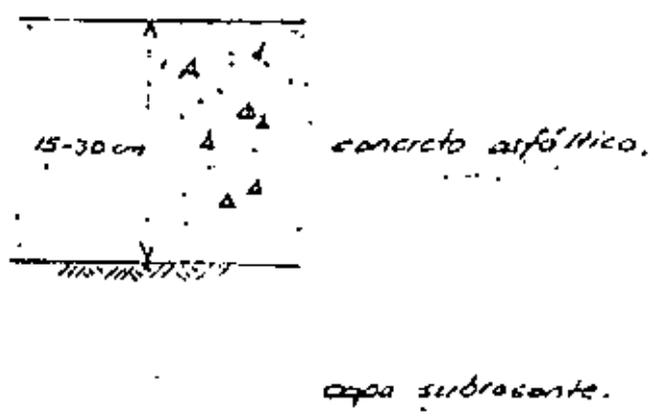
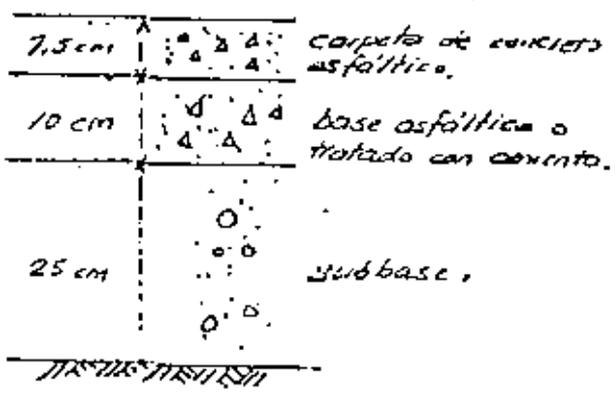
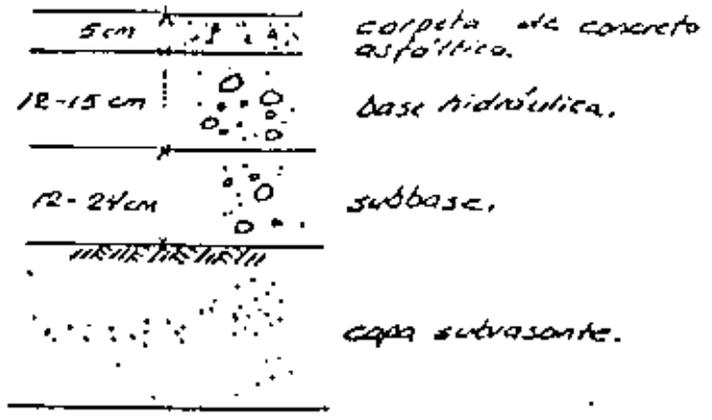
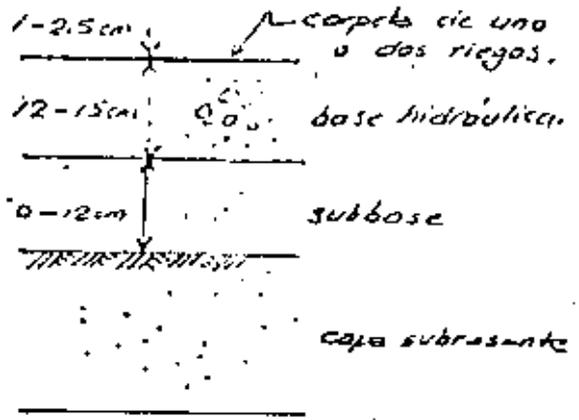
Reducir costo del pavimento.

**Base.** - Soportar adecuadamente las cargas y distribuir esfuerzos a las capas subyacentes en forma adecuada.

**Carpete.** - Proporcionar una superficie estable, uniforme, impermeable y de textura apropiada.

FIGURA

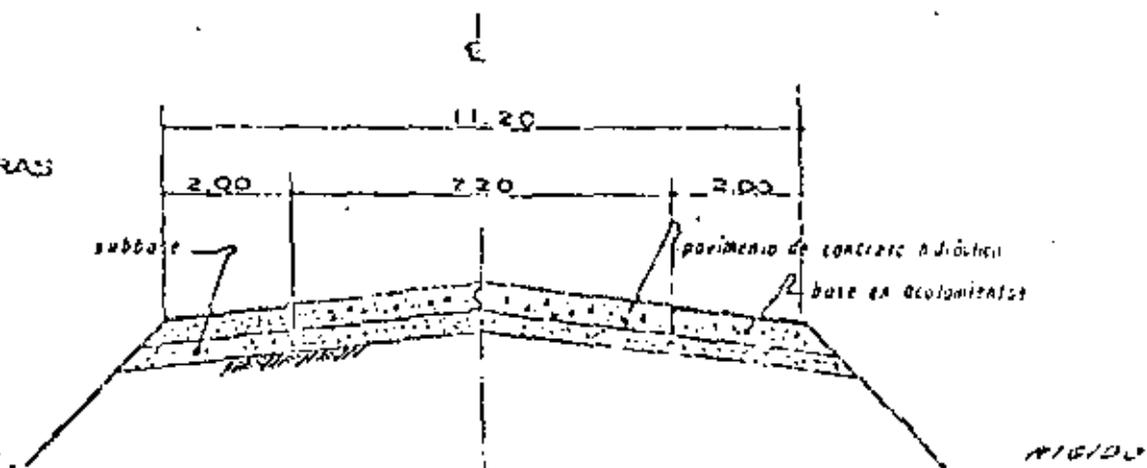
ESTRUCTURAS TÍPICAS DE PAVIMENTO FLEXIBLE PARA DIFERENTES TIPOS DE TRÁNSITO



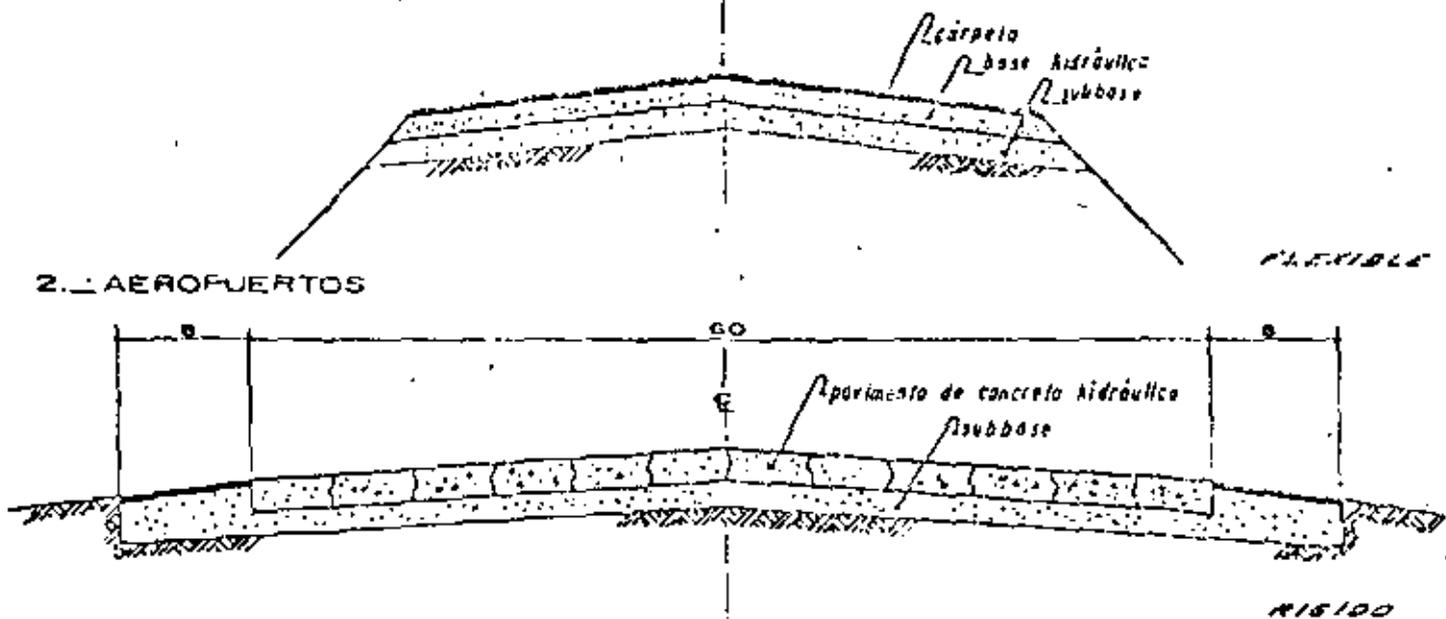
El espesor de la capa subrasante varía entre 30 y 50 cm.

# SECCIONES TÍPICAS DE PAVIMENTOS

## 1. CARRETERAS



## 2. AEROPUERTOS



## 3. CALLES

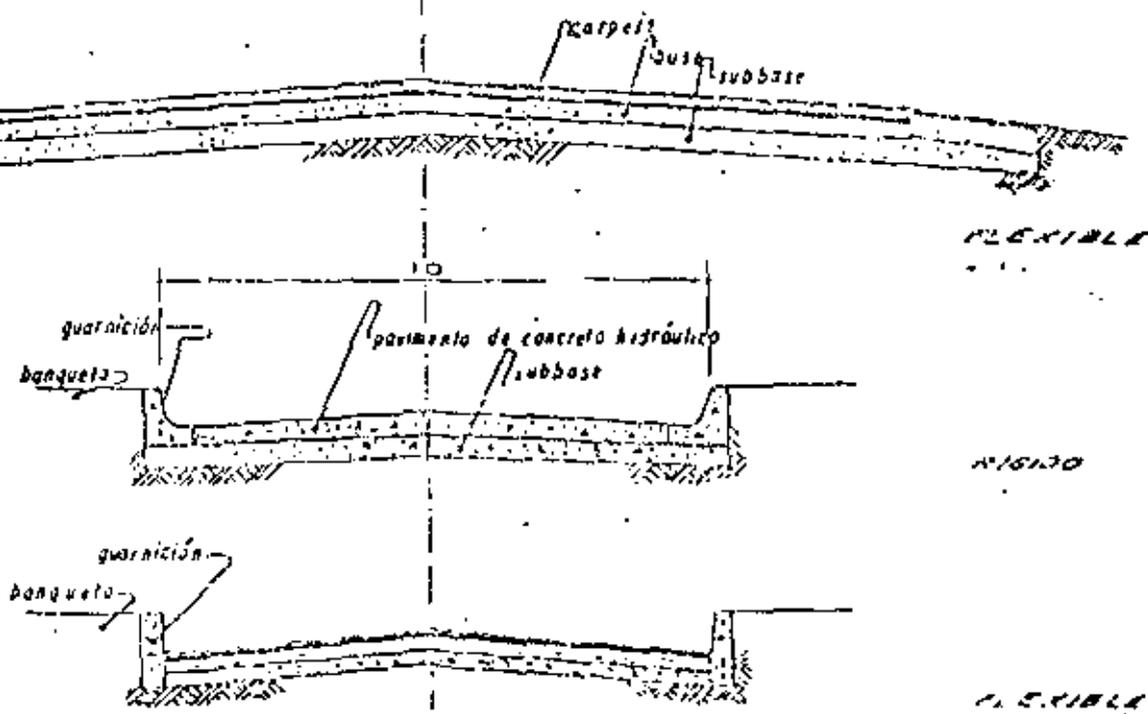
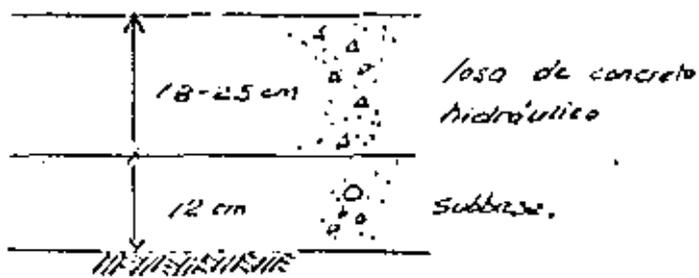
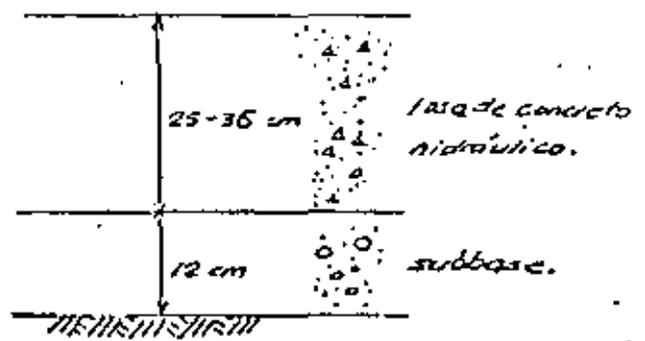


FIGURA.-

ESTRUCTURAS TÍPICAS DE PAVIMENTO RIGIDO



calles y carreteras.



aeropuertos.

señal de presfuerza



losa de concreto presfuerza.

subbase

1.- FASE DEL PROYECTO.

- ESTRUCTURACION Y DIMENSIONAMIENTO DE LAS DIFERENTES CAPAS (P. FLEX). DIMENSIONAMIENTO DE LA LOSA, TIPO Y UBICACION DE LAS JUNTAS (P. RIGIDOS)
- FIJACION DE LAS NORMAS DE CALIDAD Y DE LAS FUENTES DE APROVISIONAMIENTO DE MATERIALES.
- ESPECIFICACIONES GENERALES Y NORMAS DE CONSTRUCCION
- TOLERANCIAS DE CONSTRUCCION Y ACABADO.

2.- QUE DEBEMOS HACER:

✓ ESTUDIOS ESPECIFICOS.

EXPLORACION Y MUESTREO A LO LARGO DE LA RUTA  
ENSAYES DE LABORATORIO  
ANALISIS DE TRANSITO  
CLIMA Y FACTORES AMBIENTALES  
RECURSOS Y POTENCIALIDAD DE MATERIALES

3.- QUE DEBEMOS TENER:

- BUEN CONOCIMIENTO DE LOS DIFERENTES FACTORES QUE AFECTAN EL COMPORTAMIENTO DE UN PAVIMENTO.
- CIERTO DOMINIO DE VARIOS DE LOS PRINCIPALES METODOS DESARROLLADOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LAS DIFERENTES CAPAS.
- FAMILIARIDAD CON LAS NORMAS QUE REGULAN LA CALIDAD Y COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES.
- EXPERIENCIA Y BUEN JUICIO.

10

DATOS PARA EL PROYECTO

TRANSITO

- AERONAVE DE DISEÑO O TRANSITO EQUIVALENTE
- NUMERO DE APLICACIONES
- PESO TOTAL DE OPERACION
- CONFIGURACION DEL TREN DE ATERRIZAJE O NUMERO DE EJES
- PRESIONES DE INFLADO Y DE CONTACTO
- CANALIZACION DE TRANSITO

CARACTERISTICAS DEL SUBSUELO Y DE LOS MATERIALES PARA PAVI-  
MENTACION

- PROPIEDADES INGENIERILES DE LOS SUELOS
- CARACTERISTICAS Y POTENCIALIDAD DE MATERIALES EN LA ZONA.

CARACTERISTICAS CLIMATOLOGICAS Y FACTORES AMBIENTALES

- VARIACION DE LA TEMPERATURA
- REGIMEN PLUVIOMETRICO
- DRENAJE Y SUBDRENAJE
- POSICION DEL NIVEL DE AGUAS FREATICAS
- TOPOGRAFIA

METODO S O P

INTENSIDAD DE TRANSITO DE VEHICULOS CON CAPACIDAD DE CARGA IGUAL O SUPERIOR A 3 TONELADAS METRICAS, CONSIDERADO EN UN SOLO SENTIDO.	CURVA APLICABLE PARA EL PROYECTO DE ESPESORES.
Menos de 500 vehiculos al dia	IV
De 500 a 1000 vehiculos al dia	III
De 1000 a 2000 vehiculos al dia	II
Más de 2000 o autopistas	I

NATIONAL CRUSHED STONE ASSOCIATION

TABLA DE VALORES DEL INDICE DE DISEÑO PARA DIVERSAS CATEGORIAS DE TRANSITO

INDICE DE DISEÑO	CARACTERISTICAS GENERALES GRUPO 1.- AUTOMOVILES, PANEL Y PICK-UP. GRUPO 2.- CAMIONES DE 2 EJES CARGADOS O MAYORES CON CARGAS LIGERAS O VACIOS. GRUPO 3.- TODOS LOS VEHICULOS CON MAS DE TRES EJES.	CARGAS EQUIVALENTES POR EJE DE 18 000 LB PROMEDIO DIARIO EN EL CARRIL DE DISEÑO PARA UN PERIODO DE PROYECTO DE 20 AÑOS CON MANTENIMIENTO NORMAL
DI - 1	Tránsito ligero.- Pocos vehículos mas pesados que los Automóviles	menos de 5
DI - 2	Tránsito mediano-ligero-similar al DI-1 1000 VPD como máximo, incluyendo 5% del Grupo 2 como máximo.	6-20
DI - 3	Tránsito mediano.- 3000 VPD máximo, incluyendo no más del 10% de los grupos 2 y 3 y 1% del grupo 3.	21-75
DI - 4	Tránsito mediano - pesado.- 6000 VPD máximo, incluyendo no más del 15% de los grupos 2 y 3 y 1% del Grupo 1	76-250
DI - 5	Tránsito pesado.- 6000 VPD máximo, incluyendo hasta el 25% de los grupos 2 y 3 y 10% del Grupo 3.	251-900
DI - 6	Tránsito muy pesado. Más de 6000 VPD, pudiendo incluir más del 25% de los grupos 2 y 3	901-3000

DEPARTAMENTO DE CARRETERAS DE CALIFORNIA

No. de ejes	Constantes	Tránsito diario al inicio del período de diseño	Factores de incremento	EWL por Grupo de ejes
2	280	80	2.0	44,800
3	930	18	1.8	30,100
4	1,320	7	1.5	13,900
5	3,190	18	1.85	106,200
6	1,950	2	1.5	5,800

Promedio anual de repeticiones 200,800

Multiplicando por el período de diseño: (20 años)

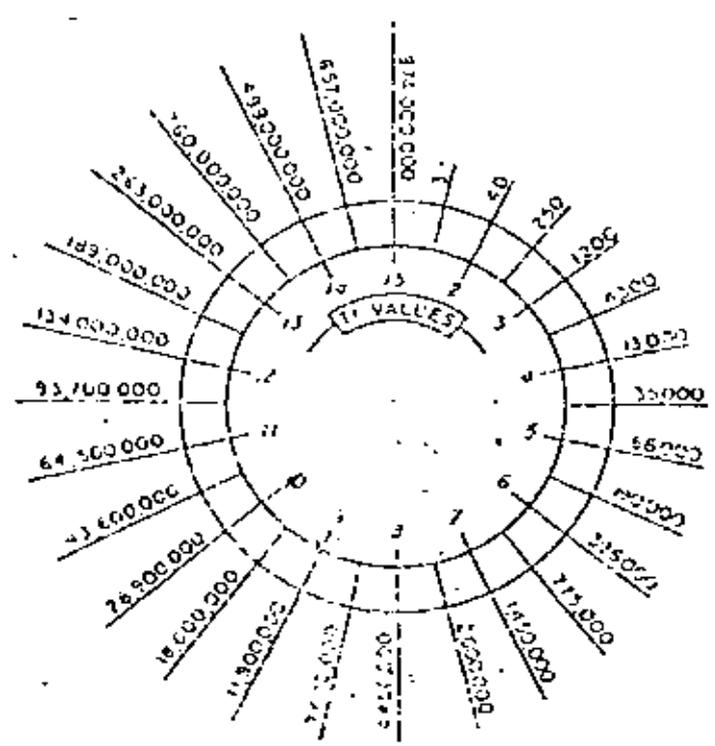
EWL = 20 x 200800 = 4,016,000

Para convertir a índice de tránsito, se puede emplear la fórmula siguiente o bien, mediante la gráfica mostrada.

Tl = 6.7 ( EWL / 10^6 ) ^ 0.119

Tl = 6.7 ( 4,016,000 / 10^6 ) ^ 0.119 = 1.9 #B

CONVERSION CHART EWL TO TRAFFIC INDEX



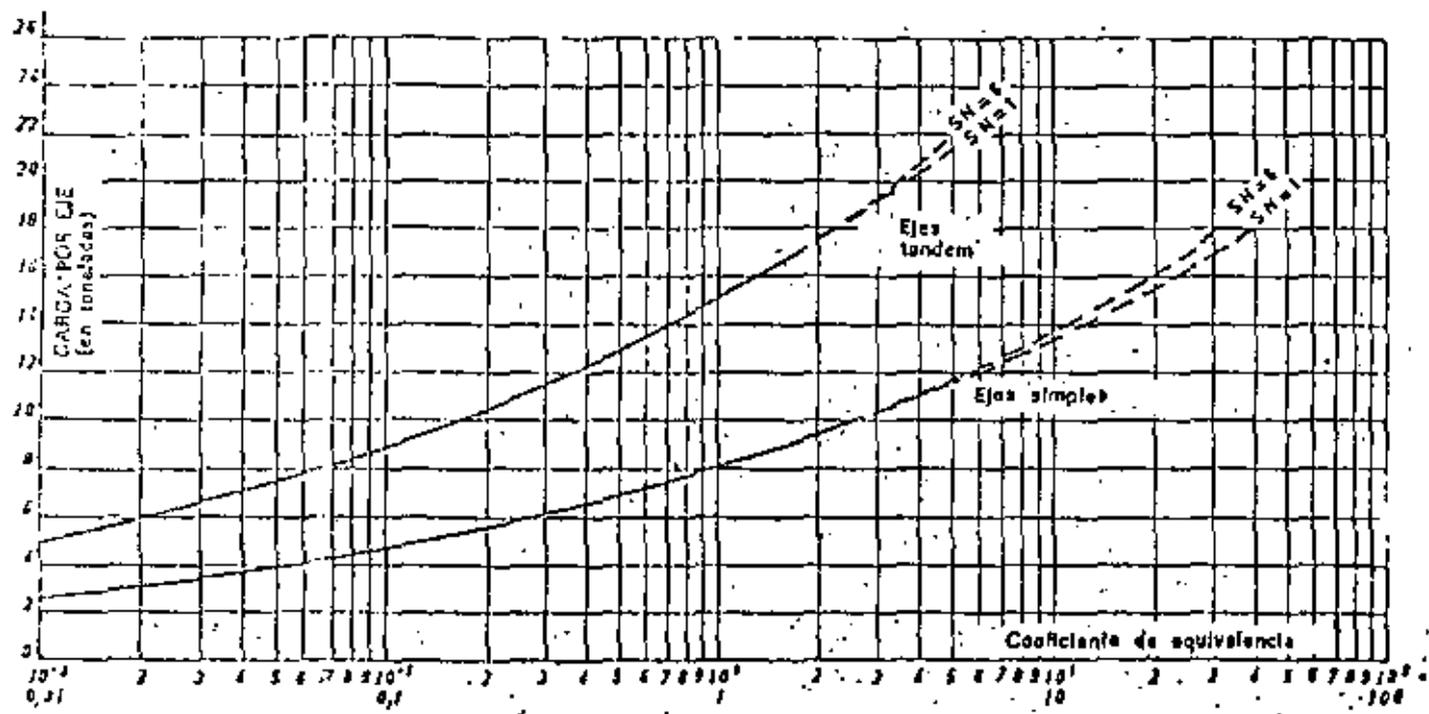


FIG. 34. Coeficiente de equivalencia (firmas flexibles).  
según Liddle (Du cau of Public Roads). Índice de viabilidad final: 2.0

METODO AASHO

Tránsito diario en dos direcciones = 500 vpd  
 Dirección del tránsito en 2 carriles = 50 y 50%  
 Porcentaje de camiones = 25%  
 Tasa de incremento por año = 5.5 %

$p = 2; SN = 4.$

CARGA POR EJE (KIPS)	EJES SENCILLOS POR CADA 100 CAMIONES			EJES EN TANDEM POR CADA 100 CAMIONES		
	NUMERO	F	NxF	NUMERO	F	NxF
Menos de 3	75.3	0.0002	0.02			
3-5	29.9	0.002	0.06			
5-7	10.5	0.01	0.11			
7-9	3.4	0.03	0.10			
9-11	4.2	0.08	0.34			
11-13	3.0	0.18	0.54			
13-15	4.1	0.35	1.43	0.1	0.03	0.01
15-17	9.3	0.61	5.78	0.5	0.05	0.03
17-19	11.0	1.00	11.00	1.5	0.03	0.13
19-21	8.0	1.55	12.40	2.0	0.12	0.24
etc.						

Totales 46.99 14.99

Ejes equivalentes por cada 100 camiones = 46.99 + 14.99 = 61.98  
 Tránsito inicial de 18 000 LB por eje equivalente

$$\frac{500}{2} \times 0.25 \left( \frac{61.98}{100} \right) = 38.7$$

Tránsito acumulado para un período de 10 años

$$\sum_0^n EAL = \frac{EAL_0 (365)}{\log_e (1 + i)} \left[ (1 + i)^n - 1 \right]$$

$$\approx EAL = \frac{38.7 \times 365}{0.0535} \left[ (1.055)^{10} - 1 \right] = 186\ 818$$

o bien, efectuando los cálculos por cada año:

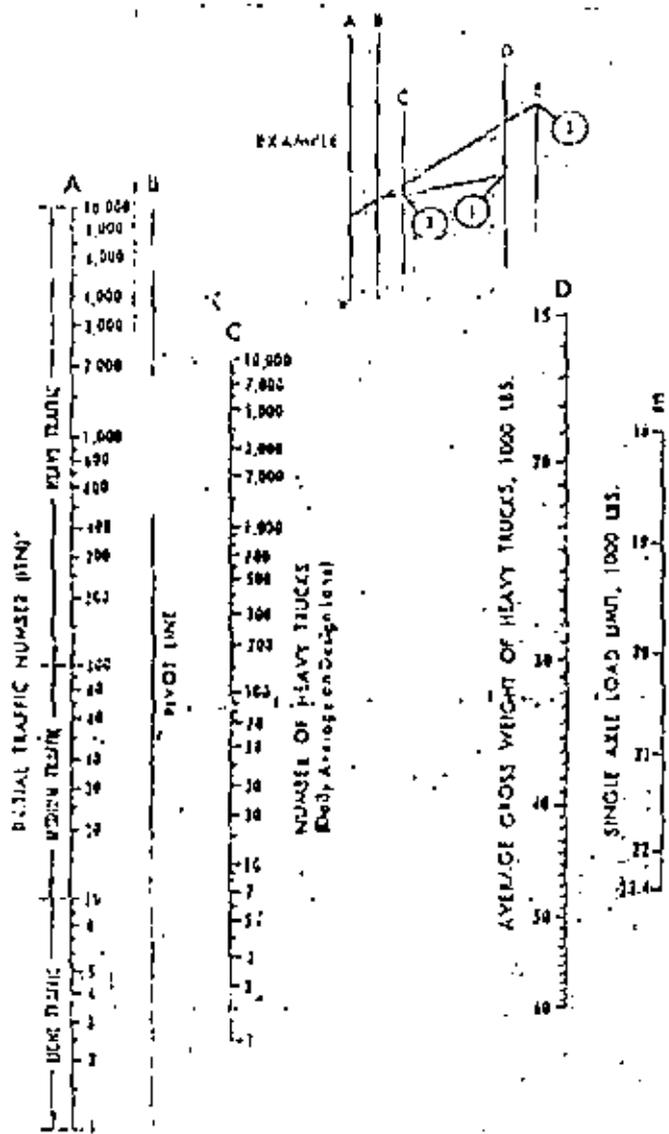
Fin del año	$(1 + i)^n$	Total en el año
1	1.000	$38.7 \left( \frac{1 + 1.055}{2} \right) (365) = 14\ 517$
2	1.055	$38.7 \left( \frac{1.055 + 1.113}{2} \right) (365) = 15317$
3	1.113	$38.7 \left( \frac{1.113 + 1.174}{2} \right) (365) = 16\ 132$
etc.		TOTAL 186 807

NOTA

- 74  $K_v$  = Coeficiente de equivalencia para el vehículo vacío.  
 $K_c$  = Coeficiente de equivalencia para el vehículo cargado.

AP	W <sub>VAC</sub>	K <sub>V</sub>	W <sub>CARG</sub>	K <sub>C</sub>
1	0.9	0.0001	1.0	0.0002
	0.9	0.0001	1.0	0.0002
	—	—	—	—
	Σ	1.8	0.0002	2.0
2	1.2	0.0005	1.6	0.0014
	1.2	0.0005	3.3	0.0260
	—	—	—	—
	Σ	2.4	0.0010	4.9
3	3.0	0.0180	4.2	0.0690
	7.0	0.5310	8.3	1.0500
	—	—	—	—
	Σ	10.0	0.5490	12.5
4	1.5	0.0011	2.5	0.0086
	2.7	0.0118	6.8	0.4730
	—	—	—	—
	Σ	4.2	0.0129	9.3
5	1.7	0.0018	2.6	0.0100
	5.2	0.0144	14.0	0.7600
	—	—	—	—
	Σ	6.9	0.0162	16.6
6	2.5	0.0085	3.0	0.0180
	3.6	0.0370	8.0	0.9059
	3.0	0.0180	7.8	0.8186
	Σ	9.1	0.0635	18.8
7	3.5	0.0331	4.0	0.0560
	4.0	0.0560	8.5	1.1600
	3.8	0.0100	12.1	0.4300
	Σ	11.3	0.0991	24.6
8	3.5	0.0331	3.9	0.0510
	5.4	0.0168	13.0	0.5640
	5.0	0.0124	13.0	0.5640
	Σ	13.9	0.0623	29.9

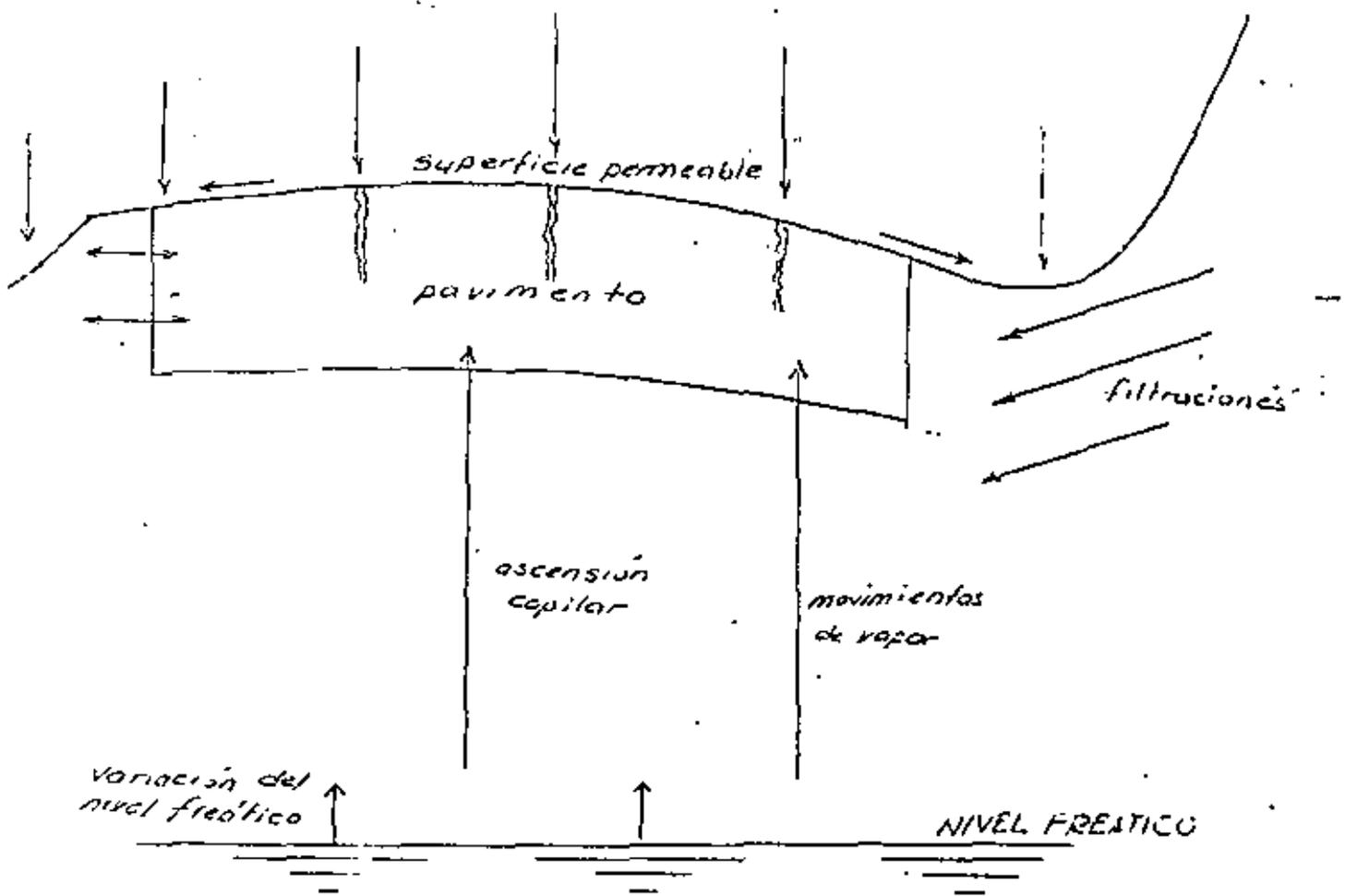
Fig 7 Conversión de vehículos a ejes equivalentes

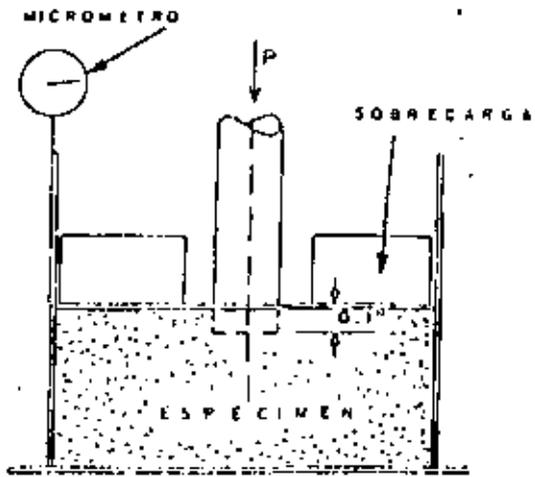


\*DTN value may require correction where the DTN of automobiles and light trucks is relatively high. See Figure III-2

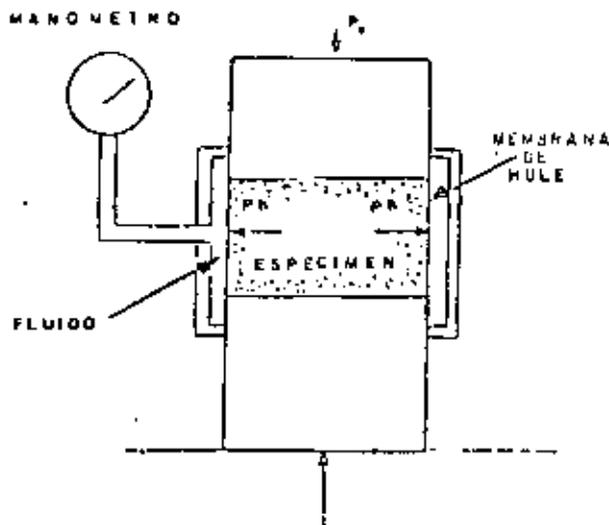
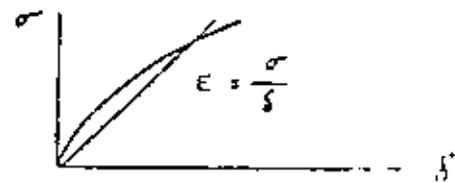
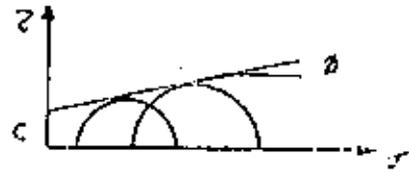
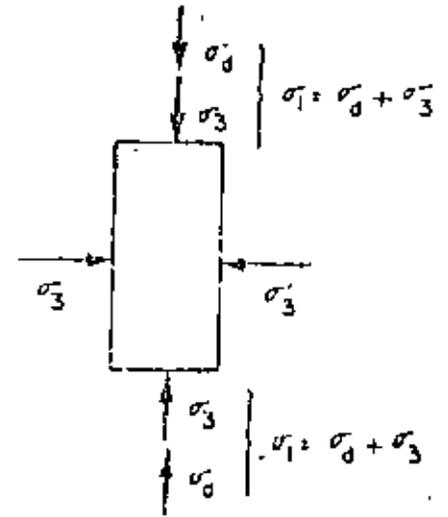
Additional copies of this nomograph are available at the nearest Asphalt Institute office.

Figure III-1—Traffic analysis chart

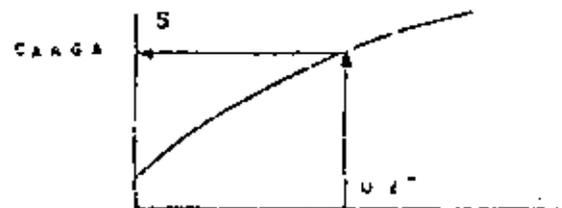
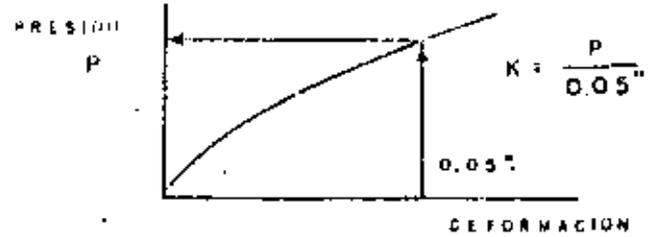
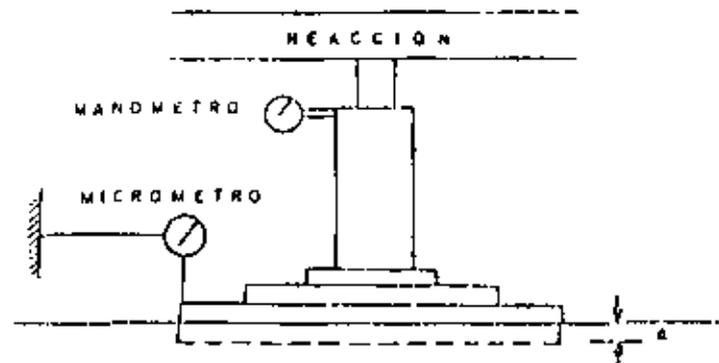




$$CBR = \frac{P_{0.1''}}{1560 \text{ Kg.}} \times 100$$



$$R = \left\{ 1 - \frac{P_h}{P_v} \right\} 100$$



DEFORMACION PROMEDIO PARA 10 REPETICIONES

6.- METODOS DE DISEÑO

1.- METODOS QUE PARTEN DE CONSIDERACIONES TEORICAS Y SEMITEORICAS, UTILIZANDO VALORES DE CORRELACION. PRUEBAS TRIAXIALES.

- KANSAS (E)
- TEXAS ( c y  $\phi$  )
- HVEEM (R, función de  $\frac{P_h}{P_v}$  )

2.- PROCEDIMIENTOS EMPIRICOS BASADOS EN UNA PRUEBA ARBITRARIA, TAL COMO LA DE CBR.

- CUERPO DE INGENIEROS
- ROAD RESEARCH LABORATORY
- WYOMING, KENTUCKY
- SOP

3.- METODOS BASADOS EN PRUEBAS DE CLASIFICACION DE SUELOS. INDICE DE GRUPO.

4.- METODOS CON BASE EN CRITERIOS OBTENIDOS DEL TRAMO DE PRUEBA AASHO:

- SHOOK - FINN
- BOUREAU OF PUBLIC WORKS
- INSTITUTO DE INGENIERIA, UNAM.

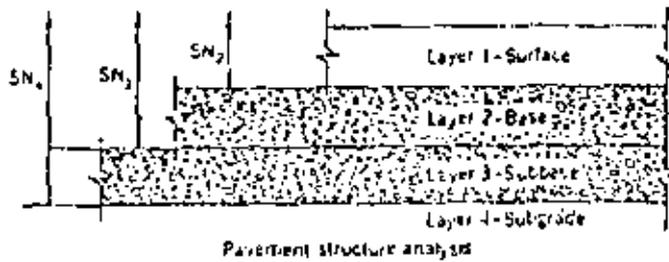


Figure 13.4. Alternate procedure for determining flexible pavement layer thicknesses (From AASHTO Interim Guide, 1972.)

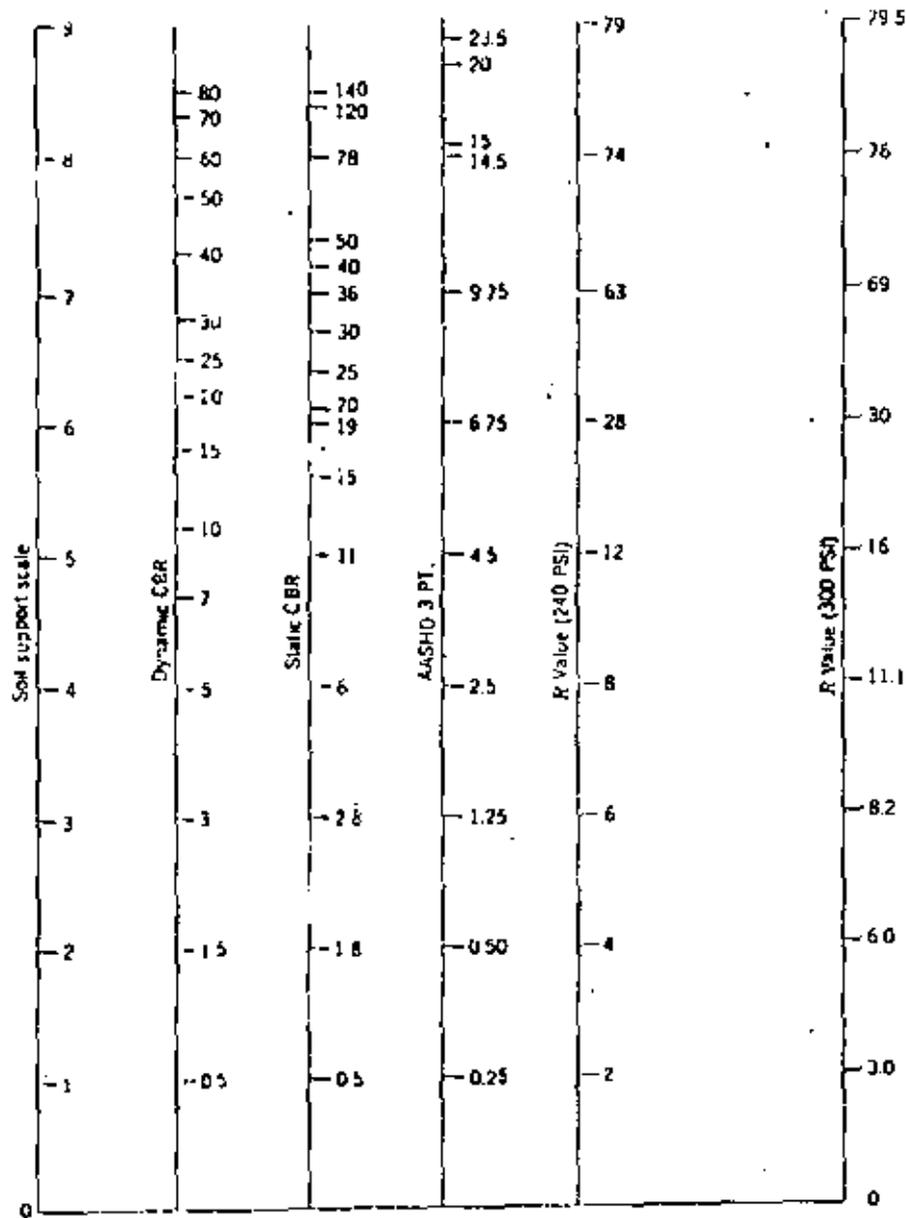


Figure 13.5. Soil support value correlations. (a) After Utah State Highway Department and (b) from Van Til et al., NC11RP 126.

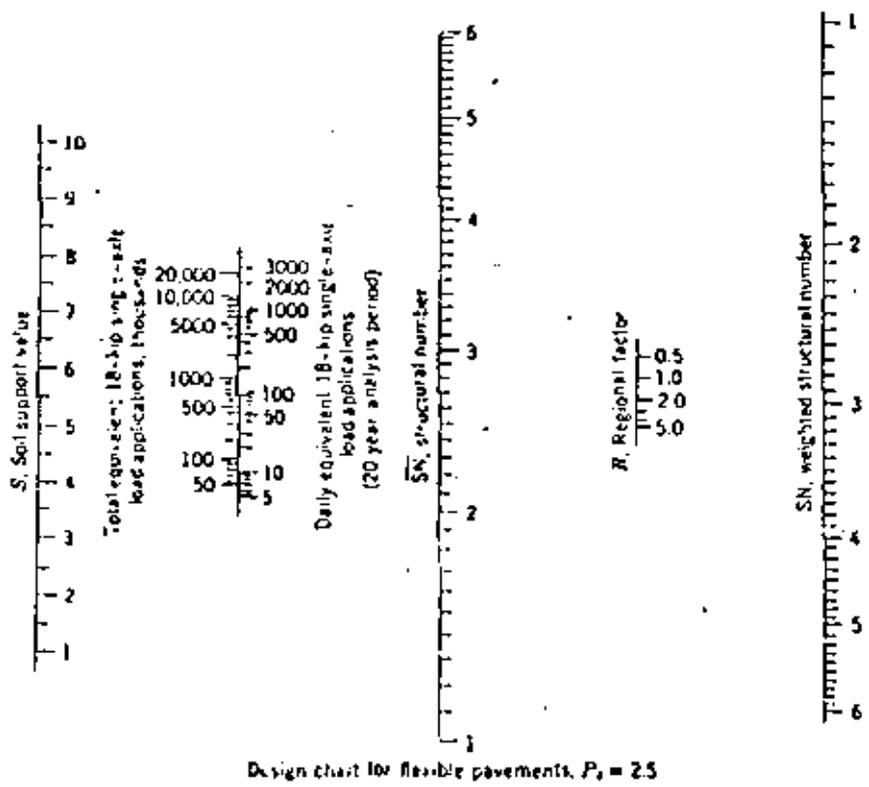
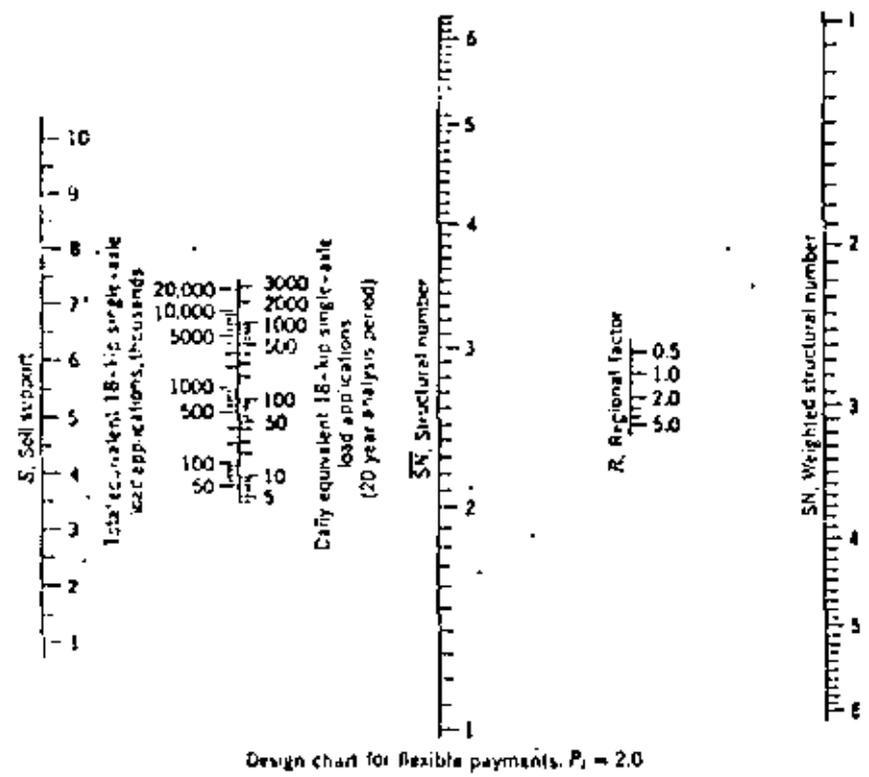
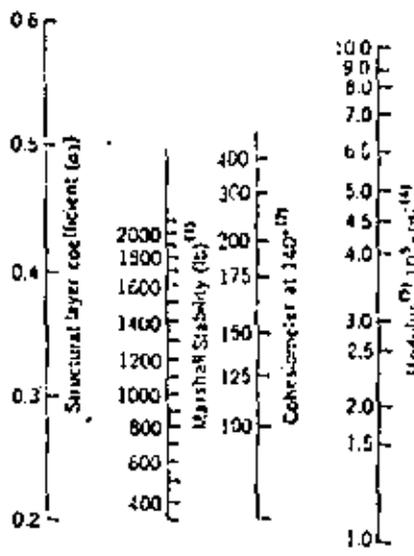
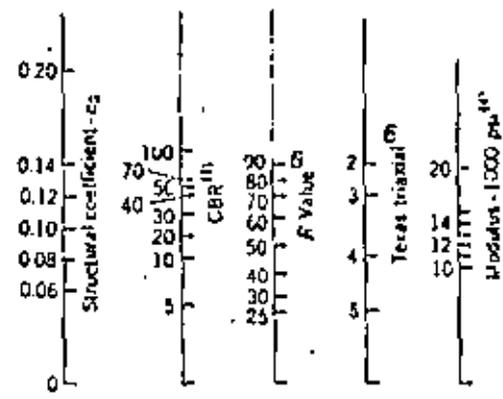


Figure 15.1. AASHO flexible-pavement design nomographs. (From AASHO Interim Guide, 1972)



- (1) Scale derived by averaging correlations obtained from the Asphalt Institute (Illinois, Kentucky, New Mexico and Wyoming).
- (2) Scale derived by averaging correlations obtained from California and Texas.
- (3) Scale derived on this project.
- (4) Modulus at 80°F.

(a)



- (1) Scale derived from correlations by M. Nilsen.
- (2) Scale derived from correlations obtained from the Asphalt Institute, California, New Mexico and Wyoming.
- (3) Scale derived from correlations obtained from Texas.
- (4) Scale derived on this project.

(b)

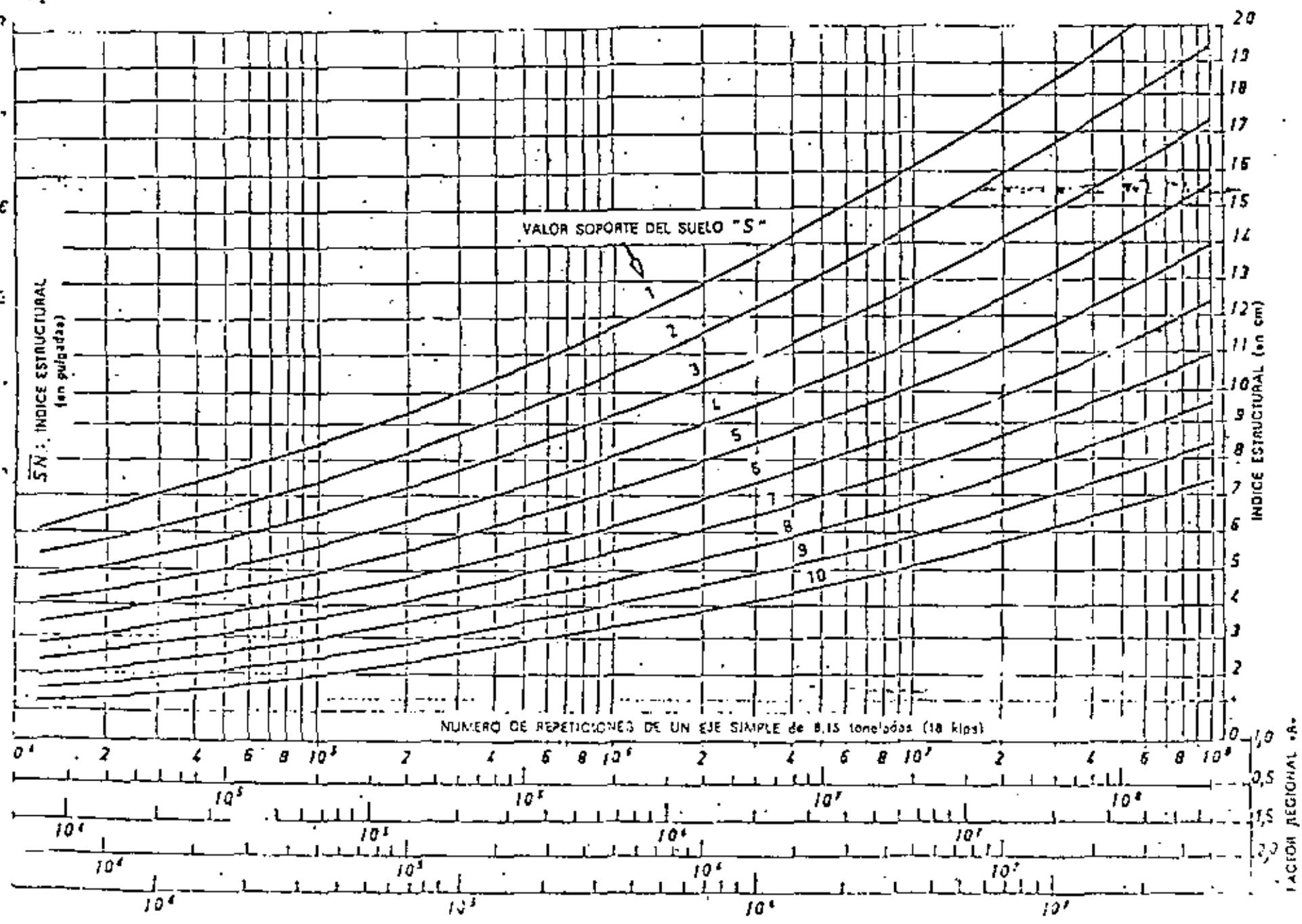


FIG. 29. Cálculo de frentes flexibles.  
 Método de Lullie (Bureau of Public Roads), Índice de viabilidad Enal : 2.0

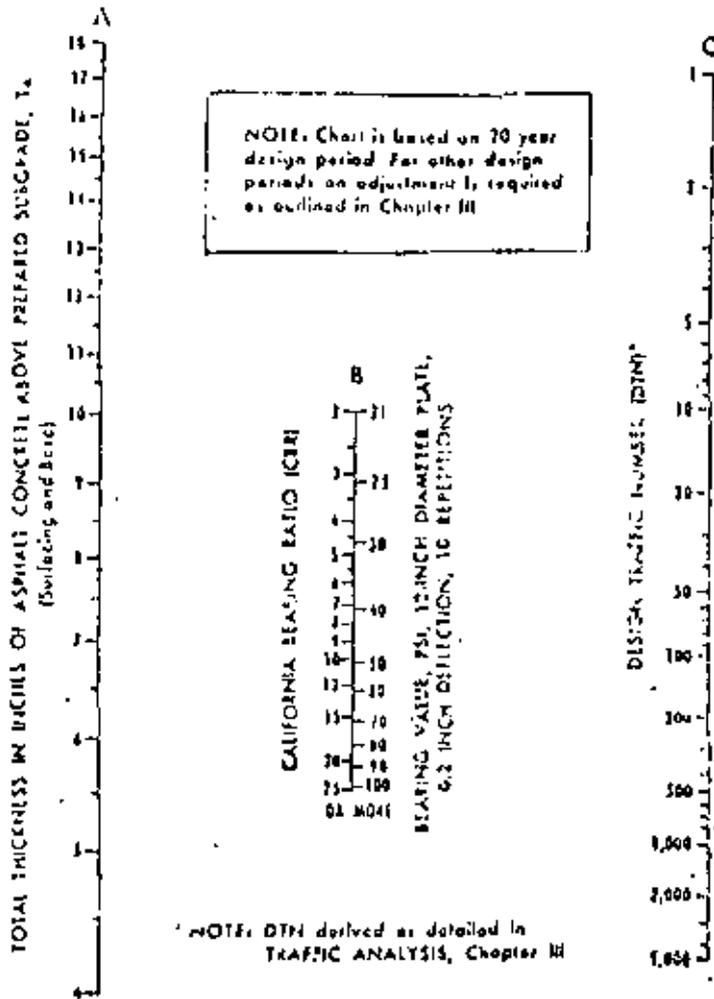
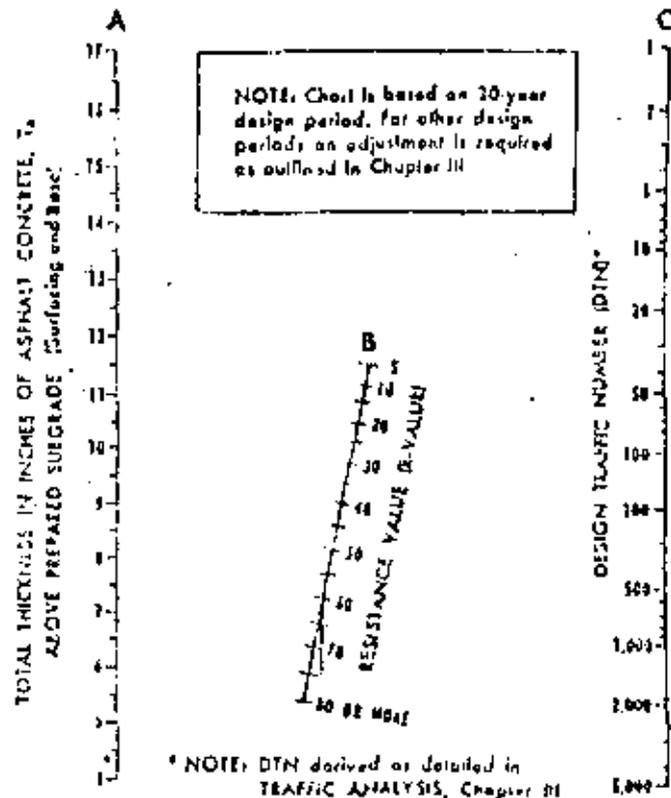


Figure V-1—Thickness design chart for asphalt pavement structures using subgrade soil CBR or Plate-Bearing values



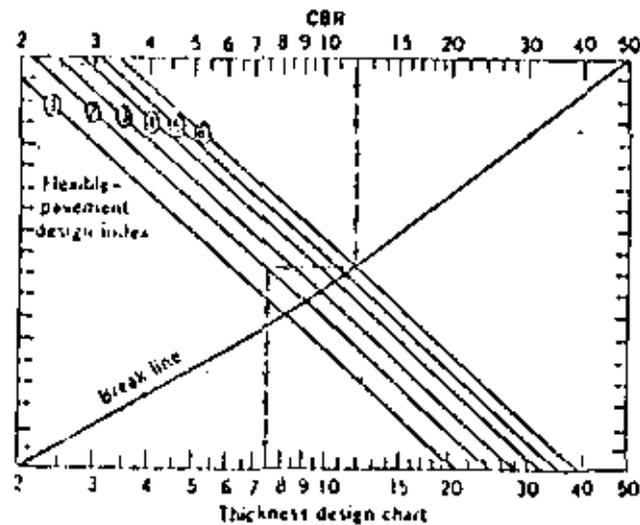


Figure 13.17. Thickness design chart. (From the National Crushed Stone Association and after U. S. Corps of Engineers TSC 3-822-5)

TABLE 13.12. Surfacing Thickness Recommendations

Traffic Intensity Category	Minimum Surfacing Required
DI-1	1 inch (use surface treatments)
DI-2	2 inches
DI-3	2.5 inches
DI-4	3 inches
DI-5	3.5 inches
DI-6	4 inches

$$GE = 0.005R(TI)(100 - R)$$

TABLE 13.10. California Gravel Equivalents of Structural Layers in Feet

Actual Thickness of Layer (ft)	ASPHALT CONCRETE										Cement-treated Base		Aggre- gate Base	Aggre- gate Sub- base		
	Traffic Index (TI)										BTB and LTB	Class				
	and below	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5		A			B	
	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0							
Gravel Equivalent Factor ( $G_f$ )										$G_f$	$G_f$	$G_f$	$G_f$			
	0.50	2.32	2.14	2.01	1.89	1.79	1.71	1.64	1.57	1.52	1.2	1.7	1.2	1.1	1.0	
0.10	0.25	0.23	0.21	0.20	0.19	0.18	0.17	0.16	0.16	0.15	0.12	—	—	—	—	
0.15	0.38	0.35	0.32	0.30	0.28	0.27	0.26	0.25	0.24	0.23	0.18	—	—	—	—	
0.20	0.50	0.46	0.43	0.40	0.38	0.36	0.34	0.33	0.31	0.30	0.24	—	—	—	—	
0.25	0.63	0.58	0.54	0.50	0.47	0.45	0.43	0.41	0.39	0.38	0.30	—	—	—	—	
0.30	0.75	0.70	0.64	0.60	0.57	0.54	0.51	0.49	0.47	0.46	0.36	—	—	—	—	
0.35	0.88	0.81	0.75	0.70	0.66	0.63	0.60	0.57	0.55	0.53	0.42	—	—	0.39	0.35	
0.40	1.00	0.93	0.86	0.80	0.76	0.72	0.68	0.66	0.63	0.61	0.48	—	—	0.44	0.40	
0.45		1.04	0.96	0.90	0.85	0.81	0.77	0.74	0.71	0.68	0.54	0.77	0.54	0.50	0.45	
0.50		1.16	1.07	1.01	0.95	0.90	0.86	0.82	0.79	0.76	0.60	0.85	0.60	0.55	0.50	
0.55			1.18	1.11	1.04	0.98	0.94	0.90	0.86	0.84	0.66	0.94	0.66	0.61	0.55	
0.60				1.21	1.13	1.07	1.03	0.98	0.94	0.91	0.72	1.02	0.72	0.65	0.60	
0.65				1.31	1.23	1.16	1.11	1.07	1.02	0.99	0.78	1.11	0.78	0.72	0.65	
0.70					1.32	1.25	1.20	1.15	1.10	1.06	0.84	1.19	0.84	0.77	0.70	
0.75						1.34	1.28	1.23	1.18	1.14	0.90	1.28	0.90	0.83	0.75	
0.80						1.43	1.37	1.31	1.26	1.22	0.96	1.36	0.96	0.88	0.80	
0.85							1.52	1.45	1.39	1.33	1.29	1.02	1.45	1.02	0.94	0.85
0.90								1.54	1.48	1.41	1.37	1.08	1.53	1.08	0.99	0.90
0.95									1.56	1.49	1.44	1.14	1.62	1.14	1.05	0.95
1.00									1.64	1.57	1.52	1.20	1.70	1.20	1.10	1.00
1.05										1.65	1.60	1.26	1.79	1.26	1.16	1.05

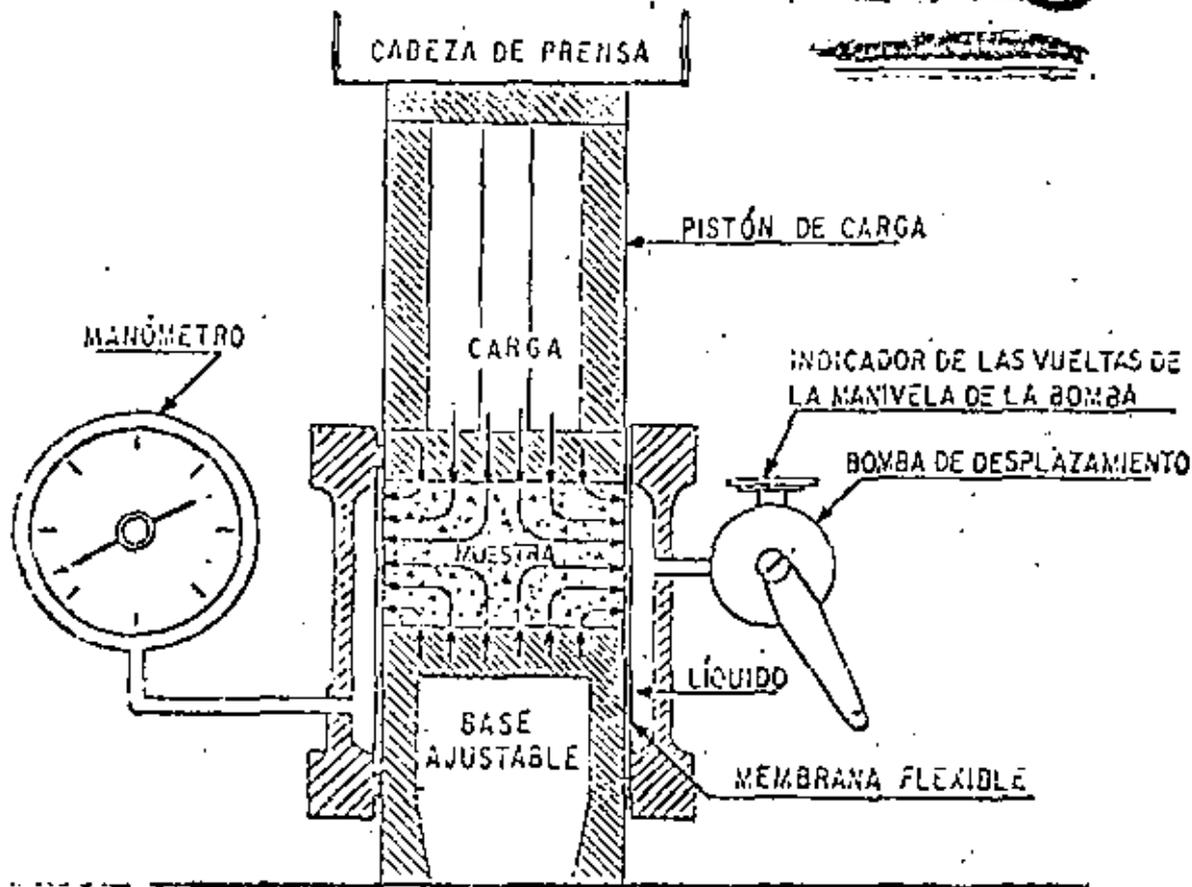
## Notes:

I BTB is bituminous-treated base.

II LTB is lime-treated base.

 III For the design of road-mixed asphalt surfacing, use 0.8 of the gravel equivalent factors ( $G_f$ ) shown above the asphalt concrete

# ESTABILÓMETRO



$$R = \left( 1 - \frac{P_h}{P_v} \right) 100$$

$$T = K \frac{P \sqrt{A} \text{Log} r}{\sqrt{c}} \left( \frac{P_h}{P_v} \geq 0.1 \right)$$

En donde:

T = espesor del pavimento

k = constante (0.0175)

P = presión de inflado de las llantas

A = área de contacto

r = número de repeticiones de esfuerzos

c = Valor del cohesiómetro.

$P_h$  = presión horizontal transmitida

$P_v$  = presión vertical aplicada (160 psi)

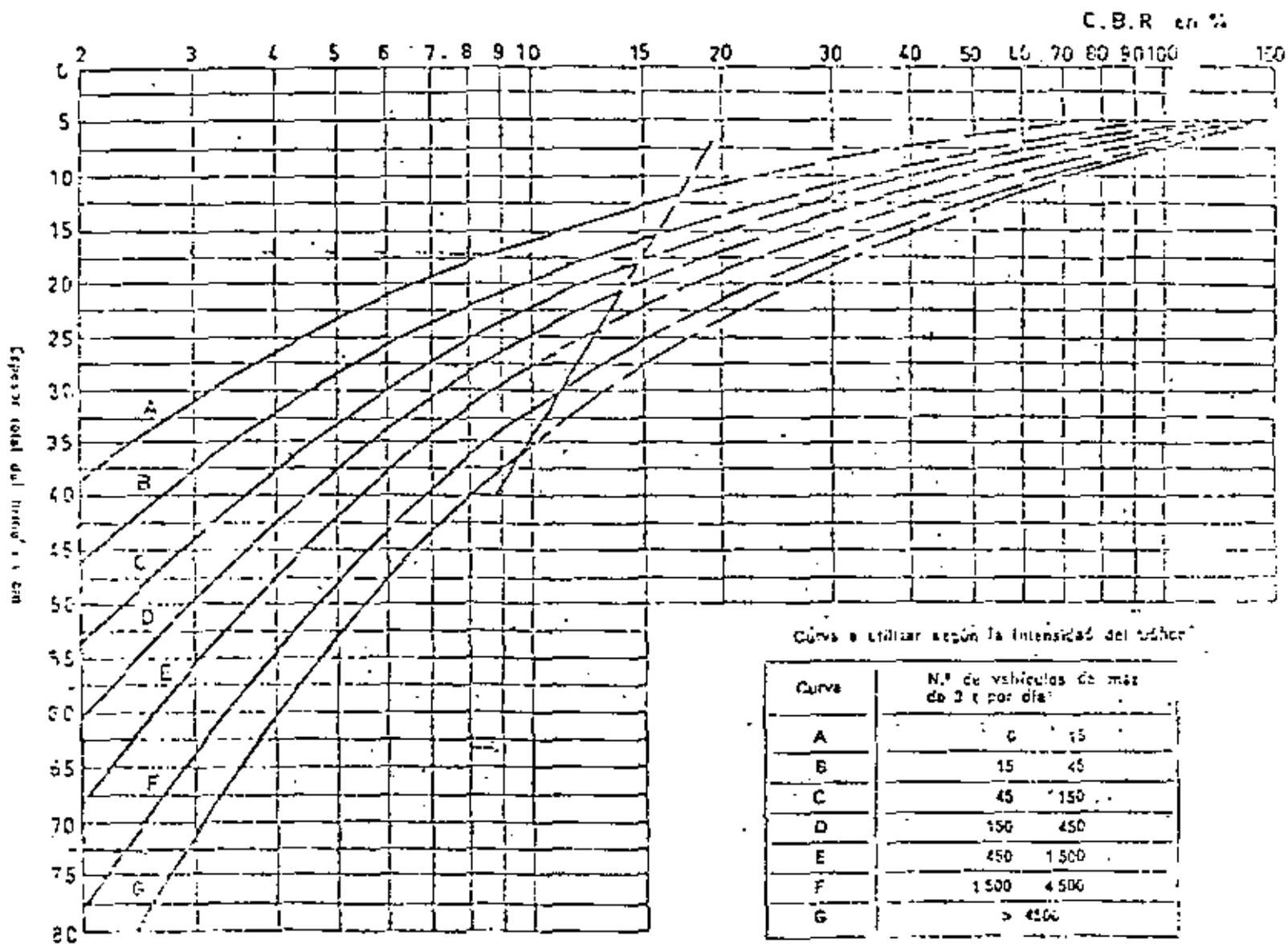


FIG. 12. Abaco del Fed. Road Research Laboratory.

212

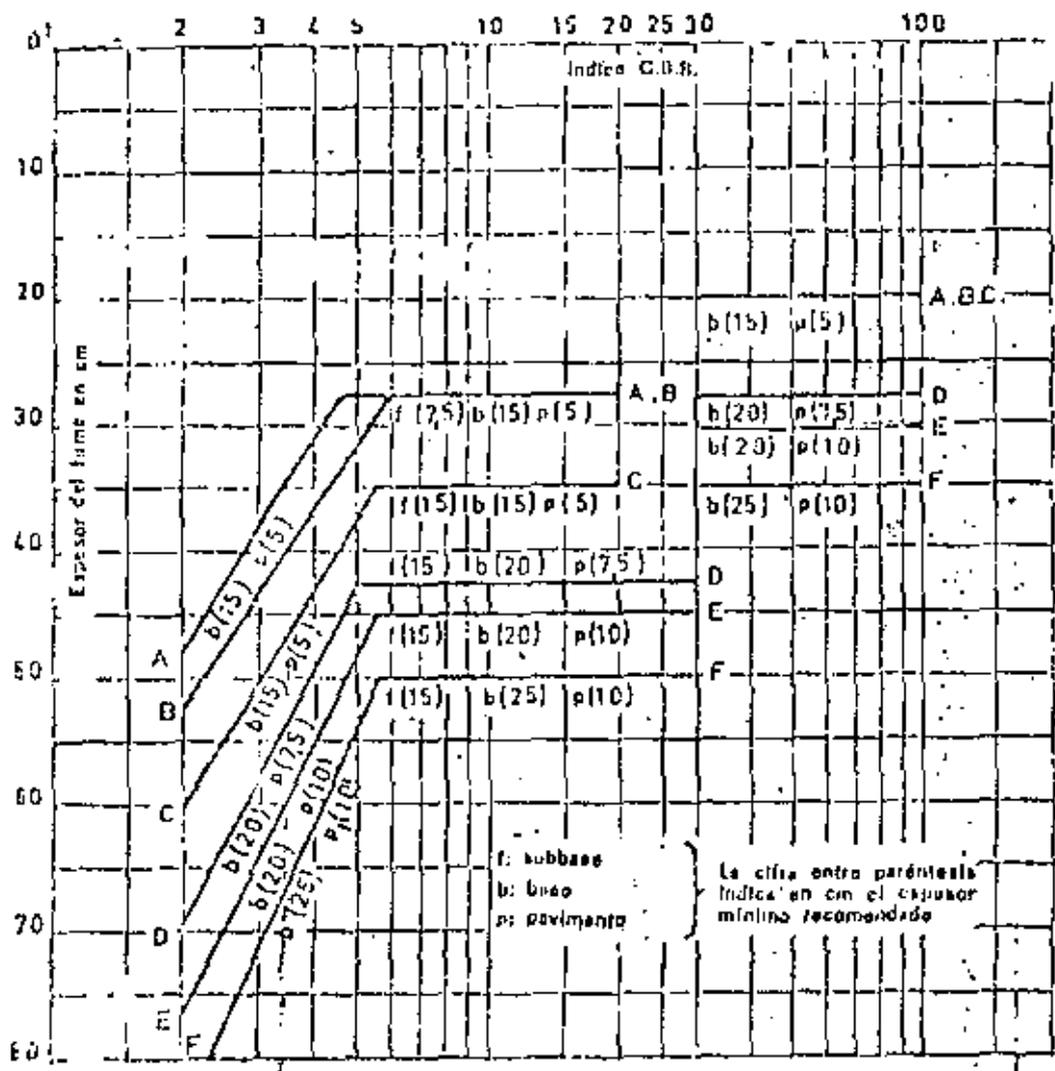
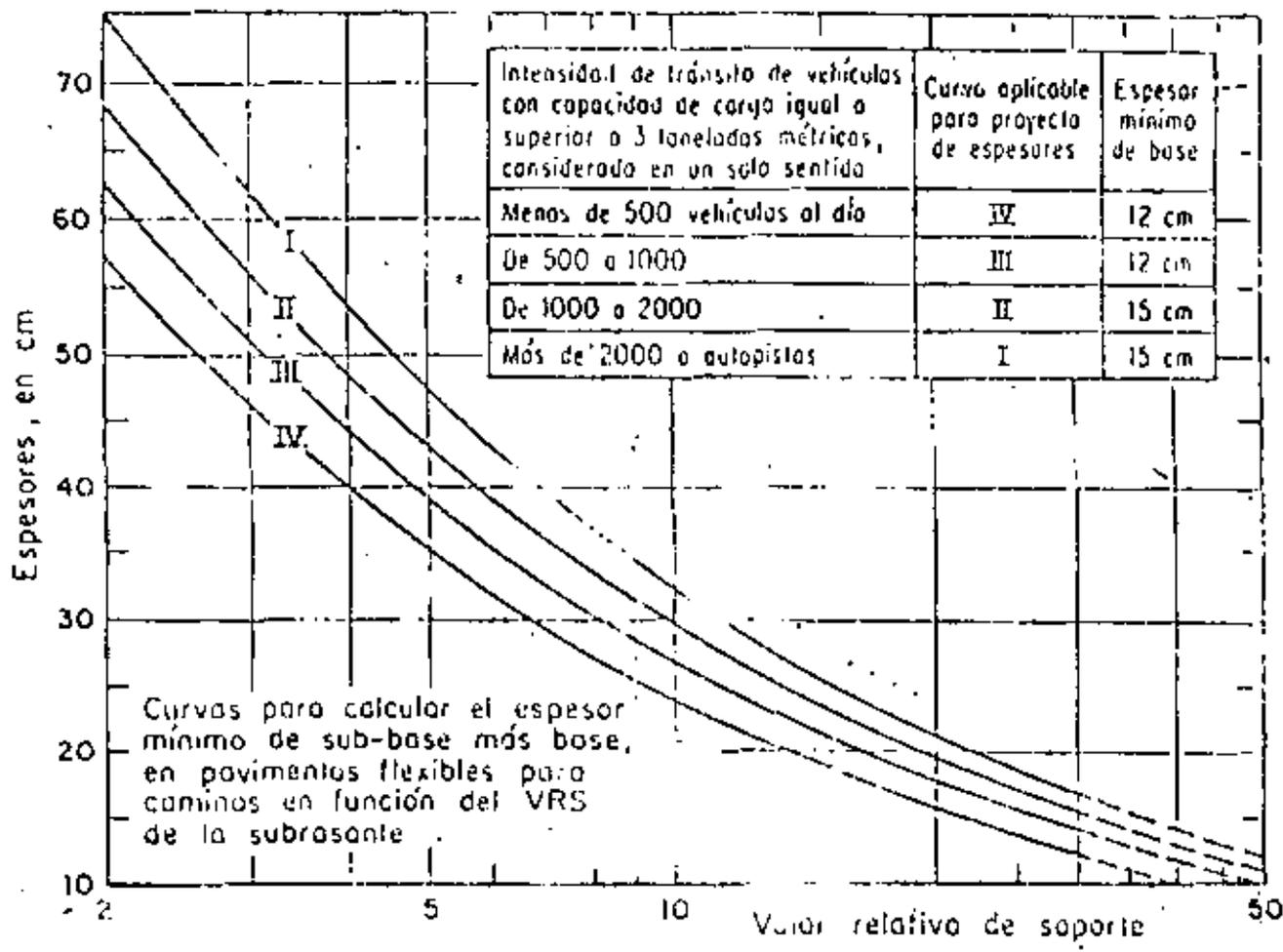


FIG. 40. Abaco del Road Research Laboratory. (R. N. 29, 1965).



Prueba 108-13, SCOP-1957

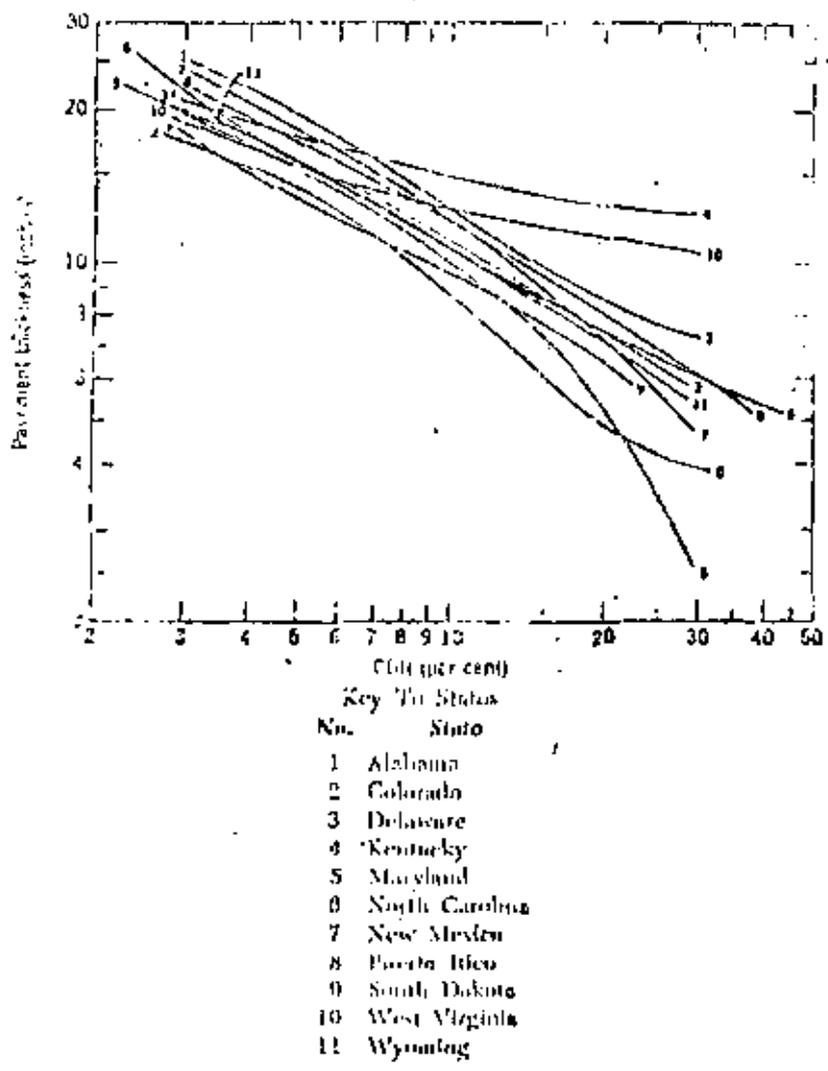


Figure 15.20. California Bending Tests curves for various states (2000-pound wheel including modifications suitable to WASHO test road conditions) (from Highway Research Board Bulletin 153.)

TABLE 13.10. Current State Highway Practices\*

1. Use AASHTO Interim Guide		6. Factors Considered in Regional Factor	
No direct use	16 <sup>b</sup>	Topography	5
Used to modify design only	7	Similarity to road test location	5
Used directly	32	Rainfall	13
Research in progress	3	Frost penetration	5
2. Use AASHTO Equivalency Factors		Temperature	5
Use directly	31	Ground water table	2
BPR modified factors	4	Subgrade type	4
Do not use AASHTO	17	Engineering judgment	13
3. Wheel Load Used for Design		Type of facility	3
18-kip axle	38	Subsurface drainage	5
5-kip wheel	8	7. Consideration of Frost Penetration	
Other	4	Regional factor	7
None	2	Use granular material	22
4. Methods for Subgrade Evaluation		Not considered	12
CBR	19	Not a problem	11
R value	10	8. Thickness of NFS Material	
Triaxial	5	Percentage of frost depth	11
Group Index	9	Standard thickness	2
Other soil classifications	4	USACI procedure	4
Pedologic classification	1	Experience	7
Frost index	1	9. Use AASHTO Structural Layer Coeff.	
Standard section	1	Use AASHTO guide	8
Experience	4	Use modification to guide	20
5. Use Regional Factor from AASHTO Guide		Use guides (not for design)	6
Used from guides	14	Do not use	18
Used modified guides approach	18	10. Vary Structural Coefficient with Pavement Position	
Other sources	6	Vary struct. coeff.	13
Regional factor not used	14	Do not vary	30
		Concept not used	9

\* Results summarized from NCHRP 120.

<sup>b</sup> Number of states (including D.C. and Puerto Rico).









centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS

EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO DE PAVIMENTOS

ING. LUIS MIGUEL AGUIRRE MENCHACA

JULIO, 1979.



Entre estos dispositivos se pueden señalar los rugómetros desarrollados por la Oficina de Carreteras Públicas, y Departamento de Carreteras de California, fotografía (1); el perfilómetro UNLOS, fotografía (2) desarrollado en la Prueba USRD y el perfilógrafo del Departamento de Carreteras de California, fotografía (3).

El primero determina un índice de rugosidad, en pulgadas por milla. Con el segundo se obtiene una medida del perfil del pavimento, expresada en términos del cambio del ángulo de dos líneas de referencia y el mismo proporciona un índice de perfil, expresado en pulgadas por milla.

El perfilógrafo transversal es otro dispositivo que permite obtener información sobre las deflexiones del pavimento en una sección transversal, fotografía (4).

Se llevan a cabo investigaciones del verdadero perfil del pavimento, en correlación con algunas de las debilidades que ocurren para obtener conclusiones de índice de servicio. También se investiga en aspectos de requisitos de operación y seguridad de las aeronaves. La Dirección General de Aeropuertos de la S.G.P., realiza estudios de este tipo en los aeropuertos del país.

#### Evaluación Mecánica.

##### 1. Ensayos de las condiciones que exhibe un pavimento.

Este aspecto es tan antiguo como la utilización misma de los caminos y constituye en sí la primera forma de investigación, que permitió la acumulación de la experiencia, a través de la observación del comportamiento del pavimento bajo diferentes situaciones. El examen y análisis de las condiciones que exhibe un pavimento proporciona la información necesaria para valorar el papel que desempeña cada elemento que lo constituye, en el comportamiento integral del pavimento, constituyendo una de las herramientas básicas en el conocimiento de la ingeniería de los pavimentos.

Los pavimentos fracasan a menudo debido a una combinación de varias razones, en ocasiones difíciles de determinar, siendo por lo tanto necesario que las inspecciones del estado del pavimento se realicen por personal experimentado, para conocer la causa o causas del fracaso. Al respecto es indispensable conocer los tipos y causas de falla en los pavimentos.

Las inspecciones se realizan con mayor detalle que el requerido para la calificación de un trazo, e incluyen un registro de la ubicación, magnitud y tipo de los deterioros observados, así como tipo y condiciones de los trabajos de mantenimiento.

Para el efecto, existen varias formas usadas para reportar la información recabada en el campo, incluyendo en la actualidad el empleo de tarjetas perforadas, en las que pueden anotarse los datos de construcción. Se está haciendo uso además de fotografías y películas, desde distintos puntos de una sección en movimiento.

##### 2. Pruebas no destructivas.

Es muy deseable poder efectuar una evaluación de la capacidad estructural de los elementos constituyentes de un pavimento, sin alterarlos o destruirlos. De esta manera, las mediciones se realizan en la superficie del pavimento y los resultados se relacionan a las propiedades estructurales de los materiales de las capas inferiores.

Generalmente se mide la respuesta de la estructura del pavimento a la aplicación de una fuerza o energía externa, y punto que no se altera la temperatura del pavimento, las pruebas pueden repetirse varias veces en el mismo sitio.

Se clasifican las pruebas de este tipo en tres categorías principales.

1. Mediciones de respuestas bajo cargas estáticas o móviles, aplicadas a baja velocidad.
2. Mediciones de respuestas a la aplicación de una carga repetidas.
3. Mediciones de respuesta de una masa a una fuente controlada de energía nuclear.

La respuesta a la aplicación de una carga sencilla se obtiene midiendo la deflexión producida en la superficie del pavimento. El dispositivo generalmente usado es la Viga Benkelman, perfilador portátil desarrollado en el Trazo de Prueba WASHO, que determina deflexiones de milésimas de pulgada, fotografía 5. Los resultados de un estudio efectuado en California indican que cuando las deflexiones de la superficie de un pavimento flexible exceden de un cierto valor, ese pavimento generalmente muestra signos de deterioro. La comparación de las deflexiones medidas con un valor de deflexión crítica proporciona un medio de programar el mantenimiento de los pavimentos flexibles. Por otra parte, los estudios realizados en el Trazo de Prueba WASHO indican que en el caso de pavimentos flexibles, existe una relación entre las deflexiones producidas y su comportamiento, por lo que este método puede utilizarse como un medio de evaluar el comportamiento de un pavimento. Puede señalarse que la Viga Benkelman es un instrumento sencillo de operar, pero existen variables como la temperatura del pavimento y el radio de curvatura de la deflexión producida, que requieren ser tomadas muy en cuenta en la interpretación de los resultados. En pavimentos de aeropuertos se ha usado este método utilizando la aeronave de diseño para aplicar la carga, figura 6.

Varias agencias emplean las pruebas de placa para obtener deflexiones en el pavimento bajo la acción de cargas estáticas y repetidas. La Federal Road Cement Association ha desarrollado, por ejemplo, un método para determinar el valor del módulo de reacción de la subbase en pavimentos rígidos, aplicando una carga al pavimento y midiendo las deformaciones unitarias y deflexiones ocasionadas por la misma.

Pruebas de este tipo han sido controladas para su aplicación en la evaluación de pavimentos de aeropuertos, ciudades entre otros, las desarrolladas por el Departamento del Transporte de Calif.

#### 1.4 Evaluación de Pavimentos.

Con anterioridad a la ejecución del Tramo de Prueba AASHO, se prestaba poca atención a la evaluación de un pavimento; simplemente el pavimento era bueno o requería una reparación.

El conocimiento de las condiciones en que se encuentran un pavimento, es un aspecto que en la actualidad interesa sobremanera a los ingenieros y personal encargado de su diseño y conservación.

El estudio en forma superficial, a los usuarios, transiente e inconscientemente, el usuario califica las condiciones en que se encuentra un pavimento cada vez que conduce un automóvil o durante el trayecto de una aeronave en una operación de aterrizaje o despegue.

Con varias las razones que motivan el estudiar y conocer las condiciones en que se encuentra un pavimento, pudiendo señalarse entre otras, las siguientes:

1. Al ingeniero que ha realizado el proyecto de un pavimento, le ayuda a determinar el grado de éxito alcanzado por su proyecto, al cumplir con los criterios de diseño y, en su caso, le ayuda a comprender las causas de su fracaso.
2. Sirve para efectuar la planeación de un programa óptimo de mantenimiento y establecer la necesidad de realizar trabajos de conservación más importantes, reconstrucción y de rehabilitación del camino.
3. Permite realizar un pronóstico de la vida útil del pavimento.
4. Ayuda a determinar la capacidad del pavimento para soportar un volumen de tránsito, permitiendo así mismo, efectuar la actualización del pavimento, acorde con las futuras necesidades del tránsito.
5. Sirve para determinar el refuerzo que un pavimento deteriorado requiere para funcionar adecuadamente.
6. Constituye una base para el establecimiento de nuevos conceptos, importantes en el diseño de pavimentos.

Los estudios efectuados para la evaluación de un pavimento pueden clasificarse en dos grupos:

1. Estudios del comportamiento funcional, desde el punto de vista de su operación y servicio.
2. Evaluación mecanicista, desde el punto de vista de su capacidad estructural.

Los primeros proporcionan un juicio para valorar el grado en que un pavimento es adecuado para su transitabilidad. Los segundos permiten efectuar la evaluación estructural del pavimento, proporcionando la información suficiente para poder diseñar el refuerzo que en su caso llegara a requerir.

#### Estudios de Comportamiento-Servicio.

Comprenden estudios de evaluación de las condiciones superficiales que guarda un pavimento, estableciendo una apreciación de su capacidad para prestar servicio desde el punto de vista de su transitabilidad. La evaluación de esta cualidad

es un problema complejo en el que intervienen tres elementos interrelacionados entre sí: el usuario, el vehículo y la rugosidad del pavimento, aunque difieren por este último, como las interrelaciones en la superficie de un pavimento que influyen en la calidad del rodamiento.

Los estudios a realizar son los siguientes:

1. La apreciación subjetiva de la transitabilidad del pavimento, efectuada mientras se conduce un vehículo a una velocidad normal.
2. La medición de la rugosidad del pavimento.
3. Valoración de los deterioros superficiales, mostrando la ubicación y extensión de los aspectos observados.

Los ingenieros de la prueba AASHO desarrollaron un método para la apreciación del estado superficial del pavimento, basado en el Concepto de Servicio Actual, de acuerdo con el cual, para un tramo específico de pavimento, el Servicio Actual es la capacidad que tiene, según la opinión del usuario, para proporcionar un tránsito suave y cómodo en condiciones normales de operación.

El método requiere que un grupo de cinco personas, como mínimo, efectúe un recorrido por el pavimento, previamente dividido en secciones. Sección debe exclusivamente en las condiciones superficiales del pavimento y en el hecho de que este deberá prestar servicio a un volumen de tránsito mezclado bajo cualquier condición de tiempo, las personas que integran el grupo, deberán emitir una calificación del pavimento, variable entre cero para muy malo y 5 para muy bueno.

Las bases en que se apoya este método son las siguientes:

1. Las carreteras se construyen para conveniencia y comodidad del usuario.
2. La opinión del usuario en torno a la forma en que se da servicio una carretera, es enteramente subjetiva.
3. Las características que pueden medirse en una carretera, analizadas y manejadas convenientemente, pueden relacionarse con la opinión subjetiva del usuario.
4. El servicio dado por una carretera puede interpretarse por el promedio de la evaluación efectuada por los usuarios de la misma.
5. El comportamiento de un pavimento puede anticiparse a partir de las observaciones periódicas del servicio desde el momento de su construcción hasta el momento que se desea.

De los resultados de la prueba AASHO se obtuvo que la rugosidad de un pavimento o su perfil, se encuentran estrechamente relacionados con la apreciación de su servicio y que el comportamiento del pavimento evaluado en esta forma, se encuentra correlacionado con ciertos factores de diseño.

Para la medición de la rugosidad o bien, de las irregularidades de la superficie del pavimento se han diseñado dispositivos que permiten la evaluación superficial en forma rápida y sencilla. Los valores obtenidos en esta forma, han sido correlacionados con las calificaciones obtenidas en la forma antes descrita, obteniéndose un valor índice o Índice de Servicio Actual.

ta que permite obtener el Valor Soporte de la Sub-base. Esta agencia ha establecido una correlación de este método con los resultados obtenidos con Viga Benkelman. Asimismo, puede citarse el Método de Número de Clasificación por Cargas (LCR), aplicado a la evaluación de pavimentos rígidos y flexibles de Aeropuertos (Fotografías 7 y 8 Cuidado Lastre con 110 ton y placa de 18"  $\phi$ ).

Instalando dispositivos especiales dentro de la estructura del pavimento ha sido posible medir las deflexiones producidas al paso de cargas repetidas en movimiento. Los citados dispositivos de esta naturaleza permanentemente en el pavimento, no estando aún aclarada la influencia, en los resultados obtenidos de un dispositivo que es diferente al medio que lo rodea.

En el trazo de prueba AASHO se realizaron mediciones de vibraciones producidas a pavimentos flexibles, al aplicar en la superficie una fuerza vertical alternante y midiendo posteriormente las deflexiones y la velocidad de propagación de las ondas. Las primeras proporcionan un valor de la rigidez elástica de la estructura total del pavimento, en tanto que la segunda puede proporcionar idea de la rigidez de las varias capas que lo integran. El Cuerpo de Ingenieros de E.U.A. ha empleado un equipo vibratorio para determinar el módulo de elasticidad del suelo bajo un pavimento, siguiendo el método desarrollado por la Compañía - - Saell en Holanda. A partir del valor del módulo obtenido y aplicando la teoría de la elasticidad puede determinarse la resistencia del pavimento.

En Texas se realizó un estudio utilizando un sistema de cargas dinámicas y midiendo las deflexiones en la superficie mediante geófonos aplicadas a la misma. Estas deflexiones fueron comparadas con las correspondientes a la Viga Benkelman, obteniéndose como resultado, la indicación de que puede establecerse una correlación entre ambos métodos. El equipo empleado es de tipo móvil y el tiempo requerido para la ejecución de las pruebas es bastante corto, lo que constituye factores favorables para su aplicación. En la fotografía 9 se presenta este equipo conocido comercialmente como Dynaflect, que la S.O.P. está empleando para estudios de evaluación de pavimentos.

En la época actual se han empleado pruebas nucleares para medir la densidad y humedad en los materiales de pavimentación y se ha extendido su uso a la determinación del contenido de asfalto y densidad de mezclas. En Michigan se han iniciado experimentos para adaptar el uso de estos dispositivos a la evaluación de los pavimentos, midiendo por ejemplo las variaciones de la densidad en el transcurso del tiempo.

Los métodos descritos proporcionan buena información sobre la capacidad estructural de los pavimentos y del suelo de cimentación, sin embargo, ninguno de ellos puede considerarse que proporcione una evaluación precisa de la resistencia de las

capas inferiores. Existe actualmente la tendencia a emplear métodos electrónicos y nucleares, que permiten obtener mayor precisión en la determinación de la capacidad estructural de los elementos que constituyen el pavimento.

2. Pruebas destructivas.

En ocasiones es necesario, observar directamente la estructura de un pavimento con el objeto de determinar dónde y porqué ocurrió una falla. En tales situaciones se requiere excavar una cava o una trinchera en el pavimento, destruyendo su estructura.

Las técnicas empleadas dependen del tipo de información requerida, llegando a requerir la obtención de muestras intactas de las diferentes capas.

La observación de las paredes del corte puede aclarar el mecanismo de falla y las pruebas ejecutadas en las muestras obtenidas proporcionarían información sobre la capacidad estructural del pavimento. La fotografía 10 ilustra una cava en el pavimento y la fotografía 11 una trinchera que permite apreciar las condiciones del pavimento.

Adicionalmente se requiere evaluar todas las variables que afectan el comportamiento del pavimento, antes de establecer una conclusión.

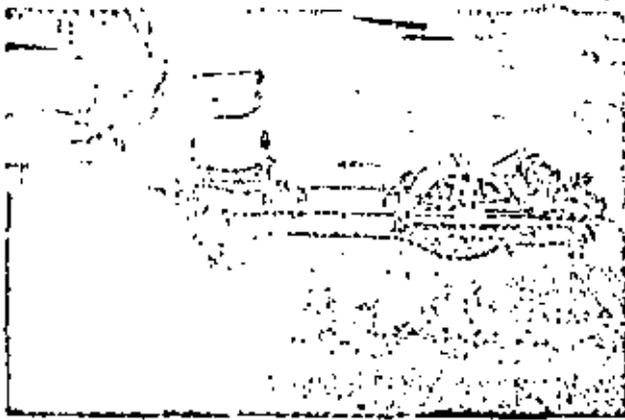
Actualmente se llevan a cabo estudios de evaluación tanto del tipo de comportamiento funcional, como mecánica. Los métodos de investigación mediante sistemas destructivos se emplean en casos muy especiales.

Investigación.- Algunos de los tópicos actualmente en investigación en este campo son los siguientes:

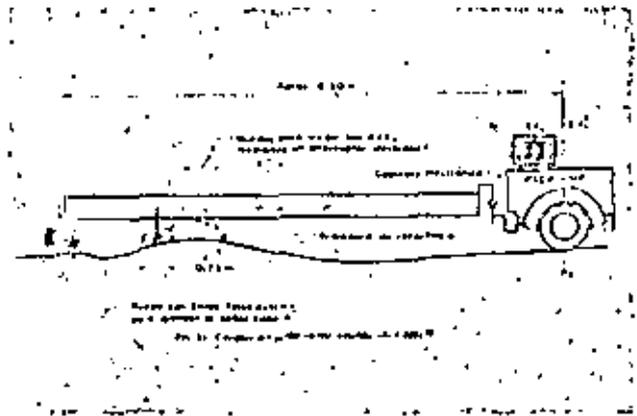
1. Desarrollar métodos de evaluación más rápidos y confiables.
2. Establecer técnicas de control de acabados superficial durante la construcción.
3. Mejorar el concepto de índice de servicio.
4. Aumentar el conocimiento acerca de las propiedades mecánicas de los pavimentos y de sus componentes por métodos no destructivos.

Debe mencionarse que los métodos de evaluación antes descritos, aunque en gran parte han sido desarrollados por técnicas extranjeras, constituyen en la actualidad métodos cada vez más fáciles de aplicar en los Ingenieros de nuestro País, observándose una franca tendencia a utilizarlos cada vez más en el estudio de nuevas carreteras y autopistas.

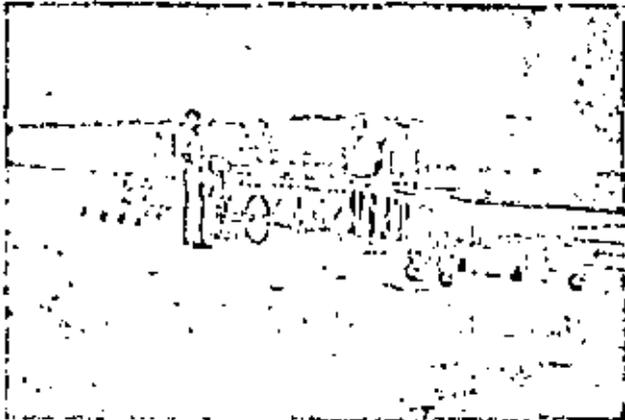
Inq. Manuel Zárate Ayuno.



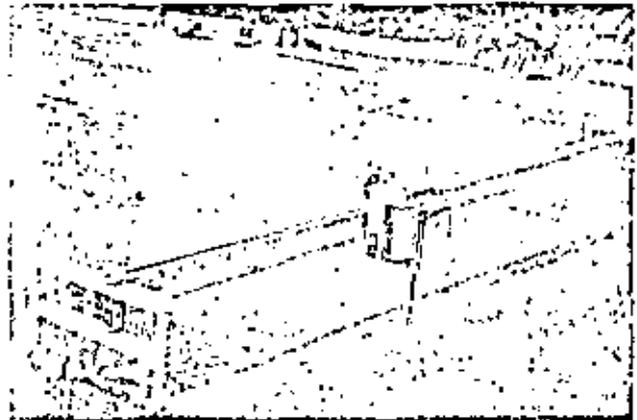
FOTOGRAFIA Nº 1



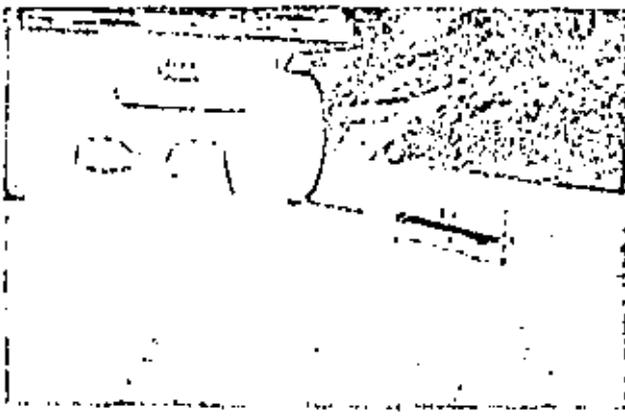
FOTOGRAFIA Nº 2



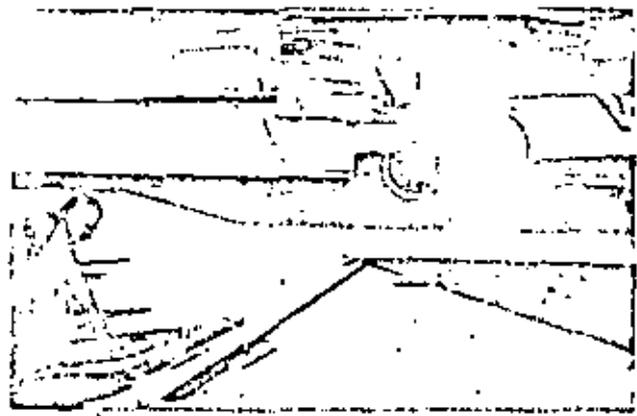
FOTOGRAFIA Nº 3



FOTOGRAFIA Nº 4



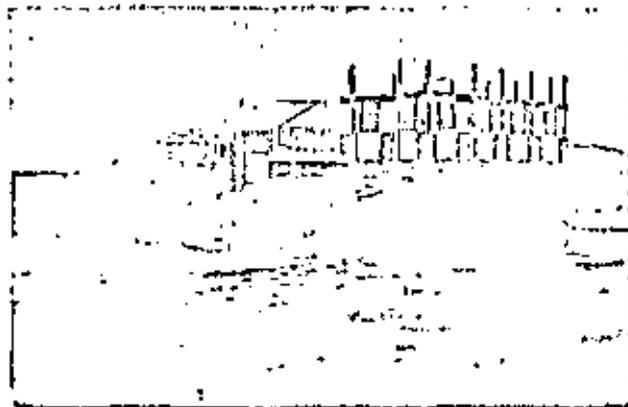
FOTOGRAFIA Nº 5



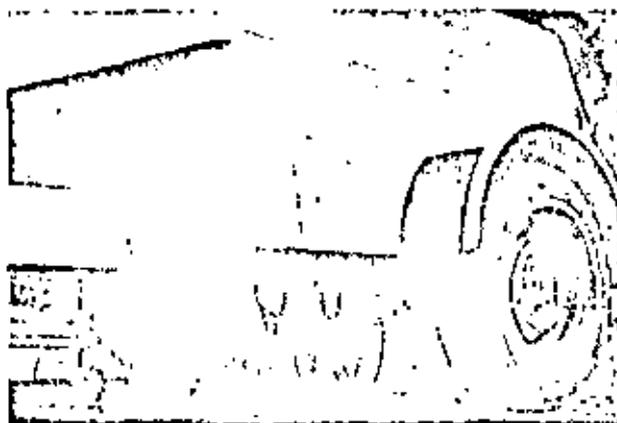
FOTOGRAFIA Nº 6



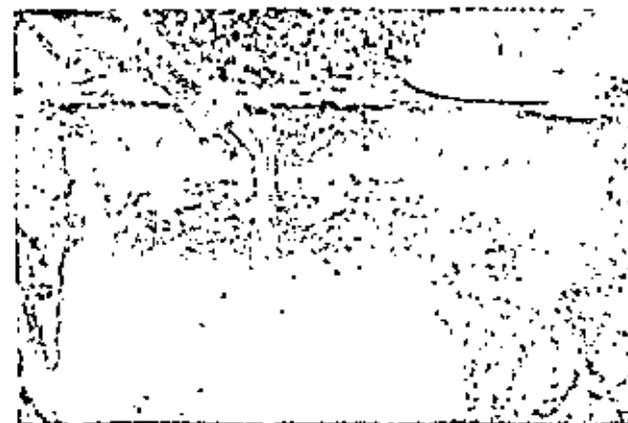
FOTOGRAFIA Nº 7



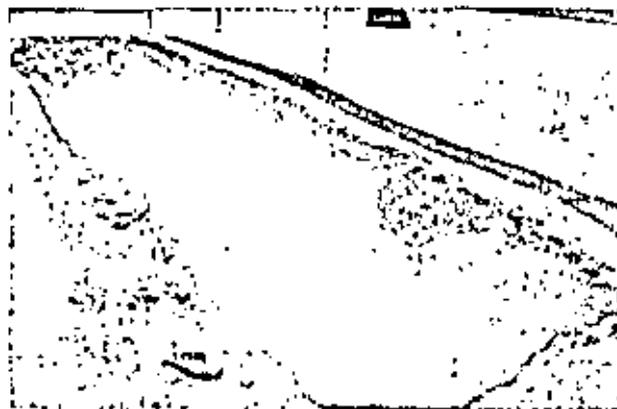
FOTOGRAFIA Nº 8



FOTOGRAFIA Nº 9



FOTOGRAFIA Nº 10



FOTOGRAFIA Nº 11





centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de Ingeniería, unam



DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS

TALLER DE DISEÑO  
PAVIMENTOS FLEXIBLES

ING. MIGUEL QUINTERO, NARES.

JULIO, 1979.



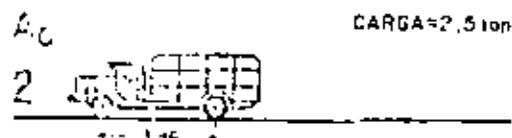
NOTA  
 K<sub>1</sub> = Coeficiente de deterioración para el vehículo vacío  
 K<sub>2</sub> = Coeficiente de deterioración para el vehículo cargado



1	1.0	0.8	2.0
2	1.0	0.8	2.0
3			
Σ	2.0	1.6	

0.0021	0.0021	0.0021	0.0021
0.0021	0.0021	0.0021	0.0021
Σ	0.0042	0.0042	0.0042

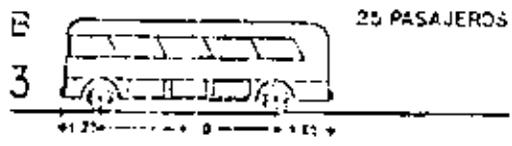
0.0021	0.0021	0.0021	0.0021
0.0021	0.0021	0.0021	0.0021
Σ	0.0042	0.0042	0.0042



1	1.6	1.2	4.2
2	3.2	1.2	4.2
3			
Σ	4.8	2.4	

0.17	0.062	0.062	0.062
0.17	0.062	0.062	0.062
Σ	0.34	0.124	0.124

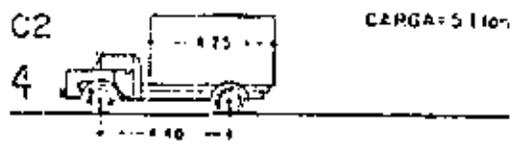
0.17	0.062	0.062	0.062
0.17	0.062	0.062	0.062
Σ	0.34	0.124	0.124



1	4.2	3.0	5.8
2	8.4	3.0	5.8
3			
Σ	12.6	6.0	

1.0	0.151	0.098	0.156
1.0	0.151	0.098	0.156
Σ	2.0	0.302	0.312

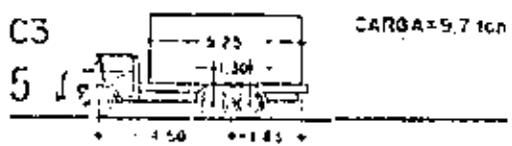
1.0	0.041	0.015	0.017
1.0	0.041	0.015	0.017
Σ	2.0	0.082	0.034



1	2.5	1.5	5.0
2	6.2	2.7	5.0
3			
Σ	8.7	4.2	

0.44	0.025	0.018	0.002
0.44	0.025	0.018	0.002
Σ	0.88	0.045	0.004

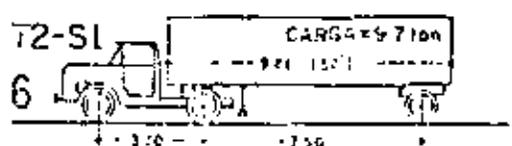
0.44	0.002	0.000	0.000
0.44	0.002	0.000	0.000
Σ	0.88	0.002	0.000



1	2.5	1.7	5.0
2	14.0	5.2	5.0
3			
Σ	16.5	6.9	

0.44	0.025	0.018	0.003
0.44	0.025	0.018	0.003
Σ	0.88	0.045	0.006

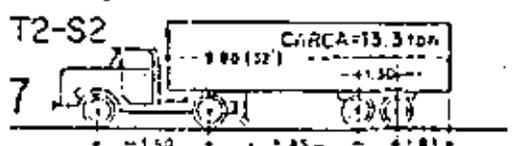
0.44	0.004	0.001	0.000
0.44	0.004	0.001	0.000
Σ	0.88	0.008	0.000



1	3.0	2.2	5.8
2	8.0	3.6	5.8
3	7.5	2.9	5.8
Σ	18.5	8.7	

1.0	0.040	0.015	0.007
1.0	0.040	0.015	0.007
1.0	0.040	0.015	0.007
Σ	3.0	0.120	0.021

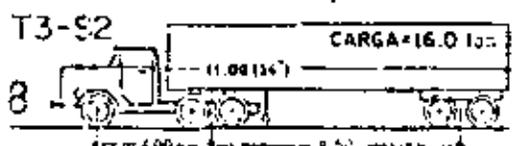
1.0	0.020	0.006	0.002
1.0	0.020	0.006	0.002
1.0	0.020	0.006	0.002
Σ	3.0	0.060	0.006



1	4.0	3.5	5.8
2	8.5	4.0	5.8
3	12.1	3.8	5.8
Σ	24.6	11.3	

1.0	0.120	0.006	0.010
1.0	0.120	0.006	0.010
2.0	0.450	0.006	0.010
Σ	3.0	0.300	0.030

1.0	0.000	0.010	0.010
1.0	0.120	0.000	0.010
2.0	0.110	0.002	0.010
Σ	4.0	0.230	0.030

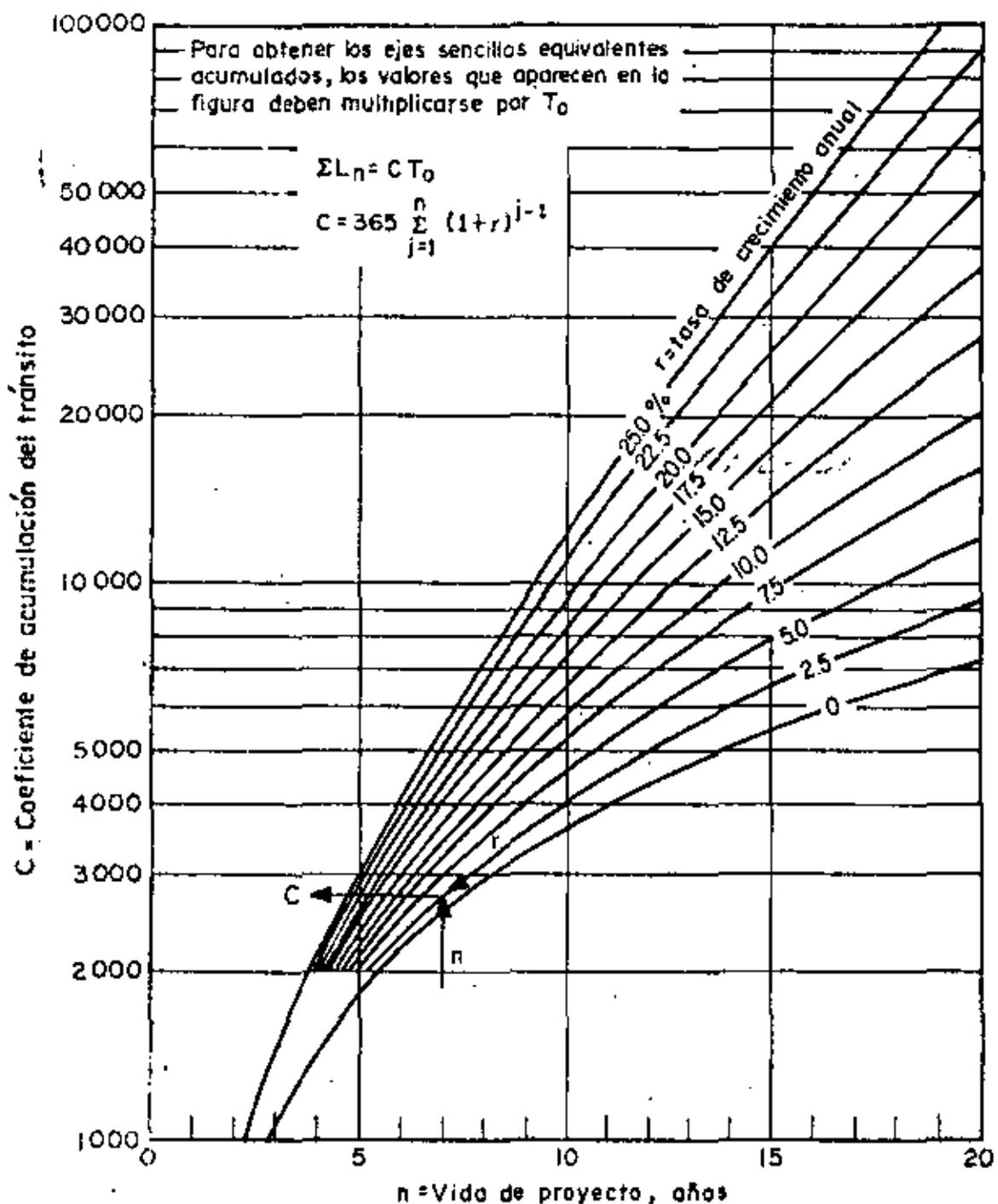


1	1.5	3.5	5.8
2	13.0	5.4	5.8
3	13.0	5.0	5.8
Σ	27.5	13.9	

1.0	0.200	0.050	0.025
3.0	0.600	0.050	0.050
3.0	0.600	0.050	0.050
Σ	6.0	1.300	0.125

1.0	0.000	0.010	0.020
2.0	0.010	0.010	0.010
2.0	0.010	0.010	0.010
Σ	5.0	0.020	0.040

Fig.2. Coeficientes de daño por tránsito para vehículos típicos de la red Nacional



$\Sigma L_n$  tránsito acumulado al cabo de n años de servicio, ejes equivalentes de 8.2 ton

C coeficiente de acumulación del tránsito, para n años de servicio y una tasa de crecimiento anual r

$T_0$  tránsito medio diario por carril en el primer año de servicio, ejes equivalentes de 8.2 ton

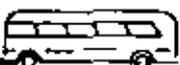
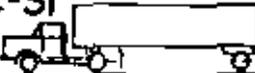
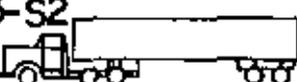
$$T_0 = \Sigma N_i F_i + \Sigma N_i' F_i'$$

$N_i, N_i'$  promedio diario por carril de vehículos tipo i (cargados o descargados, respectivamente), durante el primer año de servicio

$F_i, F_i'$  coeficiente de daño relativo producido por cada viaje del vehículo i (cargado o descargado, respectivamente), ejes equivalentes de 8.2 ton

FIG. 3.

Notas \_\_\_\_\_

TIPO DE VEHICULO	Número de vehículos en ambas direcciones	Coeficiente de distribución	Número de vehículos en el carril de proyecto	Coeficiente de vehículos cargados o vacíos	Número de vehículos cargados o vacíos por carril $N_1, N_2$	Coeficientes de daño por tránsito, $F_1, F_2$		Número de ejes equivalentes de 8.2 ton, $N_1 F_1, N_2 F_2$								
						z=0 cm	z=15 cm	z=0 cm	z=15 cm							
A <sub>p</sub> 				C=		0.005	0									
				V=		0.005	0									
A <sub>c</sub> 				C=		0.34	0.042									
				V=		0.34	0.001									
B 				C=		2.0	1.150									
				V=		2.0	0.640									
C2 				C=		0.88	0.465									
				V=		0.88	0.027									
C3 				C=		0.88	0.675									
				V=		0.88	0.044									
T2-S1 				C=		3.0	1.740									
				V=		3.0	0.140									
T2-S2 				C=		4.0	1.570									
				V=		4.0	0.210									
T3-S2 				C=		5.0	1.300									
				V=		5.0	0.150									
<table border="1"> <tr> <th>NUMERO DE CARRILES EN AMBAS DIRECCIONES</th> <th>COEFICIENTE DE DISTRIBUCION PARA EL CARRIL DE PROYECTO, %</th> </tr> <tr> <td>2</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>40 - 50</td> </tr> <tr> <td>6 o más</td> <td>30 - 40</td> </tr> </table>			NUMERO DE CARRILES EN AMBAS DIRECCIONES	COEFICIENTE DE DISTRIBUCION PARA EL CARRIL DE PROYECTO, %	2	50	4	40 - 50	6 o más	30 - 40	Total		$T_0, T'_0 =$ Tránsito equivalente inicial			
NUMERO DE CARRILES EN AMBAS DIRECCIONES	COEFICIENTE DE DISTRIBUCION PARA EL CARRIL DE PROYECTO, %															
2	50															
4	40 - 50															
6 o más	30 - 40															

Años de servicio,  $n =$  \_\_\_\_\_ Tasa de crecimiento anual,  $r =$  \_\_\_\_\_ %  
 Coeficiente de acumulación del tránsito,  $C =$  \_\_\_\_\_  
 Tránsito acumulado,  $\Sigma L_n = C T_0 =$  \_\_\_\_\_  $\Sigma L'_n = C T'_0 =$  \_\_\_\_\_

FIG. 4.

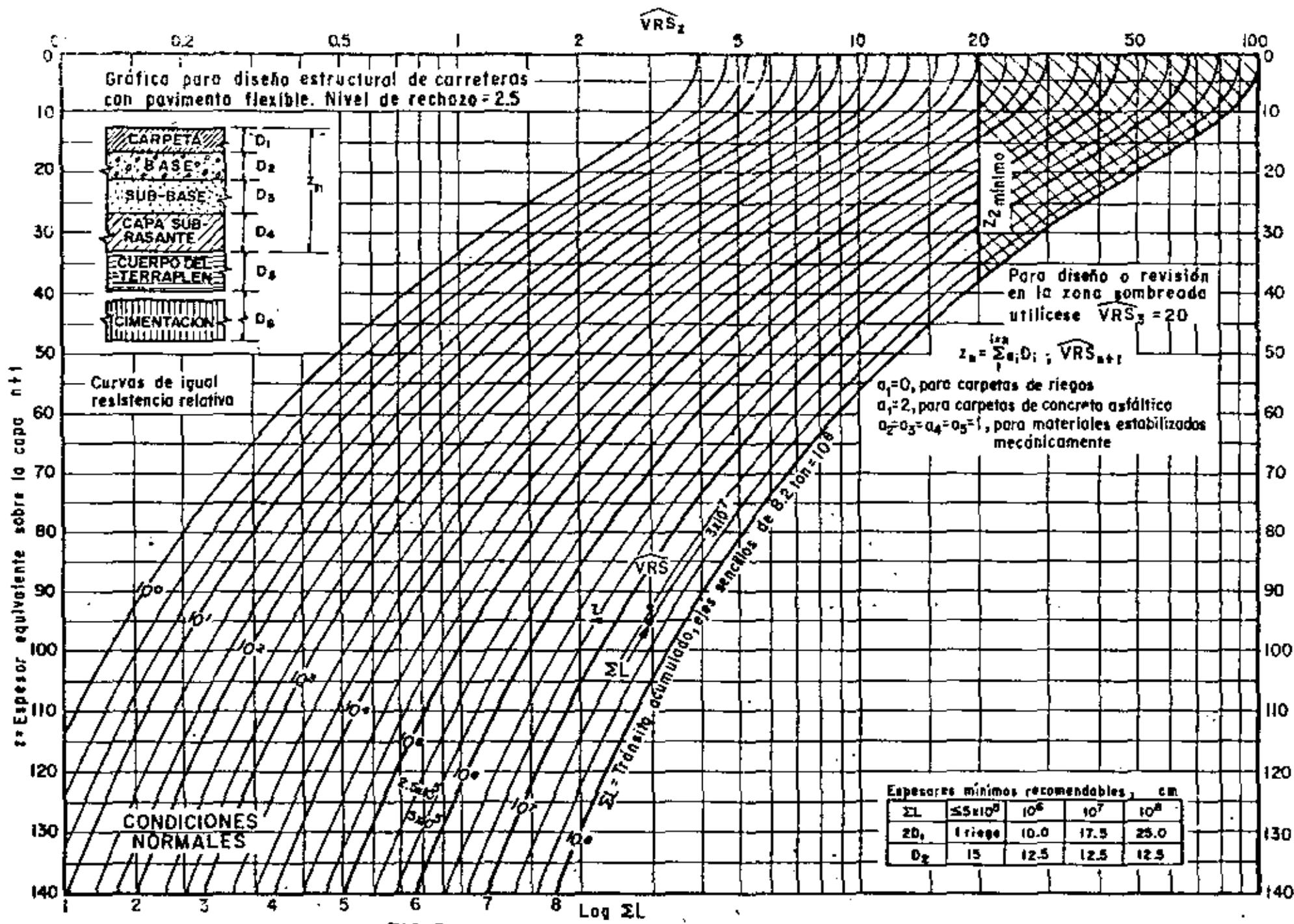


FIG. 5.

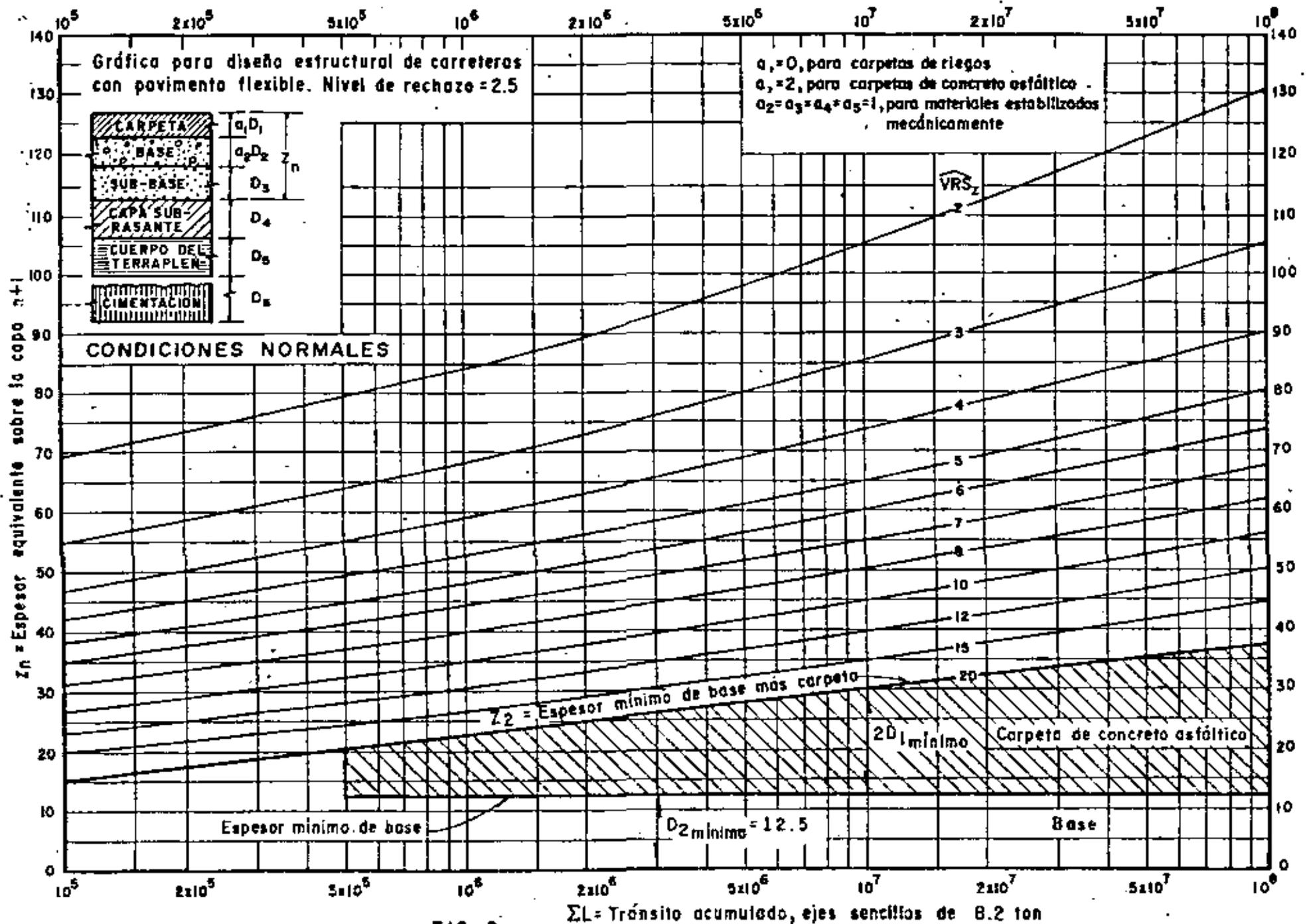


FIG. 6.

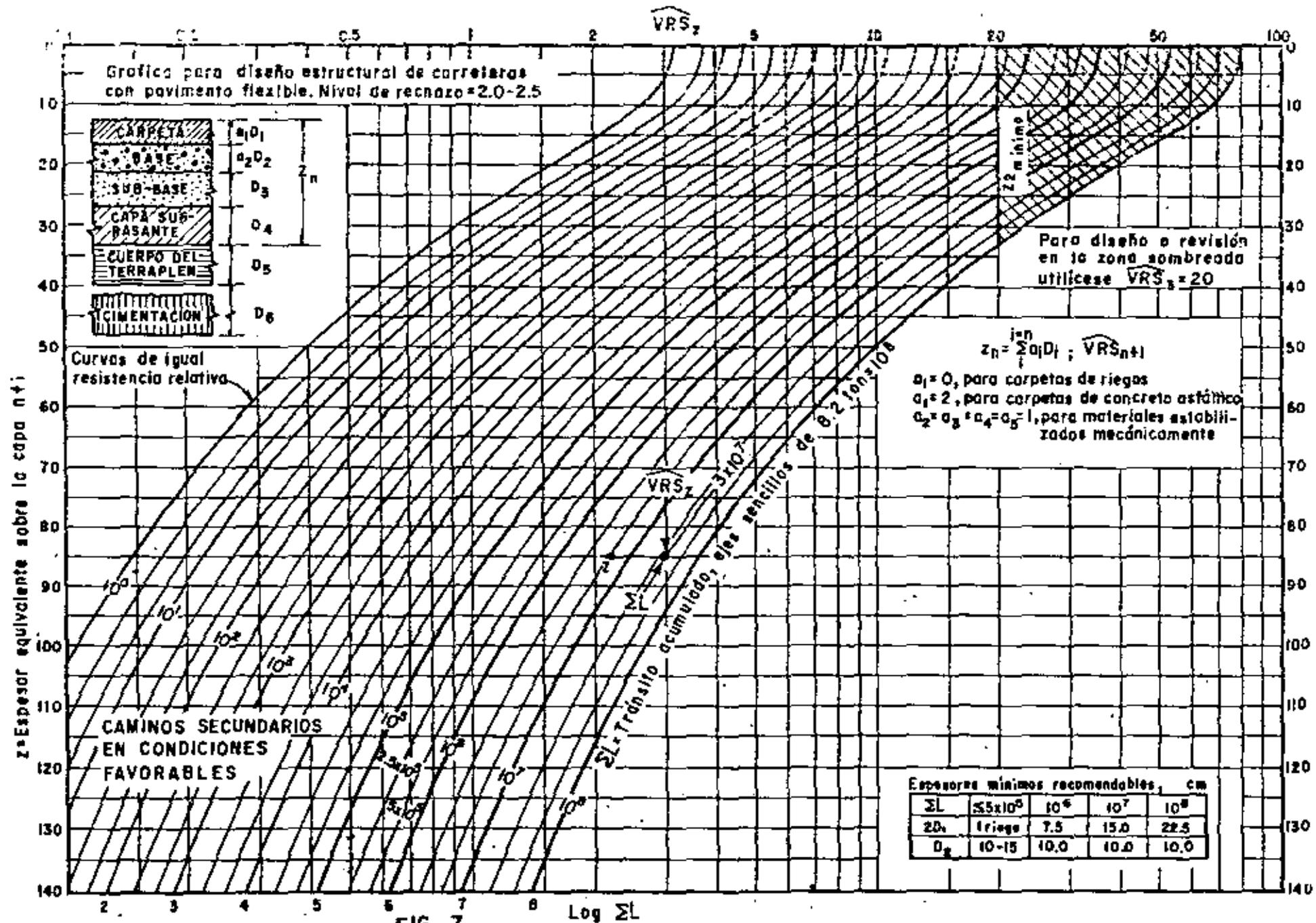


FIG. 7.

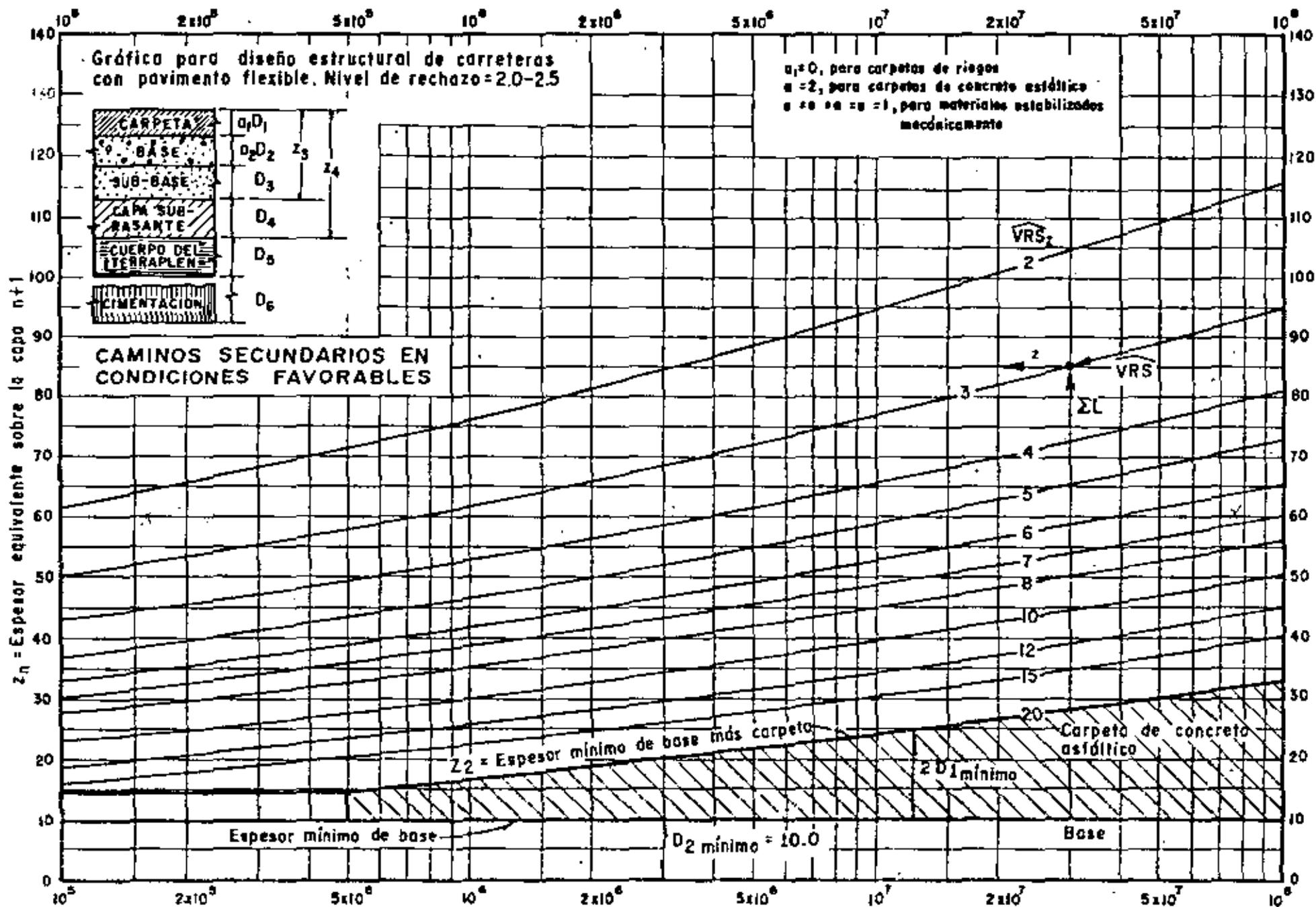


FIG. 8.

$\Sigma L$  = Transito acumulado, ejes sencillos de 8.2 ton

# TABLA N° 1

TIPO DE VEHICULO	Número de vehículos en ambas direcciones	Coeficiente de distribución	Número de vehículos en el carril de proyecto	Coeficiente de vehículos cargados o vacíos	Número de vehículos cargados o vacíos por carril $N_1, N_2$	Coeficientes de daño por tránsito, $F_1, F_2$		Número de ejes equivalentes de 8.2 ton, $N_1^e, N_2^e$	
						$Z=0$ cm	$Z=15$ cm	$Z=0$ cm	$Z=15$ cm
Automoviles	123.64	0.5	61.82	$C=1.00$	61.82	0.005	0	0.31	0
				$V=0.00$	0	0.005	0	0.31	0
Pick-up	52.44	0.5	26.22	$C=0.30$	7.87	0.34	0.042	2.68	0.33
				$V=0.70$	18.39	0.34	0.001	6.24	0.02
Autobuses	35.22	0.5	17.61	$C=1.00$	17.61	2.0	1.150	35.22	20.22
				$V=0.00$	0	2.0	0.640	0	0
C2	99.90	0.5	49.95	$C=0.63$	31.47	0.88	0.465	27.69	14.63
				$V=0.37$	18.48	0.88	0.027	16.26	0.439
C3	26.40	0.5	13.20	$C=0.79$	10.43	0.88	0.675	9.18	6.20
				$V=0.21$	2.77	0.88	0.044	2.44	0.12
T2-S1	9.18	0.5	4.59	$C=0.79$	3.63	3.0	1.740	10.89	6.31
				$V=0.21$	0.96	3.0	0.140	2.88	0.13
T2-S2	17.80	0.5	8.90	$C=0.78$	6.94	4.0	1.570	27.76	10.90
				$V=0.22$	1.96	4.0	0.210	7.76	0.41
T3-S2	18.38	0.5	9.19	$C=0.79$	7.26	5.0	1.300	36.30	9.44
				$V=0.21$	1.93	5.0	0.150	9.65	0.29
Total			191.48	$T_{0,0}^e =$ Tránsito equivalente inicial				195.57	69.47

Años de servicio,  $n = 9$  Tasa de crecimiento anual,  $r = 25\%$

Coeficiente de acumulación del tránsito  $C = 9200$

Tránsito acumulado,  $\sum L_n = C T_0 = 1799244$  ( $Z=0$ )  $\sum L_n = C T_0^e = 639124$  ( $Z=15$ )

Cálculo del tránsito equivalente acumulado

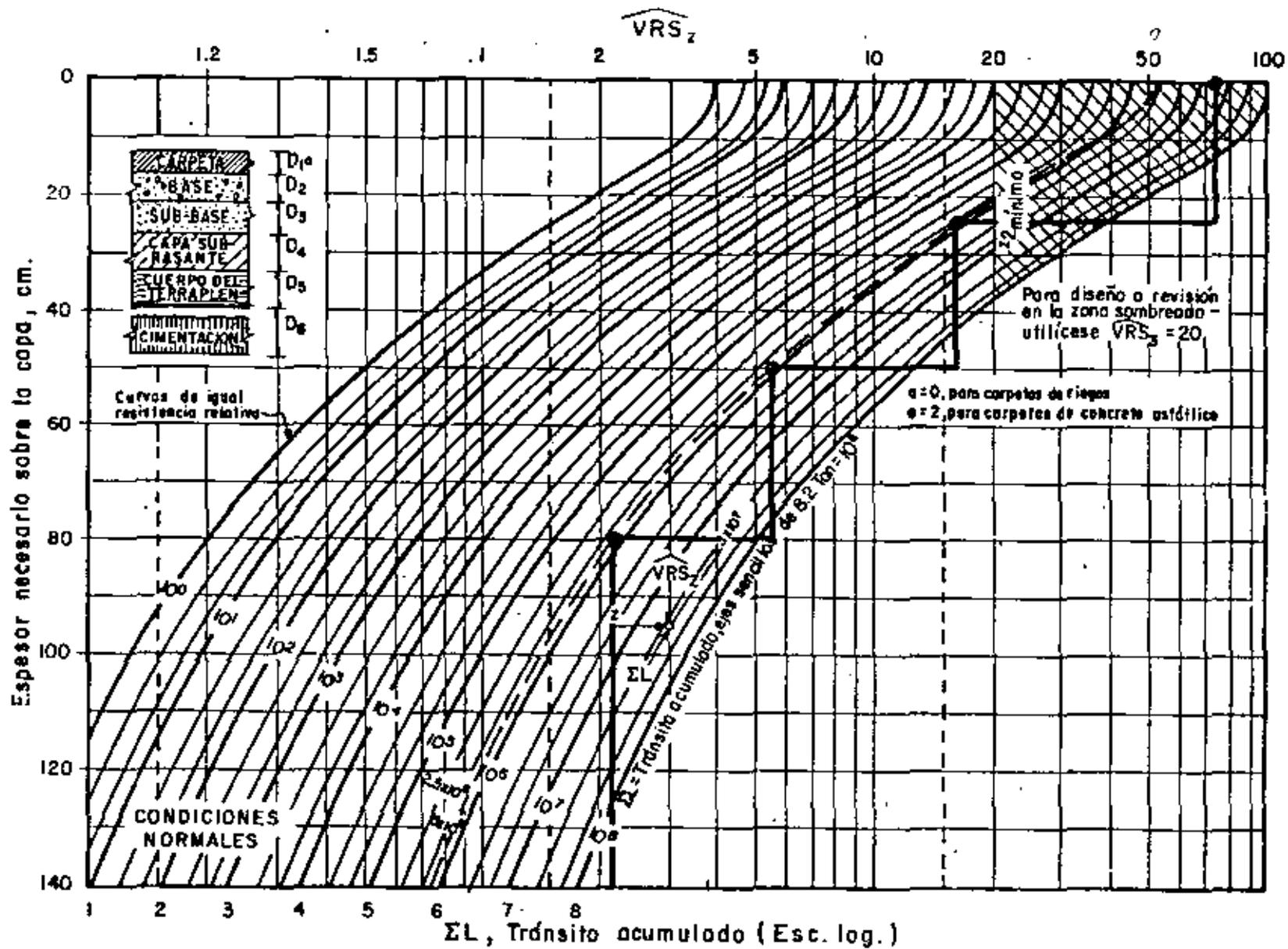


Figura 2

Gráfica de diseño de espesores de pavimentos en carreteras, según el Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M.

# TABLA N° 2

TIPO DE VEHICULO	Número de vehículos en ambas direcciones	Coeficiente de distribución	Número de vehículos en el carril de proyecto	Coeficiente de vehículos cargados o vacíos	Número de vehículos cargados o vacíos por carril $N_1, N_2$	Coeficientes de daño por tránsito, $F_1, F_2$		Número de ejes equivalentes de 8.2 ton, $N_1', N_2'$	
						Z=0 cm	Z=15 cm	Z=0 cm	Z=15 cm
Automoviles	8460	0.4	3384	C= 1.0	3384	0.005	0.000	16.9	0.0
				V= 0	0	—	—	—	—
Pick-up	2116	0.4	846	C= 1.0	846	0.34	0.042	287.6	35.5
				V= 0	0	—	—	—	—
Autobuses	684	0.4	274	C= 1.0	274	2.00	1.15	548.0	315.1
				V= 0	0	—	—	—	—
C2	734	0.4	294	C= 1.0	294	0.88	0.465	258.7	136.7
				V= 0	0	—	—	—	—
C3	116	0.4	46	C= 1.0	46	0.88	0.635	40.5	31.1
				V= 0	0	—	—	—	—
T2-S1	0	—	—	C= —	—	—	—	—	—
				V= —	—	—	—	—	—
T2-S2	28	0.4	11	C= 1.0	11	4.00	1.53	44.0	17.3
				V= 0	0	—	—	—	—
T3-S2	102	0.4	41	C= 1	41	5.00	1.30	205.0	53.3
				V= 0	0	—	—	—	—
Total			4896	$T_0, T'_0 =$ Tránsito equivalente inicial				1400.7	589.0

Años de servicio,  $n = 10$  Tasa de crecimiento anual,  $r = 7\%$

Coeficiente de acumulación del tránsito  $C = 5100$

Tránsito acumulado,  $\sum_{n=0}^n CT_0 = 1143570 (Z=0)$   $\sum_{n=0}^n CT'_0 = 3003900 (Z=15)$

Cálculo del tránsito equivalente acumulado

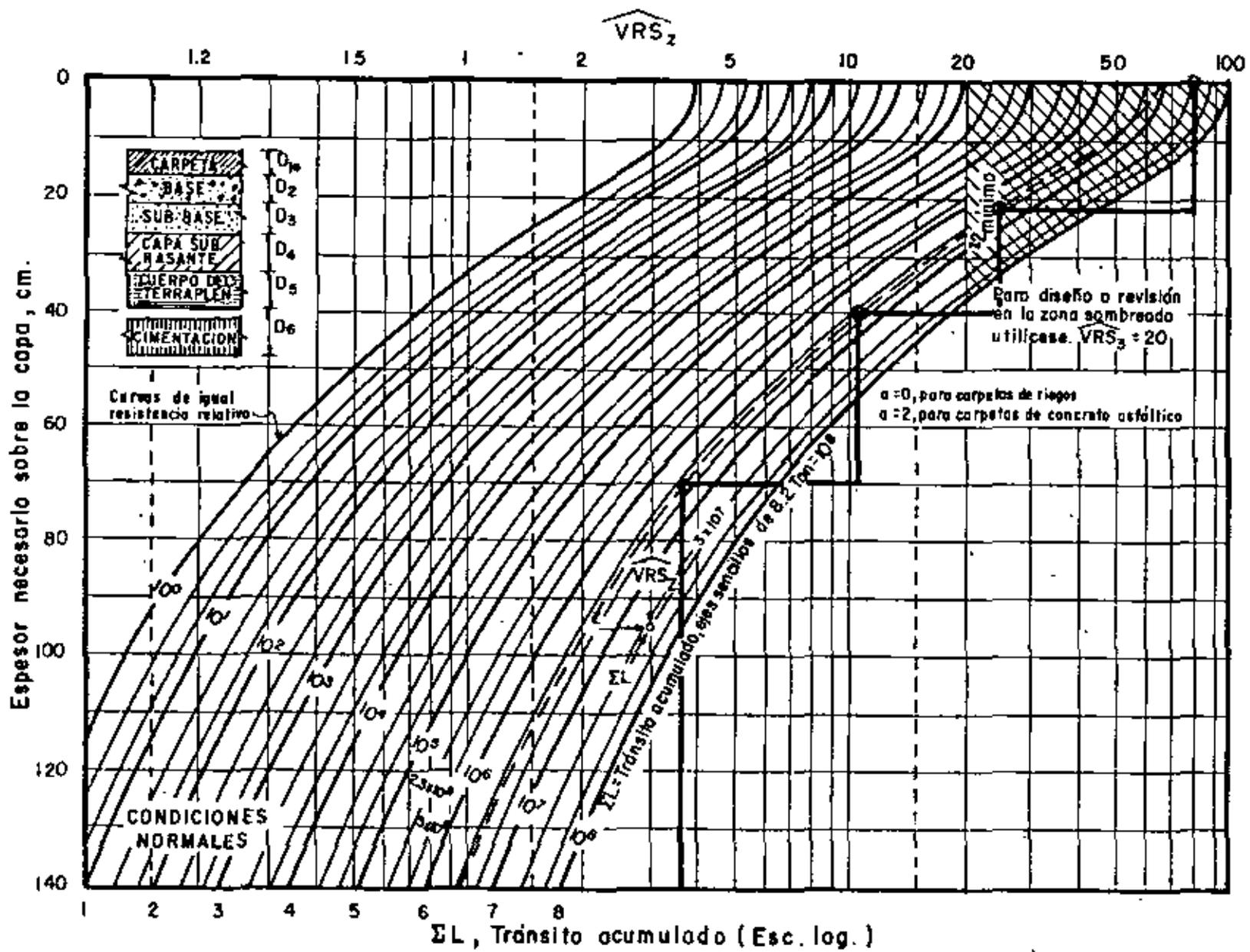


Figura 3

Gráfica de diseño de espesores de pavimentos en carreteras, según el Instituto de Ingeniería de la UNAM.





centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS

EJEMPLOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA AEROPUERTOS

ING. FERNANDO RODARTE LAZO

JULIO, 1979



# DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA AEROPUERTOS

## Ejemplo método de la FAA

FRL

**Datos:**

- Pavimento flexible con vida útil de 10 años.

- Tráfico:

<u>Avión</u>	<u>Num. de salidas (R)</u>	<u>Carga por rueda (W)</u>
B-727-200	20,000	39,900
B-707-320 B	10,000	37,800

- Clasificación del suelo: E-6.

- Condiciones de drenaje: pobres.

- Penetración de heladas: nula.

**Solución:**

Se convierte el tráfico esperado a salidas equivalentes de B-707-320 B:

$$\text{Log. } R_1 = \text{Log. } R_2 \left( \frac{W_2}{W_1} \right)^{1/2}$$

Para B-727-200:

$$\text{Log. } R_1 = \text{Log. } (0.60 \times 20,000) \left( \frac{39,900}{37,800} \right)^{1/2}; \quad R_1 = 15,522$$

Para B-707-320B:  $R_1 = 10,000$

Total ————— 25,522 salidas

o sea: 2,552 salidas equivalentes anuales

$$\text{Peso total del B-707-320B} = \frac{37,800 \times 4 \times 2}{0.95} = 318,316 \text{ lb.}$$

De tabla 2-7 (pag. 52):

Clasificación de subrasante: F 4

fig. 2-23 (pag. 56):

espesor total de pavimento (areas criticas): T = 26"

espesor de base = 10"

espesor carpeta (areas criticas) = 4"

espesor carpeta (areas no criticas) = 3"

Corrección por volumen de tráfico:

<u>Areas criticas</u>	<u>Areas no criticas</u>	<u>Orillas</u>
espesor carpeta = 4" + 1" = 5"	3" + 1" = 4"	2"
espesor base = 10" x 1.1 = 11"	11" x 0.9 = 10"	11" x 0.7 = 8"
espesor sub-base = 12" x 1.1 = 13"	13" x 0.9 = 12"	29" - 10" = 19"
espesor total = 26" — 29"	26"	29"

# DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA AEROPUERTOS.

## Ejemplo Método Del Cuerpo De Ingenieros. ( C B R )

f r l

Datos:

- Suelo natural : CBR = 4 %
- Capa subrasante : CBR = 18 %  
( mejoramiento )
- Sub-base : CBR = 50
- Base : CBR = 100
- Avión de diseño : Douglas DC-8-55F
- Peso total = 328,000 lb.
- Presión llantas = 186 lb./pulg<sup>2</sup>
- Tren de aterrizaje con ruedas en doble tandem: 30" x 55"

Solución :

Peso en tren principal = 0.947 (328,000) = 310,616 lb. (=140,895 Kg.)

De fig.2-15 (Pag.45) :

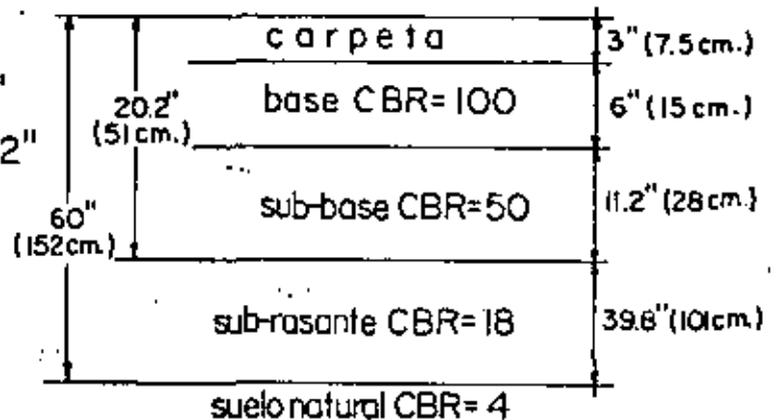
Para CBR = 4 — t = 60"

Para CBR = 18 — t = 20.2"

De tabla 2-6 (Pag.41) :

Carpeta — t = 3"

Base — t = 6"



De fig. 2-16( Pag.46) :

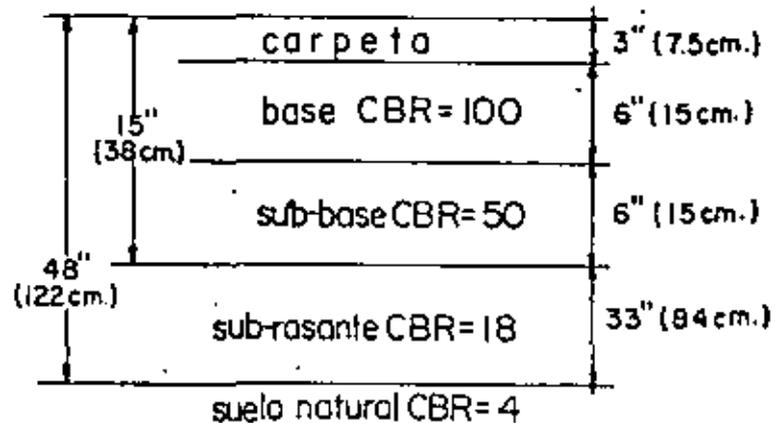
Para CBR = 4 — t = 48"

Para CBR = 18 — t = 15"

De tabla 2-6 (Pag.41) :

Carpeta — t = 3"

Base — t = 6"



# DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA AEROPUERTOS

Ejemplo método del departamento de transporte de Canadá.

f r l

Datos:

- Valor soporte de la subrasante (percentil 25):  $S = 16,080$  lb.
- Avión de diseño: DC-8
- Peso total = 315,000 lb.
- Presión de inflado = 168 lb./pulg.<sup>2</sup>
- Tren de aterrizaje con ruedas en doble tandem: 30" x 55"

Solución:

De fig. 2-34 (pag. 70):

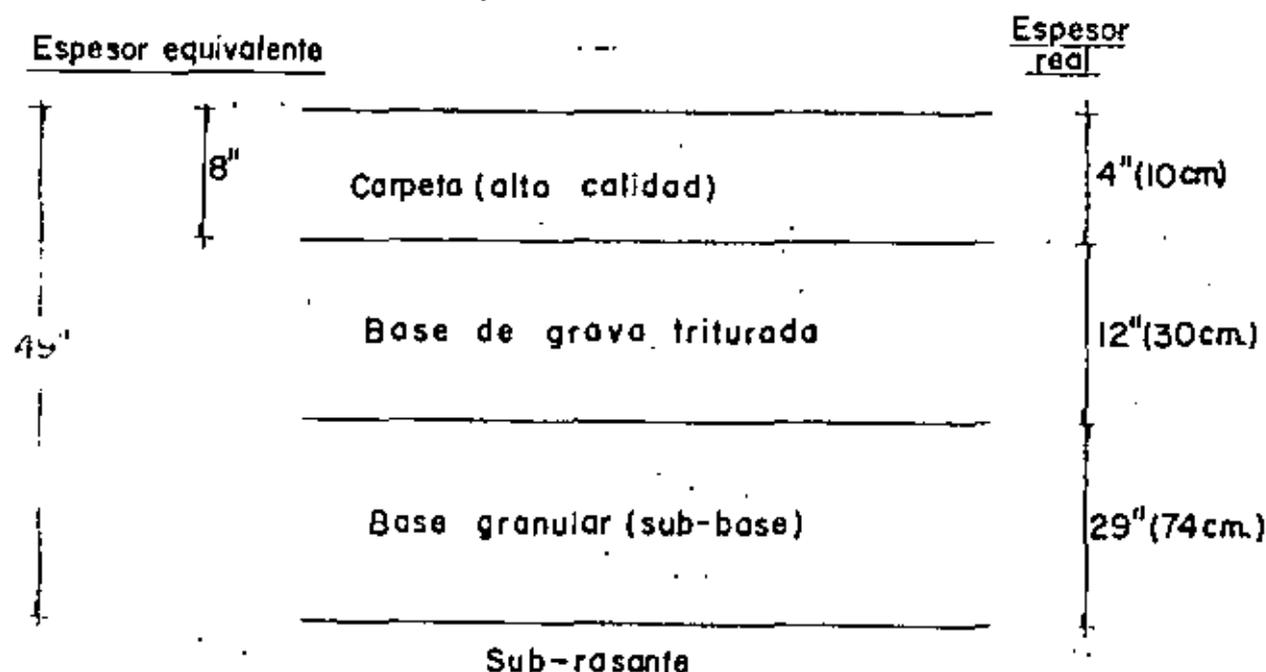
$t = 49''$  (Espesor equivalente de base granular).

De tabla 2-9 (pag. 71):

Espesor mínimo de carpeta = 4"

Espesor mínimo de base (grava triturada) = 12"

Aplicando equivalencias tabla 2-8 (pag. 71):



# DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA AEROPUERTOS.

## Ejemplo Método Del Cuerpo De Ingenieros. ( CBR )

f r l

### Datos:

- Suelo natural : CBR = 4 %
- Capa subrasante : CBR = 18 %  
( mejoramiento )
- Sub-base : CBR = 50
- Base : CBR = 100
- Avión de diseño : Douglas DC-8-55F
- Peso total = 328,000 lb.
- Presión llantas = 186 lb./pulg<sup>2</sup>
- Tren de aterrizaje con ruedas en doble tandem: 30" x 55"

### Solución :

$$\text{Peso en tren principal} = 0.947 (328,000) = 310,616 \text{ lb.} (=140,895 \text{ Kg.})$$

De fig.2-15 (Pag. 45) :

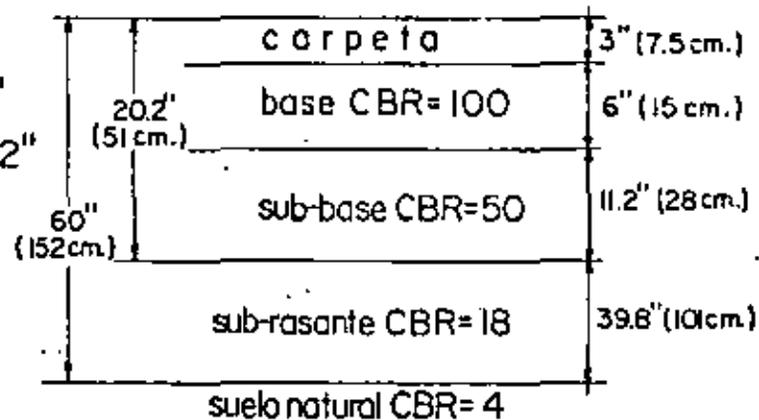
$$\text{Para CBR} = 4 \text{ — } t = 60''$$

$$\text{Para CBR} = 18 \text{ — } t = 20.2''$$

De tabla 2-6 (Pag.41) :

$$\text{Carpeta — } t = 3''$$

$$\text{Base — } t = 6''$$



De fig. 2-16 (Pag.46) :

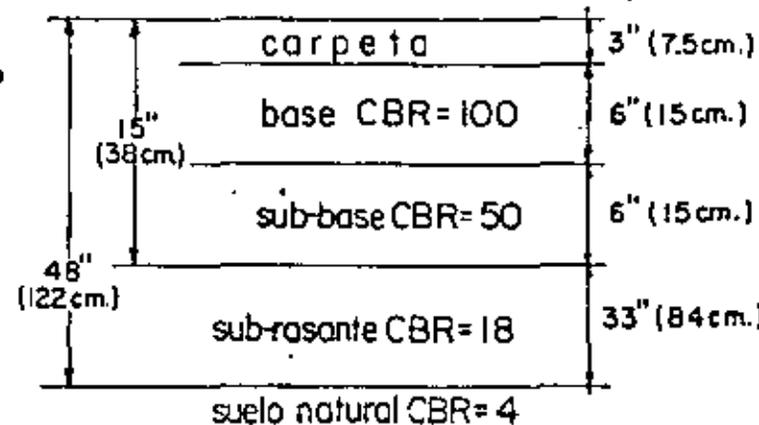
$$\text{Para CBR} = 4 \text{ — } t = 48''$$

$$\text{Para CBR} = 18 \text{ — } t = 15''$$

De tabla 2-6 (Pag.41) :

$$\text{Carpeta — } t = 3''$$

$$\text{Base — } t = 6''$$



# DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA AEROPUERTOS.

## Ejemplo Método "Full Depth" del Instituto del Asfalto.

f r l

Diseñar el pavimento flexible con los sig. datos :

- Módulo de elasticidad de la sub-rasante =  $E_s = 7,000 \text{ psi. (48,260 KN/m}^2\text{)}$
- Temperatura media anual =  $60^\circ \text{ F. (16}^\circ \text{ C.)}$
- Periodo de diseño = 20 años.
- Proyección del tráfico en el periodo de diseño: 142.000 operaciones de avión B-727-200

Solución :

I) Tráfico admisible ( $N_a$ ) para diferentes espesores de pavimento ( $T_A$ ) :

a) Para deformación por compresión vertical ( $\epsilon_c$ ) :

(de fig.2-38 pag. 77 )

$$N_a = 100 \text{ rep.} \text{ --- } T_A = 14.8''$$

$$N_a = 1,000 \text{ " } \text{ --- } T_A = 19''$$

$$N_a = 10,000 \text{ " } \text{ --- } T_A = 21.5''$$

$$N_a = 100,000 \text{ " } \text{ --- } T_A = 22.7''$$

$$N_a = 1,000,000 \text{ " } \text{ --- } T_A = 24''$$

b) Para deformación por tensión horizontal ( $\epsilon_t$ ) :

(de fig.2-39 pag. 81 )

$$N_a = 100 \text{ rep.} \text{ --- } T_A = 6.7''$$

$$N_a = 1,000 \text{ " } \text{ --- } T_A = 10''$$

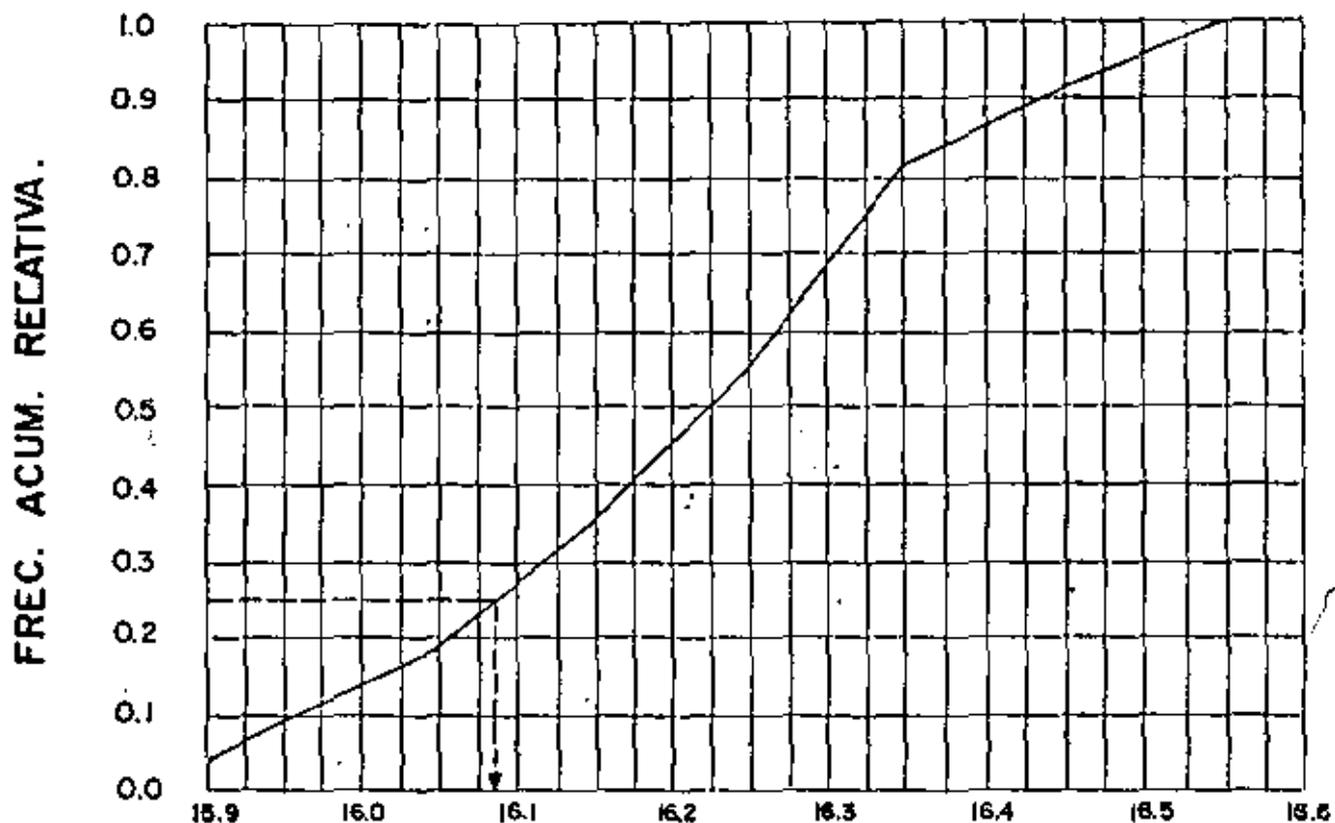
$$N_a = 10,000 \text{ " } \text{ --- } T_A = 14.6''$$

$$N_a = 100,000 \text{ " } \text{ --- } T_A = 21.5''$$

$$N_a = 1,000,000 \text{ " } \text{ --- } T_A = 31.5''$$

# EJEMPLO METODO CANADIENSE.-

f r l



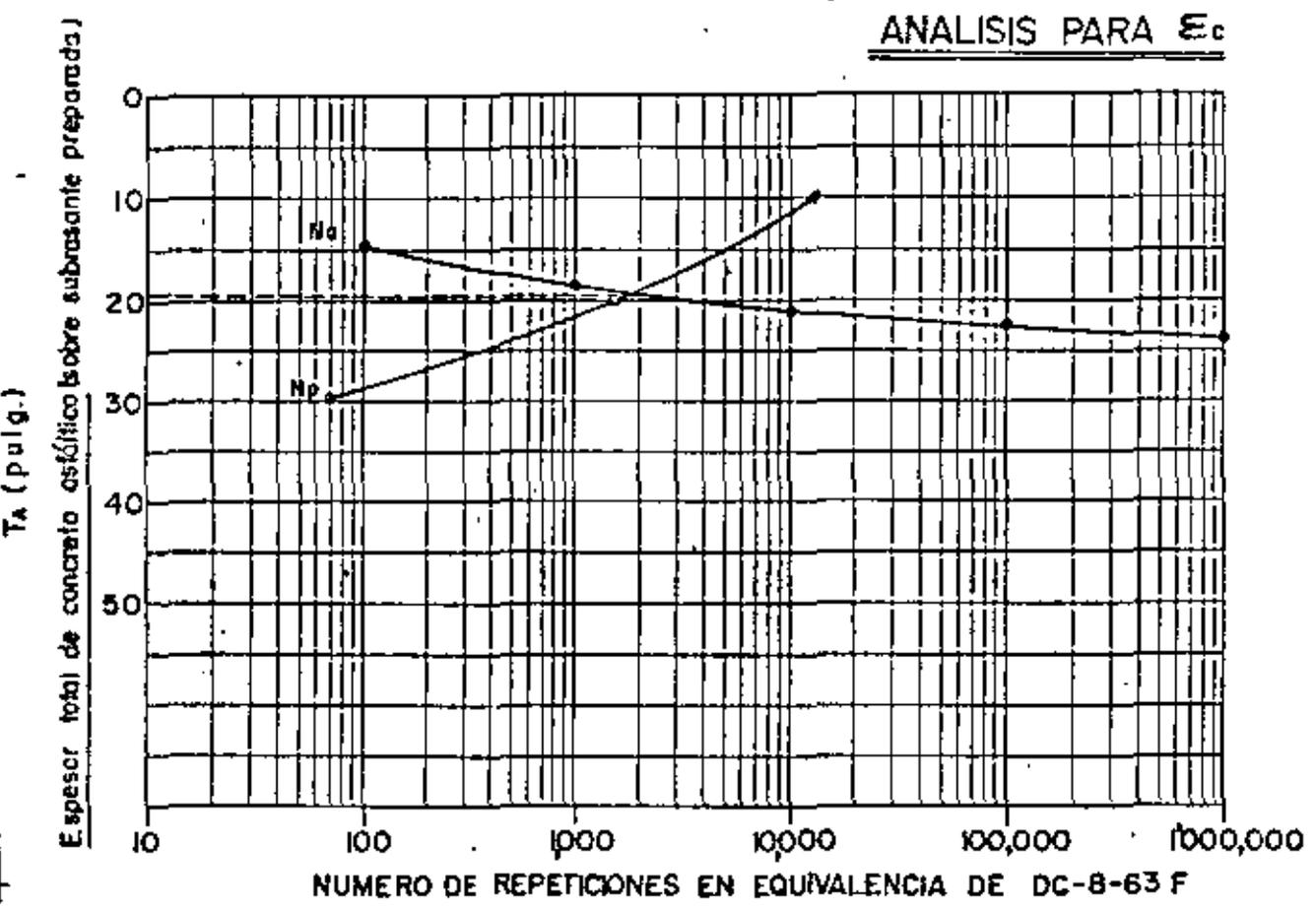
Valor soporte de la subrasante "S" (Placa de 30", 0.5" de deflexión; 10rep.)  
(1,000 lb.)

Marco de clase (1,000 lb.)	Intervalos de clase (1,000 lb.)	Frecuencias	Frecuencias acumuladas.	Frecuencias acumuladas relativas.
15.95	15.90 - 16.00	1	1	0.09
16.05	16.00 - 16.10	1	2	0.18
16.15	16.10 - 16.20	2	4	0.36
16.25	16.20 - 16.30	2	6	0.55
16.35	16.30 - 16.40	3	9	0.82
16.45	16.40 - 16.50	1	10	0.91
16.55	16.50 - 16.60	1	11	1.00

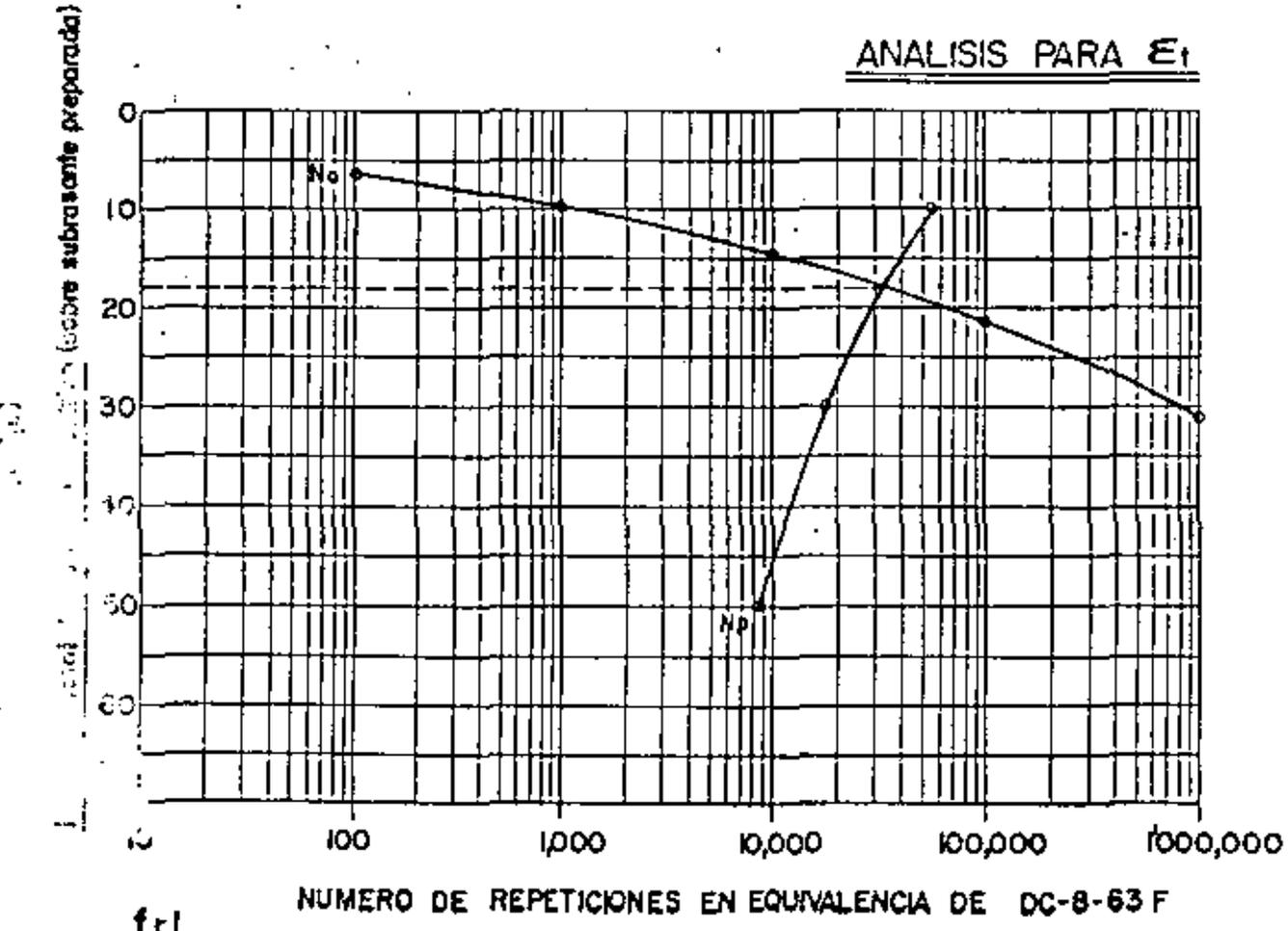
Percentil 25% de S = 16,080 lb.

DIRECCION GENERAL DE AEROPUERTOS DEPARTAMENTO TECNICO OFICINA DE ESTUDIOS ESPECIALES	Visto EL JEFE DE LA OFICINA ING FCO. FDO. RODARTE L. Revisó: J. Sec. ING. RODOLFO DAMIAN G. Formó:
--	---

ANALISIS PARA  $\epsilon_c$



ANALISIS PARA  $\epsilon_t$



II) NUMERO DE OPERACIONES "Np" EQUIVALENTES DE DC-8-63 F.—

f r l

a) Para  $E_c$  : (de fig. 2-46 (pag. 89))

AVION	NUM. DE OPERACIONES DE DISEÑO	NUM. DE OPERAC. EQUIV. DE DC-8-63F(Np)				
		DISTANCIA AL EJE DEL PAVIMENTO				
		5.5 ft.	9.5 ft.	13.5 ft.	17.5 ft.	21.5 ft.
PARA ESPESOR $T_A =$		10 in:				
B-727-200	142,000	9,000	(3,000)	6,500	1,150	—
PARA ESPESOR $T_A =$		20 in:				
B-727-200	142,000	1,200	(1,600)	1,000	275	—
PARA ESPESOR $T_A =$		30 in:				
B-727-200	142,000	60	(70)	54	23	—
PARA ESPESOR $T_A =$		40 in:				
B-727-200	142,000	1	1	1	1	—

b) Para  $E_f$  (de fig. 2-48 (pag. 91)) :

AVION	NUM. DE OPERACIONES DE DISEÑO	NUM. DE OPERAC. EQUIV. DE DC-8-63F(Np)				
		DISTANCIA AL EJE DEL PAVIMENTO (ft)				
		5.5	9.5	13.5	17.5	21.5
PARA ESPESOR $T_A =$		10"				
B-727-200	142,000	35,000	(75,000)	35,000	6,500	—
PARA ESPESOR $T_A =$		30"				
B-727-200	142,000	9,500	(17,500)	9,500	1,800	—
PARA ESPESOR $T_A =$		50"				
B-727-200	142,000	4,700	(8,800)	4,700	950	—

# DISEÑO DE PAVIMENTOS RIGIDOS DE AEROPUERTOS.

## Ejemplo Método de la PCA

FRL

### Datos:

- Diseñar el pavimento de una pista y una calle de rodaje.
- Aviones : B-727 ——— operaciones frecuentes
- DC-10 ——— " "
- DC-8-63 ——— " ocasionales.
- Subrasante: arcilla arenosa (suceptible a "bombeo").
- Módulo de reacción de la subrasante =  $K = 170 \text{ lb./pulg}^3$
- Módulo de ruptura del concreto =  $M_R = 700 \text{ lb./pulg}^2$

### Solución:

Se requiere una sub-base para prevenir el "bombeo".

Se escoge un espesor de sub-base hidráulica de 8 pulg. (20 cm.).

De fig. 3-1-1 ( pag. 94 ) :

$K$  estimado de diseño =  $220 \text{ lb/pulg}^3$  (este valor se verifica posteriormente por medio de pruebas de placa sobre la sub-base de prueba construida.)

Avión	Carga por pierna de tren principal (lb.)	Calle de rodaje y cabeceras de pista			Porción central de pista		
		F. S.	$\sqrt{S} = \frac{M_R}{F. S.}$	Espesor losa (pulg.)	F. S.	$\sqrt{S}$	Espesor losa (pulg.)
B-727	80,000	2.0	350	13.8"	1.7"	412	12.4
DC-10	190,000	2.0	350	14.2"	1.7"	412	12.6
DC-8-63	165,000	1.8	389	14.1"	1.5"	467	12.3

El espesor de la losa será:

- Para calle de rodaje y cabeceras :  $t = 14.2" = \underline{\underline{14.5" (37cm.)}}$

- Para porción central de pista :  $t = 12.6" = \underline{\underline{13.0" (33cm.)}}$

(se aproxima a la media pulgada superior)

ESPESOR CONCRETO ASFALTICO :

Para  $\epsilon_c$  :  $T_A = 19.5''$

Para  $\epsilon_t$  :  $T_A = 18''$

Por tanto, espesor de diseño

$$T_A = 19.5'' \text{ ( espesor critico )}$$

( se aproxima a la  $1/2''$  )

Los espesores menos criticos son un porcentaje de  $T_A$  y se determinan según las figs. 2-43 ( pag. 86 ) y 2-44 ( pag. 87 ) .

$$0.95 \quad T_A = 18.5''$$

$$0.8 \quad T_A = 15.5''$$

$$0.7 \quad T_A = 13.5''$$

# DISEÑO DE PAVIMENTOS RIGIDOS PARA AEROPUERTOS

## Ejemplo método de la FAA

f r l

Datos:

- Módulo de reacción de la subrasante =  $K = 100 \text{ lb/pulg.}^3$
- Condiciones de drenaje del suelo: pobres.
- Penetración de helados: nula.
- Clasificación del suelo de la subrasante: E-9
- Módulo de ruptura del concreto =  $M_R = 650 \text{ lb./pulg.}^2$
- Avión de diseño (obtenido de manera análoga que para pavimentos flexibles):  
Peso total = 320,000 lb.  
Tren de aterrizaje: ruedas en doble tandem.
- Tráfico equivalente del avión de diseño: 1,500 solidos anuales.

Solución:

Factor de seguridad =  $FS = 1.85$

$$\text{Esfuerzo de trabajo} = \sigma_s = \frac{M_R}{F.S.} = \frac{650}{1.85} = 350 \text{ lb./pulg.}^2$$

De fig. 3-2-3 (pag. 106):

Espesor losa en áreas críticas =  $T = 18''$  (46 cm.) (se aproxima a la pulgada)  
Se requiere una sub-base estabilizada, ya que el avión de diseño pesa más de 200,000 lb.

a) Si se utiliza una sub-base estabilizada no rígida, de 9'' (23 cm.) de espesor, y después de efectuarle pruebas de placa se obtiene un valor

$$K = 300 \text{ lb/pulg.}^3 \text{ (dato);}$$

En figura 3-2-3 (pag. 106) se tiene:

Espesor corregido de la losa en áreas críticas:  $T = 15''$  (38 cm.)

	<u>Áreas críticas</u>	<u>Áreas no críticas</u>	<u>Orillas</u>
espesor losa	15''	0.9 (15) = 14''	0.7 (15) = 11''
espesor sub base	9''	9''	13''

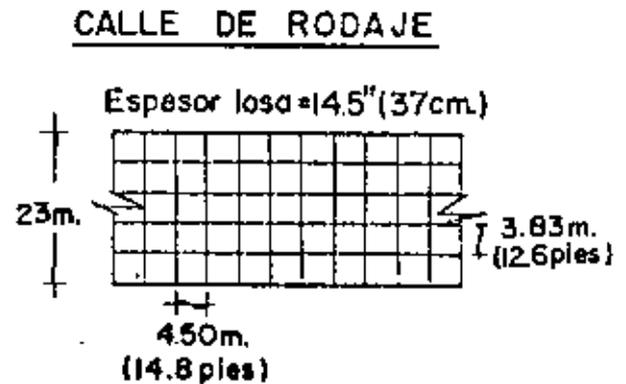
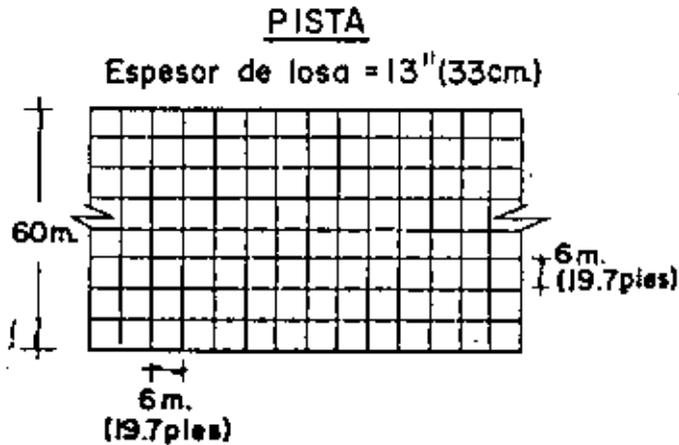
---

Total — 24'' ————— 23'' ————— 24''

# EJEMPLO METODO PCA (cont.)

fr 1

## JUNTAS.—



Tamaño y espaciamiento de barras lisas;  
De tabla 3-1-4 (pag. 99):

Espesor losa : 12 a 16 pulg.

Diámetro de barra : 1 1/2" (3.81 cm.)

Longitud de barra : 20" (51 cm.)

Espaciamiento de barras C.a.C. : 15" (38 cm.)

Barras de sujeción (varillas corrugadas):—

De fig. 3-1-10 (pag. 100):

ELEMENTO	ESPESOR LOSA	ANCHO LOSA	V A R I L L A		
			DIAMETRO	LONGITUD	ESPACIAMIENTO
RODAJE	14.5" (37 cm.)	12.5' (3.8 m.)	5/8" (1.58 cm.)	25" (64 cm.)	27" (69 cm.)
PISTA	13" (33 cm.)	19.7' (6.0 m.)	5/8" (1.58 cm.)	25" (64 cm.)	20" (51 cm.)

# DISEÑO DE PAVIMENTOS RIGIDOS DE AEROPUERTOS .

Ejemplo Anteproyecto de Método para México

FRL

Datos :

- Diseñar pavimento rígido de calle de rodaje con vida útil de 18 años
- Tráfico esperado durante la vida útil :

AVION	Peso de Operación (Kg.)	Carga por rueda "P" (Kg)*	Número de Operaciones "R"
B-727-200	80,000	19,000	44,302 despegues
	68,000	16,150	44,302 aterrizajes
B-727-100	75,000	17,813	44,302 despegues
	62,000	14,725	44,302 aterrizajes
DC-9	49,000	11,638	59,067 despegues
	44,000	10,450	59,067 aterrizajes

\* Se considera que el 95% del peso lo carga el tren principal .

- Diferencia de temperatura ambiente entre el día y noche =  $9^{\circ}\text{C}$

- Módulo de reacción de la subrasante :  $K = 10 \text{ Kg/cm}^3$

- Módulo de ruptura del concreto a los 90 días =  $M_R = 49 \text{ Kg/cm}^2$

# EJEMPLO METODO DE LA FAA (cont.)

FRL

- b) Si se utiliza una sub-base estabilizada rígida, estabilizada con cemento, de 9" (23 cm.) de espesor.  
El valor del módulo de elasticidad de la sub-base (prueba ASTM-C-215) es:

$$E_2 = 1 \times 10^6 \text{ lb./pulg.}^2 \text{ (dato)}$$

$$h_1 = 18'' \text{ (espesor losa)}$$

$$h_2 = 9'' \text{ (espesor sub-base)}$$

$$h_1/h_2 = 2.0$$

De fig. 3-2-8 (pag.108):

$$r = 1.125$$

Utilizando la expresión:

$$\text{Espesor equivalente} = h (r)^{1.33}$$

$$\text{Esp. equiv.} = 18 (1.125)^{1.33} = 21''$$

es decir, que las 9" de sub-base se comportan como 3" de losa.

2º Tanteo:

$$h_1 = 15'' \text{ (espesor losa)}$$

$$h_2 = 9'' \text{ (espesor sub-base)}$$

$$E_2 = 1 \times 10^6 \text{ lb./pulg.}^2 \text{ (sub-base)}$$

$$h_1/h_2 = 1.66$$

de fig. 3-2-8 (pag.108):  $r = 1.15$

$$\text{Esp. equiv.} = 15 (1.15)^{1.33} = 18''$$

que es el espesor total requerido.

	<u>Areas criticas</u>	<u>Areas no criticas</u>	<u>Orillas</u>
Espesor losa	15"	0.9(15) = 14"	0.7(15) = 11"
Espesor sub base(rigida)	9"	9"	15"
<b>Total</b>	<b>24"</b>	<b>23"</b>	<b>24"</b>

Ejemplo Anteproyecto de método para México (cont.)

f r l

Solución :

Se convierte el tráfico esperado a número de operaciones equivalentes de B-727-200 con peso total de 80,000 Kg. (avión crítico) con la expresión :

$$\text{Log. } R_1 = \text{Log. } R_2 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{1/2}$$

Para B-727-200(despegues): \_\_\_\_\_  $R_1 = 44,302$

Para B-727-200(aterrizajes):

$$\text{Log. } R_1 = \text{Log. } 44,302 \left( \frac{16,150}{19,000} \right)^{1/2}; \text{ _____ } R_1 = 19,222$$

Para B-727-100(despegues):

$$\text{Log. } R_1 = \text{Log. } 44,302 \left( \frac{17,813}{19,000} \right)^{1/2}; \text{ _____ } R_1 = 31,546$$

Para B-727-100(aterrizajes):

$$\text{Log. } R_1 = \text{Log. } 44,302 \left( \frac{14,725}{19,000} \right)^{1/2}; \text{ _____ } R_1 = 12,315$$

Para DC-9 (despegues):

$$\text{Log. } R_1 = \text{Log. } 59,067 \left( \frac{11,638}{19,000} \right)^{1/2}; \text{ _____ } R_1 = 5,423$$

Para DC-9 (aterrizajes):

$$\text{Log. } R_1 = \text{Log. } 59,067 \left( \frac{10,450}{19,000} \right)^{1/2}; \text{ _____ } R_1 = 3,456$$

Número de operaciones equivalentes de B-727-200 = 116,264

De tabla 3-4-3 (Pag. 126) :

Factor de repetición de carga (para  $\nabla = 122 \text{ cm.}$ ) = 0.23

Número de repeticiones del avión de diseño = 116,264 X 0.23 = 26,740

## EJEMPLO ANTEPROYECTO DE METODO PARA MEXICO (cont.)

fri

DE Tabla 3-4-1 (pag. 124):

Factor de seguridad = F.S. = 1.48

Si se escoge un espesor de sub-base hidraulica de 20 cm ;  
de fig. 3-4-3 A (pag. 129):

Módulo de reacción en la superficie de la sub-base =  $K = 11.3 \text{ kg./cm}^3$

(Valor que debe ser comprobado o corregido por medio de pruebas de placa).

El esfuerzo de trabajo del concreto es :

$$\sigma = \frac{M_R}{F.S.} = \frac{49}{1.48} = 33.1 \text{ kg./cm}^2$$

La carga por pierna del avión crítico de  
diseño es de 38,000 kg.

De fig. 3-4-10 (pag. 136):

Espesor de losa para areas criticas (tipo A):

H = 27.5 cm. (calle de rodaje)



centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



CURSO: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS

TEMA: PLANEACION DE LOS TRABAJOS DE  
CONSTRUCCION

ING. CARLOS M. CHAVARRI MALDONADO

1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 9. 10. 11. 12. 13. 14. 15. 16. 17. 18. 19. 20. 21. 22. 23. 24. 25. 26. 27. 28. 29. 30. 31. 32. 33. 34. 35. 36. 37. 38. 39. 40. 41. 42. 43. 44. 45. 46. 47. 48. 49. 50. 51. 52. 53. 54. 55. 56. 57. 58. 59. 60. 61. 62. 63. 64. 65. 66. 67. 68. 69. 70. 71. 72. 73. 74. 75. 76. 77. 78. 79. 80. 81. 82. 83. 84. 85. 86. 87. 88. 89. 90. 91. 92. 93. 94. 95. 96. 97. 98. 99. 100.

## PLANEACION DE LOS TRABAJOS DE CONSTRUCCION.

### I CONSTRUCCION.

Dentro de los campos en la profesión del Ingeniero Civil ocupa un lugar preponderable la construcción. En la realización de una obra, este campo sigue inmediatamente al diseño y precede a los de operación y mantenimiento de obras. Consiste la construcción en la realización de una obra combinando materiales, obra de mano y maquinaria con objeto de producir dicha obra de tal manera que satisfaga una necesidad normalmente colectiva, y que cumpla con las condiciones planteadas por el diseñador, entre las que se cuenta con primordial importancia la seguridad.

Consiste la construcción en uno o varios procesos de producción en el o los que se combinen en alguna forma recursos (materiales, obra de mano y maquinaria) para lograr el producto terminado, se trata pues de un típico proceso industrial, que solo difiere del clásico en que las obras normalmente son diferentes y se requiere estudiar un proceso que será diferente para cada obra, en cambio, en el proceso típico industrial este es repetitivo.

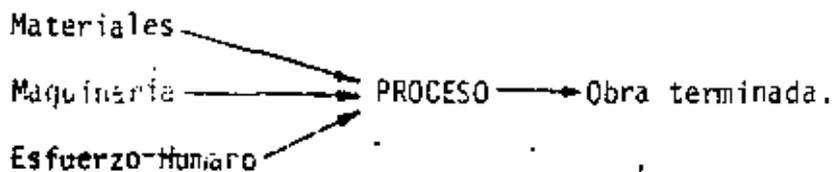
### II CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS.

Entre estos procesos es muy común encontrar la construcción de pavimentos, que bien sea parte del proceso total o todo el proceso que se presenta en la mayor parte de las obras que se construyen. Consiste pues la construcción de pavimentos en combinar maquinaria, materiales y obras de mano, a fin de obtener la obra o parte de la obra de acuerdo con lo planteado en el diseño.

En la planeación de la construcción de un pavimento, el problema de selección de equipo trata de determinar que tipo, modelo y tamaño de máquinas deberá usar el ingeniero para realizar su proceso dentro de las restricciones impuestas por el proyecto. Al definir esto el ingeniero estará planeando el proceso constructivo, o dicho en otra forma definirá en todos sus puntos el procedimiento de construcción a usarse.

### III PROCESOS.

Podemos pues presentar la construcción en general como uno o varios procesos de transformación con una entrada, los recursos y una salida, la obra terminada.

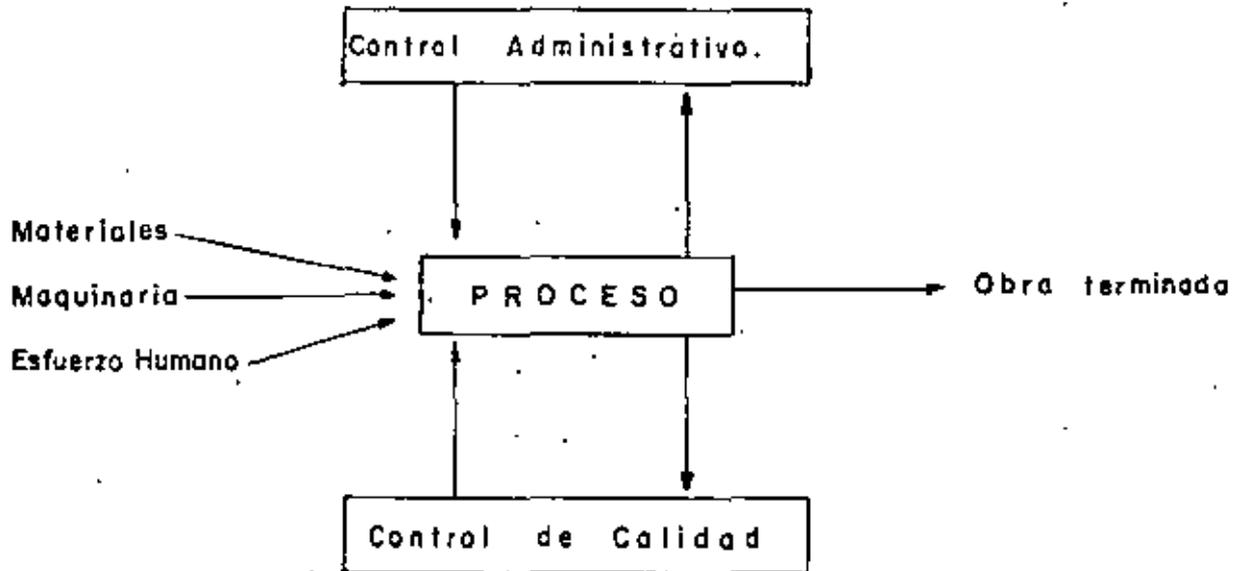


Como habíamos dicho antes el proceso puede ser uno o varios, pero también podremos dividirlo en subprocesos, por ejemplo: (bases, subbases, carpetas), cada uno de los cuales producirán una parte de la obra, estos pueden ser simultáneos o en cadena, y es usual que estos subprocesos se analicen -- por separado para definir los procedimientos de construcción que producirán la obra que deseamos.

### IV CONTROLES.

A lo largo de la ejecución deberemos revisar para que nuestro esfuerzo nos vaya llevando a la obra terminada tal y como lo concebimos. Es fácil -- comprender que no conviene esperar al fin de la obra para revisar si esta -- coincide con la diseñada, y si nuestra planeación se cumplió, esto es, si -- las cantidades y calidades que calculamos usar de nuestros recursos realmente fueron las utilizadas. Si algo falla lo planeado no coincidirá con lo -- ejecutado. A la revisión de el uso de los recursos a lo largo de la ejecu -- ción se le llama Control Administrativo. A la revisión de la calidad de la -- obra en todas sus partes a fin de que realmente ésta sea la diseñada se le -- denomina Control de Calidad. Estos controles consisten en tomar muestras a -- lo largo del proceso y compararlas con los estándares tomados de la planea -- ción; en realidad constituyen en si un proceso capaz también de ser planeado. Este tipo de procesos se denominan de Control o Retroalimentación. Si en es -- tos procesos se encuentran desviaciones significativas con el estándar actúan -- sobre los procedimientos de construcción para corregir las dos desviaciones -- y acercar el producto al estándar.

Puede pues representarse la construcción y sus controles con el siguien -- te esquema.



## V TOMA DE DECISIONES.

El ingeniero que se ocupa de la construcción de pavimentos tiene que planear anticipadamente el equipo a utilizarse en el proceso. Esto lo hace seleccionando varios tipos de máquinas en ciertas combinaciones que él sabe le producirán la obra de acuerdo con el diseño. Se le presentan pues varias alternativas, una de las cuales escogerá para realizar las obras. Esto constituye la toma de una decisión. Una decisión es simplemente una selección entre dos o más cursos de acción. Podemos decir pues que la selección del equipo en Construcción de Pavimentos es un caso de la toma de decisiones.

La toma de decisiones puede realizarse intuitiva o analíticamente. Si se aplica la intuición normalmente se usa lo que ha sucedido en el pasado y aplicando este conocimiento se estima lo que puede suceder en el futuro, con cada una de las vías de acción, y en función de esta apreciación se toma la decisión. La decisión tomada analíticamente consiste en un estudio sistemático y evaluación cuantitativa de el pasado y el futuro, y en función de este estudio se selecciona la vía de acción adecuada. Ambos métodos se usan comúnmente en el problema de selección de equipo.

## VI OBJETIVOS.

Si queremos hacer la selección de un camino entre varios que se presentan, y que solucionará el problema tendremos en alguna forma que comparar --

las posibles soluciones. Se presenta el problema de como compararlas ¿En función de qué? ¿Como valuarlas? El ingeniero deberá pues determinar un objetivo u objetivos que le servirán para valuar dichas vías de acción o caminos alternativos.

La labor del ingeniero está orientada por la economía, es decir tiene como objetivo fundamental adecuar el costo con la satisfacción de una necesidad. Aún cuando no es raro que en su labor el ingeniero se enfrente a problemas con objetivos contradictorios en el caso de la selección de equipo -- sus decisiones están orientadas por el criterio económico.

La valuación de las alternativas será pues una valuación de tipo económico, habrá que determinar el costo de las entradas a lo largo del tiempo y el beneficio que proporcionará la salida, también a lo largo del tiempo, para cada alternativa. De la comparación de estos costos-beneficios saldrá -- una manera de comparar las alternativas en que se basará el ingeniero para tomar su decisión. El ingeniero deberá pues tener un conocimiento profundo de los costos, y deberá definir tanto los costos físicamente creados por el uso de su alternativa, como los derivados de usar la solución propuesta por él.

La selección dependerá pues del criterio económico. La evaluación de las alternativas podría tomar la forma de:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Salida}}{\text{Entrada}} = \frac{\text{Ingreso}}{\text{Costo}}$$

También puede decirse pues que lo que busca el ingeniero es hacer máximas las utilidades.

## VII PROCEDIMIENTO PARA TOMAR DECISIONES.

Definido el problema deberá hacerse un análisis del mismo, en esta fase se recaba toda la información que nos de un conocimiento profundo y completo del problema, con el objeto de poder definir y valuar el mismo, (posibles bancos, posición de la planta de asfalto, tipo de planta, etc.), lo que traerá como consecuencia una selección más depurada de las distintas alternativas -- solución que se formulará en la siguiente etapa de la toma de decisión. Esta definición y valuación del problema se hará tomando en cuenta el objetivo.

En la siguiente fase se toman todas las alternativas posibles o cursos

alternativos de acción. En este caso es muy importante para escoger las alternativas posibles la preparación técnica del ingeniero.

La tercera fase consiste en comparar estos posibles cursos de acción en función del objetivo y al final de esta fase podremos tomar ya una decisión que vaya guiada al objetivo propuesto.

Por último se considera una última fase de especificación e implementación, en la cual se hace una descripción completa de la solución elegida y su funcionamiento.

#### VIII- CERTEZA - RIESGO - INCERTIDUMBRE.

Se dice que una decisión se toma bajo certeza cuando el ingeniero conoce y considera todas las alternativas posibles y conoce todos los estados de la situación, consecuencia de tomar dichas alternativas, y a cada alternativa corresponde un solo estado futuro.

Se dice que una decisión se toma bajo riesgo si a cada una de las alternativas corresponden diversos estados futuros, pero el ingeniero conoce la posibilidad de que se presente cada uno de ellos.

Se dice que la decisión se toma bajo incertidumbre si el ingeniero no conoce las características probabilísticas de las variables.

#### IX PROCESO - SISTEMAS.

Al analizar el proceso constructivo y planearlo nos encontramos que en realidad estamos encontrando el grupo de decisiones que permitirán el logro de nuestros objetivos.

Para estudiar este proceso será indispensable analizar todas las variables o las más importantes que intervienen en él, las relaciones entre ellas y como una variación en cada una de ellas influye en que el resultado final se acerque más o menos a nuestro objetivo. Esto en realidad equivale a considerar la totalidad de cursos alternativos de acción en función del objetivo.

Normalmente las variables tienen limitaciones. Podremos tener limitaciones en tiempo, en recursos, en sumas mensuales a gastar.

Muchas veces los cursos alternativos de acción son muy grandes en número.

ro, y por esto es conveniente para compararlos con facilidad, encontrar como cada valor de la variable influye en la salida del proceso.

## X RESTRICCIONES.

En la fase de análisis se fijan normalmente las restricciones o limitaciones. Estas pueden provenir de las especificaciones del diseñador, de limitaciones propias de la empresa, o restricciones externas, como no poder cambiar bancos de materiales, o por condiciones topográficas, estar fija la posición de las plantas de trituración, mezcla de base o planta de asfalto.

Es muy conveniente que el ingeniero no se cree restricciones ficticias, que le limitarán el encontrar soluciones alternas posibles. Esto limitará la aplicación de la técnica del ingeniero.

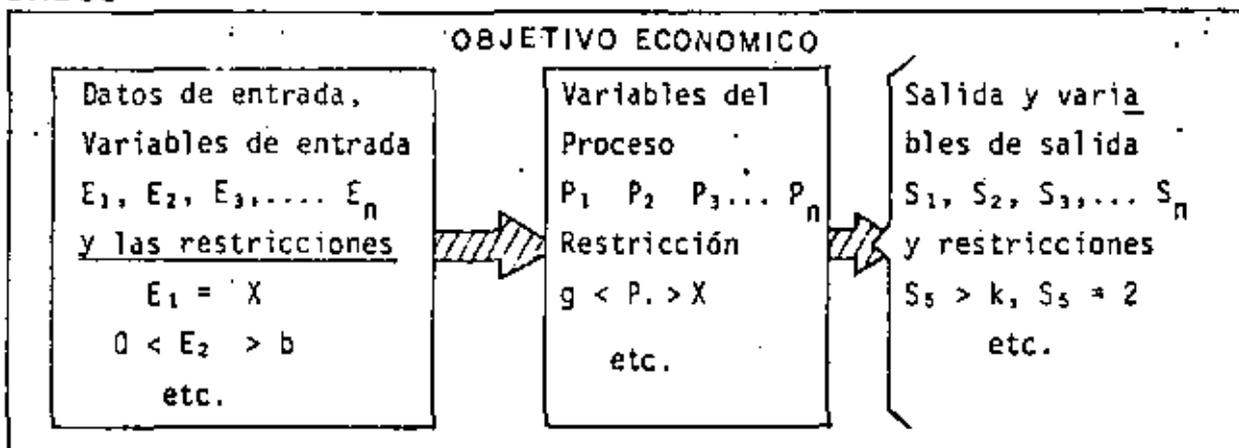
## XI SELECCION DE VARIABLES.

No es fácil encontrar todas las variables, por otro lado no todas influirán importantemente en el proceso, es pues conveniente definir las variables significativas, esto es las que modifiquen importantemente la salida valuada en función del objetivo. Las variables pueden ser:

- a) Controlables, aquellas que podremos variar a nuestro antojo, como la influencia de iniciar los trabajos, el equipo a usar, etc.
- b) Las que no pueden ser controladas o manipuladas en el proceso, pero que influyen en la salida.

Podemos pues definir nuestro método de decisión usando la siguiente notación:

### DADOS



Encontrar.

El conjunto de valores de las variables controlables que hagan óptimo al criterio económico y que satisfagan las limitaciones y restricciones.

### XII SISTEMAS - MODELOS.

Para tomar nuestra decisión o conjunto de decisiones dentro de los considerados anteriormente señaladas requerimos representar nuestro proceso (sistema), de tal manera que operando sobre la representación modificando los valores de las variables controlables tengamos salidas que se aproximen o sean las mismas que las obtenidas al operar el sistema real.

Se define sistema como una cantidad individual delimitada formada por un conjunto de componentes (pueden ser subsistemas) diseñadas para actuar estimuladas por factores externos (entradas) y orientadas para lograr la salida deseada. De acuerdo con esta definición nuestro proceso constructivo de la pavimentación, en realidad constituye un sistema.

Una característica importante de los sistemas es que deben ser integrados, esto es que exista una clara interdependencia entre todas sus partes (independientemente de que estas partes sean Sub-Sistemas o no) que constituyan un todo de tal manera que al efectuarse un cambio en una parte, otras queden en mayor o menor grado afectadas por dicho cambio.

### XIII MODELOS MATEMATICOS.

Para manejar y planear sistemas, así como para ayudar a tomar decisiones sobre sistemas establecidos, se han desarrollado gran cantidad de modelos matemáticos cuyo estudio pertenece a la investigación de operaciones.

Al enfrentarse el ingeniero a las decisiones que tiene que tomar respecto a su sistema-obra, debe aprovechar los modelos ya desarrollados para analizar sub-sistemas o el sistema en conjunto.

La construcción de modelos ha tenido un desarrollo impresionante en los últimos años y esta actividad se amplía cada vez más. Paralelo a la construcción, la ampliación de los modelos a la práctica se está generalizando también y los campos en donde se puede aplicar se pluralizan en el futuro.

En la actualidad existen modelos como la construcción de red de activi-

dades. El análisis de tiempos y relaciones de precedencia de la red se amplía al obtenerse además la ruta crítica y al poder agregar análisis de costos de recursos utilizados en las actividades.

Modelos como los de reemplazo ayudan a determinar la vida económica de las máquinas indicando cuando se debe hacer un reemplazo y cuando una reparación, etc., para que la operación de la máquina sea económica.

Modelos de control de inventarios pueden ayudar a establecer políticas óptimas, desde el punto de vista económico, para determinar cuánto y cuando se debe ordenar de cada uno de los materiales que se manejan en almacén y que tienen una demanda conocida.

La programación lineal y el problema del transporte tienen varias aplicaciones en el campo de la ingeniería civil. Se puede encontrar de la manera más económica de transportar cierto material (cemento, concreto, material de base o carpeta, etc.), desde un conjunto de orígenes donde existe en cantidades conocidas, hasta un conjunto de destinos donde es requerido en cantidades también conocidas. Se puede aplicar también a la asignación científica de personal, o de maquinaria, a la determinación óptima de la mezcla de materiales procedentes de diferentes bancos para proporcionar cierta cantidad para una base cumpliendo con especificaciones conocidas.

En aquellos fenómenos en los que se forma una cola porque no existe un equilibrio entre la demanda de servicio y la rapidez con que este servicio se proporciona, también pueden utilizarse modelos ya desarrollados.

La parte de la investigación de operaciones que se ocupa de su estudio se llama teoría de los fenómenos de espera. Es fácil localizar problemas de este tipo de un sistema-obra.

Por ejemplo los camiones en fila, esperando que una excavadora, pala, draga, cargador, etc., los cargue para estudiar la capacidad, número rapidez (eficiencia) que los cargadores deben tener para lograr un equilibrio económico, o para impedir que la cola de camiones sea demasiado larga.

Hay además multitud de problemas económicos de comparación entre alternativas en los que debemos mencionar la necesidad de juzgar las diversas alternativas que se presenten no solo por el costo directo, inmediato que cada una de ellas tengan, sino también por los costos futuros consecuencias de dichas alternativas.

Para hacer estas comparaciones con cantidades homogéneas hay que tomar en consideración el valor del dinero en el tiempo y el manejo de tasas de interés, temas de gran interés para las decisiones del ingeniero.

Con el desarrollo de las computadoras electrónicas de la investigación de operaciones se ha desarrollado en la creación de modelos no analíticos -- que expresan las reacciones más importantes y que simulan lo más posible las condiciones reales.

Esta técnica se llama simulación y su aplicación ha tenido éxitos notables. Han sido especialmente útiles aplicados al diseño y la operación de obras de ingeniería, pero no hay razón para suponer que no pueden aplicarse con igual éxito a la construcción.

La explotación de una pedrera, la trituración de un material para base, el acarreo de materiales para la pavimentación, etc., son operaciones que fácilmente se podrían simular.

#### XIV TOMA DE DECISION.

##### a) Prueba del Modelo.

Es muy conveniente que al desarrollar un modelo, para que represente convenientemente el sistema se pruebe continuamente mientras se está construyendo.

Al terminar el modelo se realizan pruebas para garantizar su propiedad. Si el modelo tiene deficiencias, es decir las salidas, no corresponden a la realidad del sistema, pueden deberse a que no se seleccionaron adecuadamente las variables significativas, o bien las relaciones entre variables no corresponden a la realidad.

Pueden también probarse el modelo a través de pruebas parciales o restringidas de las soluciones propuestas siempre que esto sea posible.

##### b) Sensibilidad.

Sensibilidad de un sistema en general se refiere al cambio o cambios en los parámetros del sistema (coeficiente o en su caso entradas).

La sensibilidad tiene especial importancia, pues le indica al ingeniero como se comporta una decisión cuando las condiciones cambian por alguna razón, como por condiciones del material cambia el equipo de compactación.

El estudio de la sensibilidad es muy importante para formar la decisión, puede ser que una decisión tenga alta sensibilidad, esto sea vulnerable a pequeños cambios de las variables controlables. Cuando esto sucede es muy con

veniente realizar una investigación que nos asegure la validez de los datos que están siendo evaluados.

c) Selección de la Vía de Acción.

Cualquiera que sea el sistema de comparación de alternativas, desde simple intuición hasta el uso de complicados modelos matemáticos, hay que tomar en cuenta ciertas condiciones que influyen importantemente en la decisión.

En primer lugar la persona o personas que van a tomarla. En general la valuación en términos del objetivo no forma algunas variables en consideración, o puede ser que se consideran variables no significativas algunas variables de carácter probabilístico. Una persona con propensión a no tomar riesgos en un caso de los anteriores, tomará una decisión diferente a una persona que toma riesgos. Esto es una característica psicológica del sujeto que va a tomar la decisión y conviene tomarlo en cuenta.

De todos modos hay que repasar las variables que se consideren no-significativas, pues hay variables que para ciertos valores no son significativas, pero que en otros rangos si lo son. Un repaso en función de la valuación de las alternativas es pues conveniente.

También es frecuente que la valuación se realice bajo certeza, cuando en prácticamente todos los problemas de Ingeniería se presentan bajo riesgo o incertidumbre. En el momento de tomar una decisión, conviene también repasar cuales son las condiciones en que realmente se presenta el problema.

El análisis de sensibilidad es también muy conveniente, pues nos indicará como se comporta una solución ante variaciones en las condiciones planteadas, como por ejemplo que sucede si en vez de trabajar un turno trabajo dos o tres.

En general todos estos puntos son analizados y pesados al tomar la decisión, cualquiera que sea el procedimiento de valuación de alternativas que se haya seguido.

## XV DECISION.

Especificación de una Solución. Una vez elegida la solución en la toma de decisiones, inmediatamente se deberá proceder a especificar los atributos físicos y las características de funcionamiento de la misma con tanto detalle como se requiera para que las personas que van a participar en su imple-

mentación conozcan hasta el detalle necesario. Principalmente cuando el que planea es una persona diferente del que ejecuta, es preciso elaborar cuidadosamente documentación, de tal manera completa, que pueda comunicar a otros la solución.

Normalmente se hace mención de la necesidad de la solución propuesta, se especifica la solución, mediante dibujos y especificaciones y se justifican sus características y funcionamiento.

Muchas veces se hace necesario acompañar todo esto con un resumen del proceso decisorio, y de los argumentos empleados para seleccionar la vía de acción, de tal manera que si se hace necesario en algún momento revisar la solución estos pueda hacerse fácil y rápidamente.

Aceptación de la Solución. Se ha demostrado con experimentos que una solución derivada de un análisis cuantitativo normalmente tiene poca aceptación. Es frecuente que las personas a las que se propone se inclinen por aceptar más fácilmente una solución derivada de la experiencia que una que tenga bases cuantitativas, pero que sea deducida.

Para tener mayores probabilidades de éxito en la aceptación de la solución a la persona o personas que se van a dedicar posteriormente a la implementación.

Esto es común hacerlo formando un equipo con la persona que planea y la o las que posteriormente van a encargarse de la implantación del plan. Desafortunadamente esto no es posible a veces o la planeación en Construcción de Pavimentos muchas veces se hace antes de iniciar los trabajos; por ejemplo si se concursa para definir el valor probable de los trabajos. Esto hace difícil lograr que se facilite al planeador el que se acepte su plan a priori.

Por otra parte es común que se tenga que cambiar al encargado de los trabajos y que el nuevo encargado no acepte las soluciones contenidas en el plan que se estaba siguiendo.

Es pues muy conveniente que se preste gran atención a la forma en que se va a presentar el plan que contiene las decisiones deducidas analíticamente, pues si el ejecutor no piensa que las decisiones son correctas es bastante probable que la solución sea un fracaso.

Un sistema que se ha seguido con éxito es reunir a todos los encargados de las obras para prepararlos en las técnicas de la decisión. Aprovechar para que entre todos planeen el sistema de información decisión que servirá para planear las obras, de modo que tengan confianza en el método y crean en él. Sin embargo cualquier sistema tiene sus fallas que tendremos que estar prontos a corregir problema que se presente en la implementación proveniente de que el encargado "duda" de la solución propuesta.

Implantación. Es muy frecuente que al implantar la solución se presenten condiciones no previstas que obliguen a modificar en poco o en mucho la solución especificada. Por otro lado puede también suceder que la realidad no conteste completamente a lo previsto en el análisis. En ambos casos es muy conveniente que en estas modificaciones necesarias intervenga la persona que se encargó de seleccionar la vía de acción más conveniente, para que al realizar dichas modificaciones no se caiga en otra vía de acción inconveniente desde el punto de vista del objetivo.

Esto se obvia organizando reuniones entre los encargados de planeación y los de la implantación del plan, que muchas veces conduce a modificaciones que mejoran inclusive la solución.

Control. Cuando se trata de una cadena de decisiones o el proceso se realiza en tiempos largos es indispensable al planear la solución, planear también las herramientas de control, con objeto de poder supervisar fácilmente si la realidad se comporta de acuerdo con lo previsto.

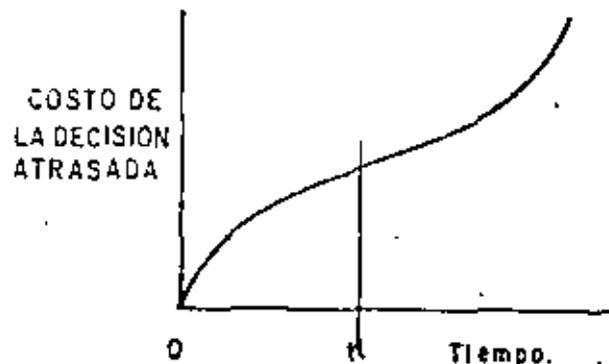
Posteriormente se ampliará el concepto de control, pero conviene recordar que el control es una herramienta indispensable para lograr resultados satisfactorios.

Oportunidad de las decisiones. Toda decisión tomada por el ingeniero debe cumplir entre otras condiciones la de ser adecuada y oportuna.

La segunda de las características mencionadas, la oportunidad en las decisiones, es tan importante como la primera. No basta que la decisión que se toma sea adecuada, es necesario que también sea oportuna para que ejerza la función para la cual se requiere.

Si la decisión es adecuada y oportuna, se logrará el resultado deseado. Si sólo se satisface una de las dos condiciones anteriores, no se obtendrán los resultados apetecidos.

Si se define el costo de la decisión atrasada como la diferencia entre el costo en el tiempo  $t$  menos el costo en el tiempo cero, considerando que el tiempo cero en que se debe tomar la decisión, se puede describir la forma teórica general que el costo de la decisión atrasada tiene, independientemente del tipo de decisión de que se trate, a través de la gráfica siguiente:



Si la decisión se toma en el momento justo (tiempo cero) el costo de la decisión atrasada será cero; a medida que pasa el tiempo el costo de la decisión atrasada aumenta con una cierta rapidez fr crecimiento hasta llegar a un tiempo  $t_1$  después del cual esta rapidez se encrementa notablemente. Así, para toda decisión se pueden distinguir dos regiones la primera de 0 a  $t_1$ , donde el costo de la decisión atrasada no es muy importante, y de  $t_1$  en adelante, donde el costo de la decisión atrasada puede resultar tan alto, que puede afectar seriamente la actividad de que se trate, o tal vez el proyecto completo desde el punto de vista económico. Sin embargo, aunque se conoce la forma de la curva, es muy difícil definiría cuantitativamente para una decisión cualquiera. Las escalas, como es lógico suponer, son diferentes para cada caso; tanto para lo que se refiere a los costos como a los tiempos. El costo de la decisión atrasada es tanto más difícil de cuantificar cuanto más complejo sea el sistema en el cual se hace la decisión, ya que un atraso en una decisión no suele afectar exclusivamente a una actividad, sino a un conjunto de actividades directa o indirectamente conectadas a ella.

Decisiones Correctivas. -A lo largo del tiempo de ejecución del proyecto y mediante los mecanismos de control podemos detectar desviaciones significativas entre lo planeado y lo real. Estas desviaciones deberán corregirse tomando una serie de decisiones que tiendan a colocar el proyecto en su ejecución correcta. Esta serie de decisiones correctivas pueden originar una modificación completa de la planeación o sea una replaneación del proceso. En el caso de estas decisiones es particularmente importante que sean oportunas, pues en caso de dilaciones el costo de la decisión atrasada se eleva muy rápidamente con el tiempo, puesto que el proyecto está en marcha.

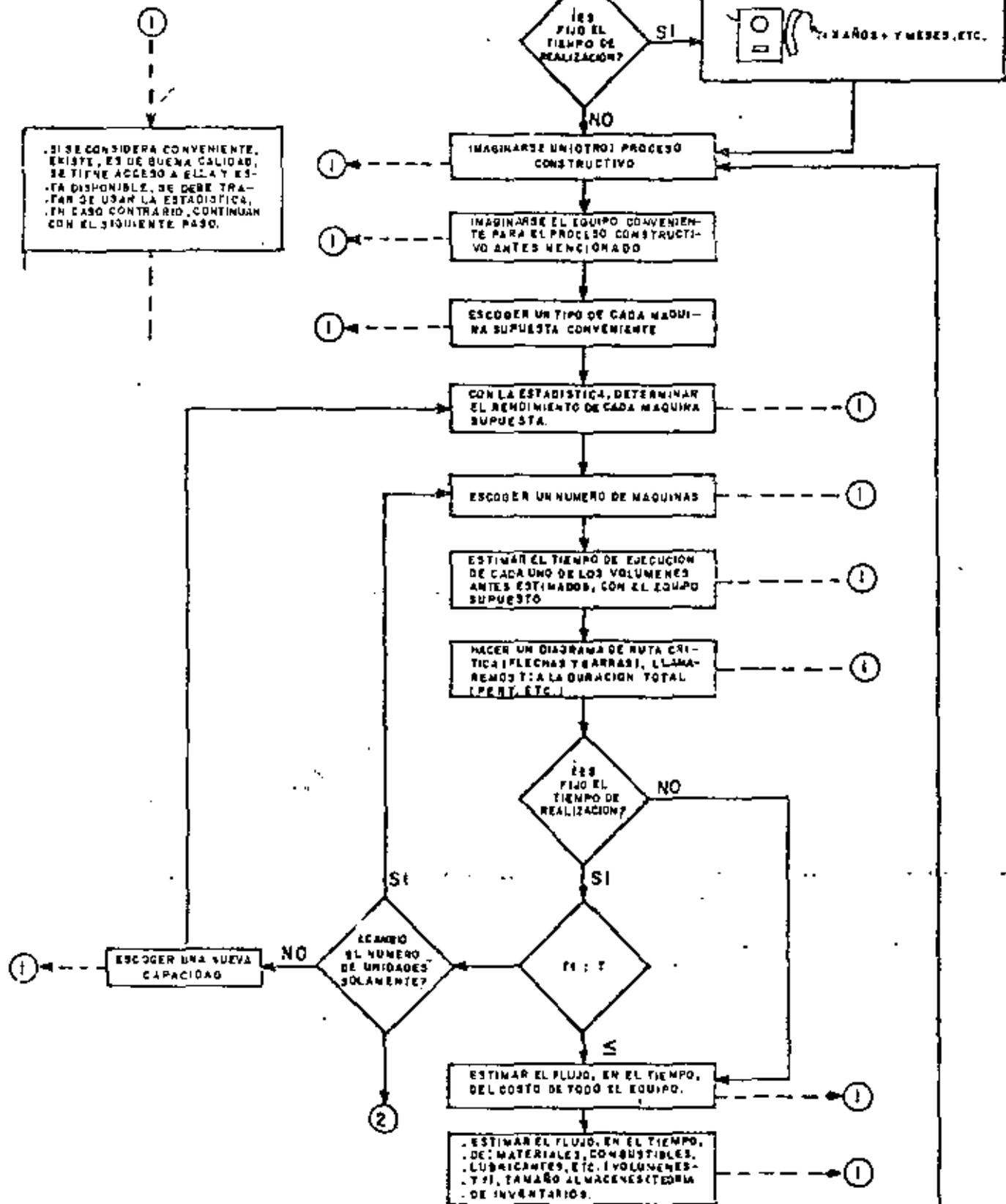
## XVI DECISIONES CON VARIABLES ALEATORIAS.

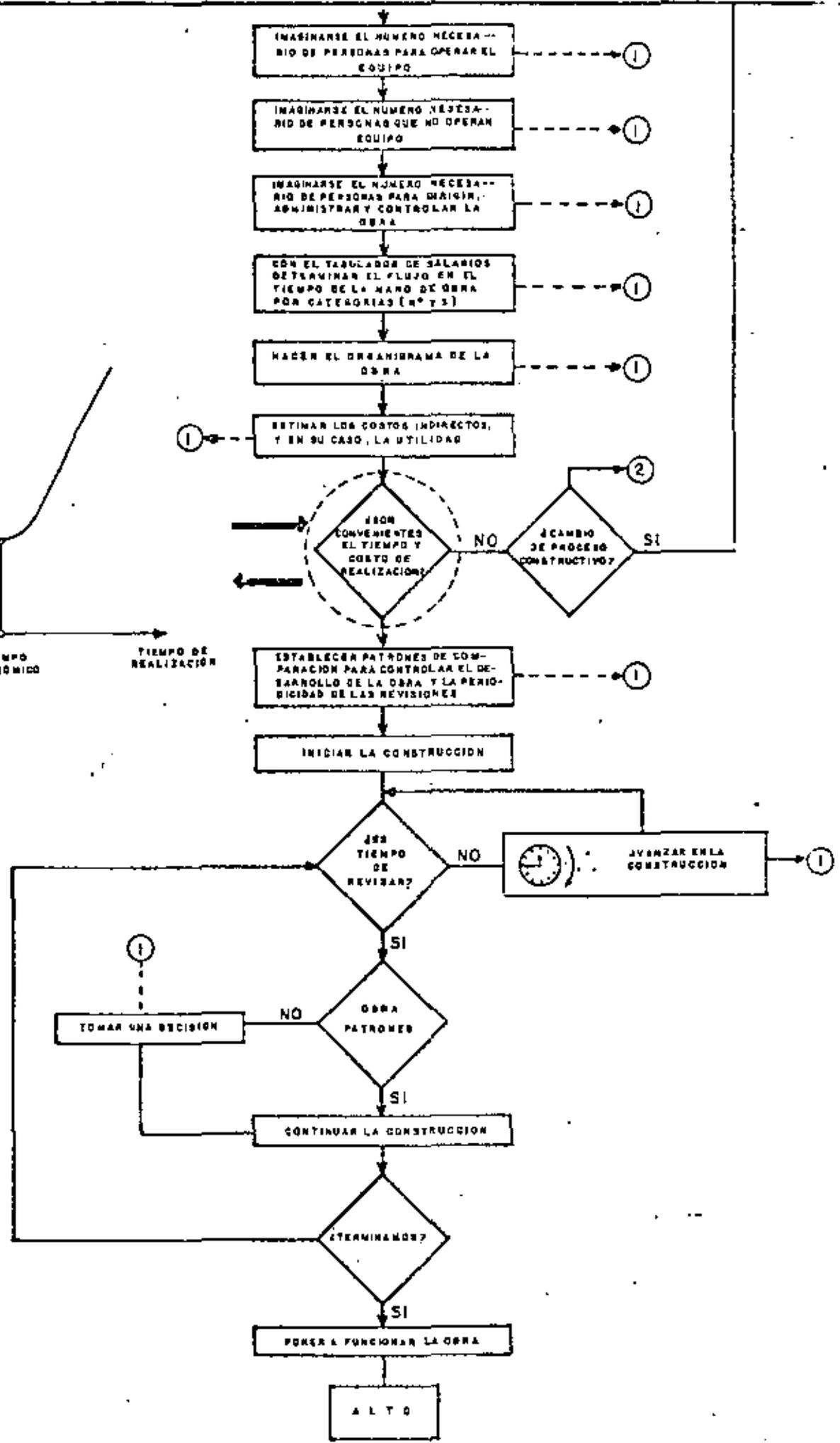
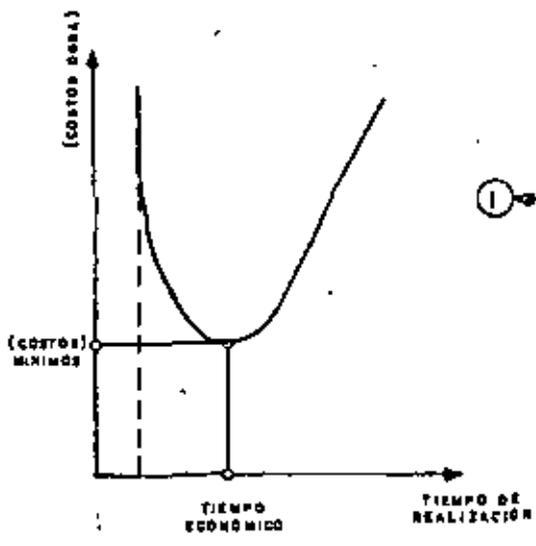
### a. Generalidades.

En todos los problemas a que se enfrenta el Ingeniero Civil existe un grado de incertidumbre principiando por la información que recibe, las condiciones del medio ambiente etc.

El concepto probabilidad es conocido por todo el mundo y su definición ha variado en el transcurso del tiempo. La definición matemática de la probabilidad no pertenece a este curso y en su lugar se puede hablar de probabilidad como la frecuencia relativa de éxito en un experimento, de forma que es el cociente del número de eventos favorables dividido entre el número total de eventos del experimento. De esta definición se puede de inmediato concluir que la probabilidad variará entre cero y uno incluyendo ambos valores, pero que no puede tomar ningún otro valor menor de cero o mayor de uno.

EXPERIENCIA= ESTADISTICA MENTAL





Certeza probabilista es la que se tiene con respecto a un fenómeno o -- evento cualquiera con probabilidad de ocurrencia = 1. (Evento seguro).

Sin embargo, dentro de los sistemas - obra es muy difícil encontrar - - eventos cuya probabilidad de ocurrencia sea uno. Esto nos dirige hacia la - utilización de técnicas que tomen en cuenta el aspecto probabilista de los - fenómenos que maneja. Esto no quiere decir que el ingeniero trate todos los problemas en forma probabilista, sino que cuando menos tenga en cuenta el as- pecto probabilista y lo utilice cuando el problema por su importancia se lo\_ exija.

Muy relacionados con los aspectos de probabilidad están los conceptos - de riesgo e incertidumbre. En realidad ambos reflejan el punto de vista pro- babilista de los problemas y no hay distinción clara entre ambos conceptos. - Mientras algunos autores los consideran equivalentes, otros establecen una - distinción, la que adoptaremos aquí: El análisis del riesgo lo utilizaremos\_ en aquellos casos en que existan eventos probabilistas, pero sus caracterís- ticas (la más importante es la distribución de probabilidad) se conocen; -- mientras que la incertidumbre existe en aquellos casos en que no se conocen\_ las características probabilistas de un fenómeno.

## XVII DECISIONES A NIVEL DE OBRA.

### a) Minimizando costo directo.

Este es un método comúnmente usado en la obra para definir el equipo - adecuado y en general tomar la decisión de qué procedimiento debe usarse en\_ una obra determinada. Tiene la ventaja de su simplicidad, pero considera co- mo sistema la actividad específica a analizar y no considera la relación de\_ las diferentes actividades o sistemas de la obra entre sí.

Es costumbre relacionar a posteriori las actividades similares para bus- car una optimización posterior. Por ejemplo todas las actividades que se re- fieran a compactación.

### b) Considerando gastos indirectos.

Puede considerarse el sistema obra completa, lo cual es complicado, pe- ro más comúnmente se consideran algunas variables significativas que tienen\_ que ver con gastos generales y se controlan como tales. Por ejemplo conside- rar el Costo del Almacén, Costo Financiamiento, etc.

### c) Flujo de información.

Se adjunta flujo de actividades para evaluar una alternativa, este flu-

jo es de carácter general y tendrá las modificaciones que el tipo especial - de obra indique. La decisión del tipo de equipo puede hacerse repitiendo la evaluación alternativa por alternativa seleccionando la más conveniente desde el punto de vista económico. Es común este sistema.

### XVIII DECISIONES A NIVEL GERENCIA.

Las decisiones a nivel gerencia se tomarán considerando el sistema-em presa. En este sistema las obras son subsistemas.

Es común que una decisión a nivel de gerencia modifique una decisión aparentemente óptima considerando el sistema obra. Esto si no es explicado adecuadamente puede ocasionar problemas serios entre las relaciones ejecutor gerente; pues aparece como contradictorio el hecho de que se proponga una solución a nivel de obra, que ha sido convenientemente analizada y la decisión sea diferente y en apariencia menos convenientes.

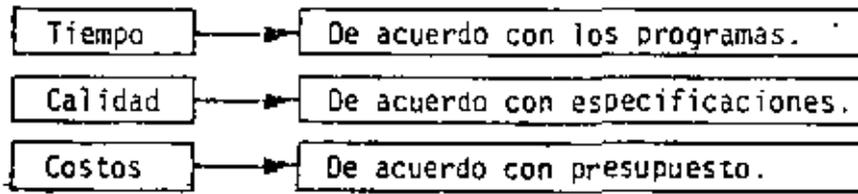
Es difícil aplicar un método cuantitativo que tome en cuenta todas las variables significativas. Sin embargo se consideran algunas que son de especial relevancia, por ejemplo los aspectos financieros.

En resumen podríamos plantear las tres preguntas que se indican a continuación y buscar su solución.

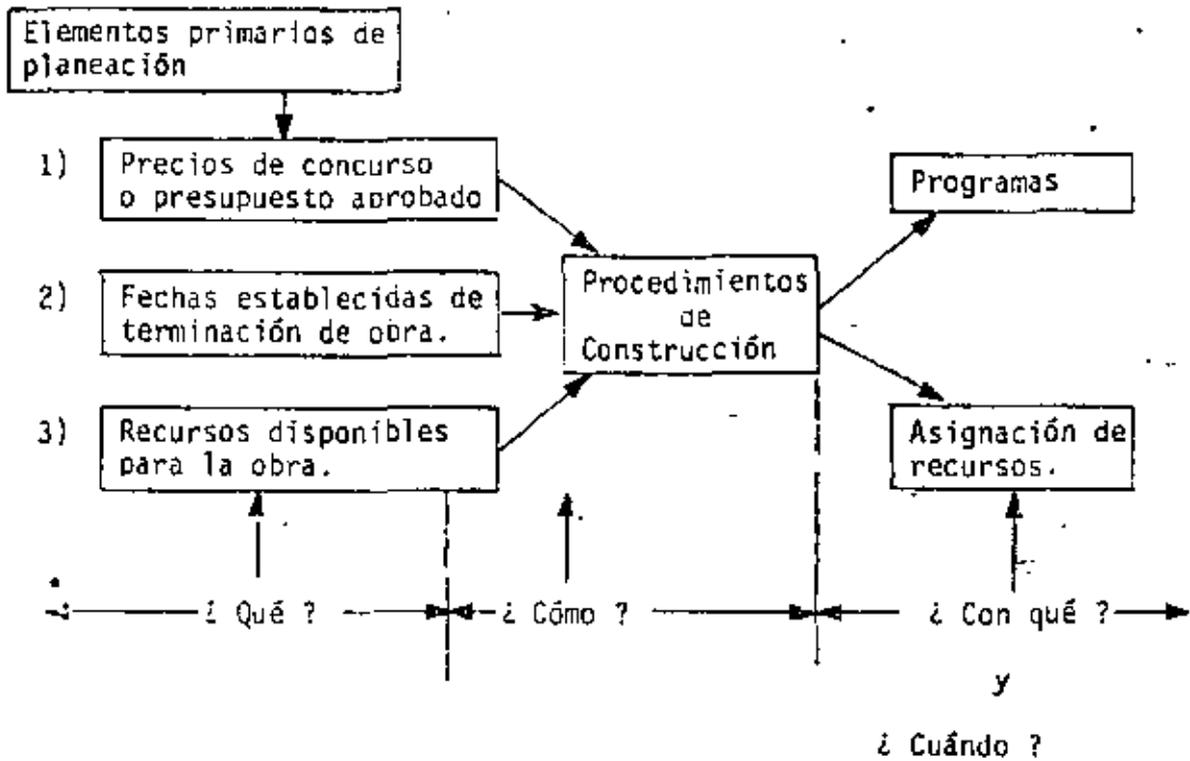
#### ¿Qué hay que planear?

- |                     |   |
|---------------------|---|
| 1) Programas        | { De Obra<br>De Recursos<br>De Egresos<br>De Ingresos |
| 2) Costos           | { De Recursos<br>De Conceptos de Obra.<br>Indirectos. |
| 3) Especificaciones | { De Materiales<br>De Resultados<br>De Medición.      |

¿ Qué hay que controlar ?



¿ Cómo planear ?





centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de Ingeniería, unam



CURSO: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS

TEMA: SUB-BASES Y BASES

ING. ALFREDO GUERRA GUAJARDO



## SUBBASES Y BASES.

Definimos como subbase y base a las capas sucesivas de material seleccionado que se construyen sobre la subrasante, cuya función es soportar las cargas rodantes y transmitir las a las terracerías, distribuyéndolas de manera que no se produzcan deformaciones perjudiciales en éstas.

Nuestro objetivo será señalar el procedimiento de construcción más apropiado en nuestro país, para la elaboración, transportación, tendido, afina -- miento y compactación de subbases y bases.

Desde el punto de vista de procedimientos de construcción, es indistinto referirse a la subbase o a la base, pues los procedimientos para construir -- una y otra son los mismos.

En México, las subbases y bases se construyen, en general, con un mate -- rial seleccionado mezclado con: cemento natural y agua, cemento y agua, cal y agua, emulsión asfáltica, o asfalto fluxuado. Las más usuales son las cons -- truidas con un material seleccionado mezclado con cementante natural y agua, -- y aquéllas en las que el material seleccionado se mezcla con emulsión asfálti -- ca.

Algunas veces, los pavimentos se diseñan con una capa de concreto asfál -- tico elaborada en planta estacionaria, a la que se llama base por construirse a todo lo ancho de la corona y por no usarse como superficie de rodamiento. -- No nos referiremos a este caso especial porque su estudio corresponde al capí -- tulo de carpetas asfálticas elaboradas en planta estacionaria.

### I.- OBTENCIÓN Y TRATAMIENTO DE LOS INGREDIENTE PETREOS.

En nuestro país, los materiales pétreos para subbase y base se obtienen: en forma natural, por disgregado, por cribado, o por trituración y cribado. -- Los procesos para la obtención y el tratamiento de los ingredientes pétreos -- no serán objeto de este estudio; sin embargo, sólo deseo insistir que para el caso de trituración el equipo que en la mayoría de los casos es el más conve -- niente, debe constar de conos y no de rodillos como anteriormente se venía -- usando en forma casi generalizada en el país.

### II.- ELABORACIÓN DE SUBBASE Y BASE.

La planta mezcladora de subbase y base constituye la herramienta más -- apropiada para realizar el mezclado de los materiales. A pesar de lo anterior, en México este mezclado todavía se hace, en la mayoría de los casos, utilizan -- do motocombinadora.

Todos los tipos de subbase y base, exceptuando el que se construye con un material seleccionado mezclado con asfalto fluxuado, es muy conveniente -- procesarlos en plantas mezcladoras de subbase y base.

Estas plantas mezcladoras son del tipo volumétrico y constan de lo siguiente: alimentador(es), desgrumador de cementante, unidad mezcladora de una o dos flechas, bomba de agua de gasto variable y/o bomba de emulsión asfáltica también de gasto variable.

En realidad el procedimiento consiste en:

- 1.- Proporcionar por medio de alimentadores, cada uno de los materiales y, por medio de bombas, el agua o la emulsión asfáltica.
- 2.- Reunir en una tolva, una vez dosificados, los materiales y el agua o, si tal es el caso, la emulsión asfáltica.
- 3.- Mezclar y homogeneizar los ingredientes utilizando flechas provistas de paletas.

La decisión más importante, después de haber determinado la capacidad de la planta mezcladora por adquirir, es la selección del tipo de alimentador(es). Exceptuando la alimentación de cemento y cal, que siempre debe hacerse con -- tornillos sinfín, en una planta mezcladora se puede considerar la utilización de cualquiera de los tres tipos de alimentador que se mencionan a continuación:

- 1.- Alimentador de banda de velocidad variable (el más exacto de los -- tres), utilizado para alimentar materiales finos o muy finos en volumen de regular cuantía. El flujo de material se regula por medio de ajuste de la compuerta de entrada y/o por medio de la velocidad de la banda.
- 2.- Alimentador de mandil (el de más alto costo de los tres), utilizable donde se requiera soportar cargas por impacto y donde sea necesario alimentar materiales gruesos y abrasivos en volumen de gran cuantía. El flujo de material se regula por medio de ajuste de la compuerta de entrada.
- 3.- Alimentador de plato reciprocante (el de más bajo costo de los tres), utilizable para alimentar materiales húmedos de todos tamaños en volúmenes que pueden ser de gran cuantía. El flujo se regula por medio de ajuste de la compuerta de entrada y/o por medio de la mayor o menor longitud del brazo del excéntrico y/o por medio de la velocidad.

Podría ser que para un mismo caso hubiera la posibilidad de escoger más de un tipo de alimentador.

La construcción de subbase y base con planta mezcladora, tiene las siguientes ventajas sobre el procedimiento de mezclado por medio de motoconformadora:

- 1.- Proporcionamiento volumétrico exacto.
- 2.- Homogeneidad de la mezcla.
- 3.- Ahorro, cuidando de no incurrir en acarrees muertos cuantiosos. -- Aquí debe entenderse por acarreo muerto aquél cuyo pago cubre el -- contratista y no el contratante. De acuerdo con las Especificaciones Generales de Construcción, la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas paga el acarreo de los materiales como si estos se acarrearán directamente de los bancos a la carretera o a la aeropista. En general y por razón lógica, la planta mezcladora de subbase y base debe instalarse en el banco en donde se va a necesitar mayor cantidad de material. Podría ser el caso que, además del material del banco donde se instale la planta mezcladora, se requiera otros materiales, cementante por ejemplo, y que el banco estuviera localizado en tal forma que en su acarreo a la planta mezcladora, se incurriera en un acarreo muerto de una magnitud tal que hiciera incosteable producir la subbase o la base en planta mezcladora. En este caso, desde luego, la mezcla debe hacerse directamente en la carretera o en la aeropista utilizando motoconformadora.
- 4.- Menor interrupción al tránsito. Tratándose de carreteras, se entiende que al no necesitarse motoconformadoras para mezclar en el camino, el tránsito de vehículos usuarios será más fluido.
- 5.- Mejor utilización del equipo de compactación. Cuando se usa planta mezcladora, se pueden ir tendiendo pequeños tramos de 200 m conforme se va completando el volumen y empezar así, la compactación desde casi el principio del tendido.
- 6.- Menos perjuicios por causa de lluvia. Esto es obvio si se considera que casi todo el volumen que se acarrea a la obra puede ser tendido y compactado prácticamente de inmediato.
- 7.- Mejor control general de la obra. Es entendible que es más fácil controlar plantas que máquinas (motoconformadoras), que se encuentran repartidas para atender las demandas que una obra requiere en sus diferentes etapas.

Naturalmente que para que se pueda disfrutar de las ventajas 5, 6 y 7 y por lo tanto de ahorro global, es necesario que la producción se organice en forma rutinaria y masiva.

A continuación se hace un estudio comparativo de los elementos de costo que varían, utilizando, por un lado, motoconformadora para mezclar y, por otro, planta mezcladora.

A) Motoconformadora.

1.- Revoltura

motoconformadora 12; \$ 526.52/hr

producción 54 m<sup>3</sup>/hr.

$$\frac{\$ 526.52/\text{hr.}}{54 \text{ m}^3/\text{hr.}} = \$ 9.75/\text{m}^3$$

2.- Agua.

Extracción y acarreo del agua \$ 30.00/m<sup>3</sup>

$$\$ 30.00/\text{m}^3 \text{ agua} \times 200 \text{ lt agua}/\text{m}^3 = \$ 6.00/\text{m}^3$$

1.- \$ 9.75/m<sup>3</sup>

2.- 6.00

---

$$\$ 15.75/\text{m}^3 (1)$$

B) Planta mezcladora de subbase y base.

1.- Elaboración de la mezcla en planta

tractor D7, 7U, 7 \$ 856.12/hr

planta mezcladora de subbase y base 1,131.09

alimentador de banda de 24" 61.49

disgregador de grumos 32.19

planta de luz de 75 KW 103.75

pipa de agua de 8 000 lt. 199.94

---

$$\$ 2,384.58/\text{hr.}$$

producción 200 m<sup>3</sup> sueltos/hr.

$$\frac{\$ 2,384.58/\text{hr.} \times 1.35}{200 \text{ m}^3/\text{hr.}} = \$ 16.09/\text{m}^3$$

- 2.- Extracción del agua que se incorporará en la planta mezcladora  
\$ 4.00/m<sup>3</sup> agua.

$$\text{\$ } 4.00/\text{m}^3 \text{ agua} \times 150 \text{ lt}/\text{m}^3 = \text{\$ } 0.60/\text{m}^3.$$

- 3.- Agua para compactación que se acarrea al camino.  
Extracción y acarreo del agua \$ 30.00/m<sup>3</sup> agua.  
\$ 30.00/m<sup>3</sup> agua x 50 lt/m<sup>3</sup> = \$ 1.50/m<sup>3</sup>.

|     |                         |     |
|-----|-------------------------|-----|
| 1.- | \$ 16.09/m <sup>3</sup> |     |
| 2.- | 0.60                    |     |
| 3.- | 1.50                    |     |
|     | <hr/>                   |     |
|     | \$ 18.19/m <sup>3</sup> | (2) |

Este aparente encarecimiento del:

$$\frac{(2) \text{\$ } 18.19/\text{m}^3 - (1) \text{\$ } 15.75/\text{m}^3}{(1) \text{\$ } 15.75/\text{m}^3} = 15\%$$

que se obtiene usando el procedimiento de mezclado en planta contra el de mezclado con motoconformadora, es absorbido con margen, por los ahorros que se obtienen como consecuencia de las ventajas 5, 6 y 7 antes señaladas.

### III.- TRANSPORTACION.

Una vez elaborada la mezcla en planta, los camiones de volteo son cargados por gravedad mediante la apertura de las compuertas de la tolva de descarga.

Pensando en acarreos no mayores de 20 km es usual que, para un trabajo de pavimentación en el que la subbase y la base se produzcan en planta mezcladora de 150 Ton/lt de capacidad y la carpeta asfáltica en planta de 3000 lb/pesada de capacidad, se requieran hasta 300 camiones de volteo de 6 m<sup>3</sup> de capacidad. Sería absurdo adquirir camiones de volteo para satisfacer las demandas que se requieren en trabajos organizados a base de plantas, la inversión sería altísima y el control de los camiones prácticamente imposible. Si por alguna circunstancia no se contara con el número necesario de camiones, el trabajo se encarecería extraordinariamente. Para agilizar el pago de los ca-

miones, evitar errores y tener mejor control, es recomendable calcular los flujos por medio de computadora y utilizar, en lo posible, básculas de piso.

#### IV.- TENDIDO Y AFINADO.

El tendido y afinado de la subbase y base puede hacerse usando cualquiera de los siguientes procedimientos:

- 1.- Por el método tradicional utilizando motoconformadora estándar. Este es el procedimiento más barato y más inexacto, y cuando se aplica, el perfil, las secciones, los espesores y el acabado de la subbase y/o la base no cumplen con las tolerancias estipuladas en las Especificaciones Generales de Construcción de la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas.

La rigidez de las tolerancias en el tendido es creciente para los siguientes tipos de subbase y base.

- a.- Subbases y bases en carreteras.
- b.- Bases construidas por el sistema de estabilización en carreteras.
- c.- Subbases y bases en autopistas.

Las tolerancias para subbases y bases en carreteras que no se cumplen -- cuando el tendido se hace con motoconformadora son las siguientes:

|  | <u>Subbase</u> | <u>Base</u>   |
|--|----------------|---------------|
| Pendiente transversal  | <u>+ 1/2%</u>  | <u>+ 1'2%</u> |
| Profundidad de las depresiones, observadas colocando una regla de 3 m de longitud, paralela y normalmente al eje máximo. | 2 cm           | 1 1/2 cm      |

En espesores para carreteras, la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de las diferencias calculadas restando al espesor real obtenido en cada punto de prueba el espesor real promedio correspondiente a todos los puntos de prueba, siempre deberá ser igual o menor que 0.14 del espesor real promedio de la subbase, igual o menor que 0.12 del espesor real promedio de la base e igual o menor que 0.09 del espesor real promedio conjunto de subbase más base; además, el valor absoluto de la diferencia entre los espesores real y de proyecto, correspondiente al 84% como mínimo, de las determinaciones realizadas para la subbase, al 90% como mínimo, de las determinaciones realizadas para la base y al 95% como mínimo, en el caso del conjunto de subbase más base, siempre deberá ser igual o menor que el 20% de los espesores de proyecto.

- 2.- Por medio de una extendedora de carpeta asfáltica (finisher) equipada con control electrónico y dotada de un área de acabado suficiente para extender espesores hasta de 25 cm. Se extiende un área de acabado a la superficie máxima de la sección transversal que esta máquina es capaz de extender y así se dirá; por ejemplo, que la extendedora Barber Greene SA35 tiene un área de acabado de 0.3855 m<sup>2</sup>, que la SB41, 0.5881 m<sup>2</sup> o que la SB 140, 2.2296 m<sup>2</sup>.

Este procedimiento es muy recomendable para subbases y bases estabilizadas con cemento, con cal, o con emulsión asfáltica. Es un sistema muy práctico para extender subbase y base, en caminos en operación y con fuerte tránsito, porque no se tiene necesidad de interrumpir éste en lo más mínimo ya que el extendido y compactado puede hacerse, como se hace con la carpeta, por alas.

Sin embargo, el gran desgaste de la extendedora, cuando no se maneja un producto asfáltico, hace que este procedimiento resulte caro, no obstante que elimina la eventualidad de camellones saturados por lluvias imprevistas y que hace trabajar muy eficientemente al equipo de compactación.

- 3.- Por medio de una máquina afinadora extendedora del tipo CMI equipada con sistema de control electrónico. La presencia de tránsito, el ancho de la corona, los alineamientos vertical y horizontal y, su alto costo hacen que la aplicación de esta máquina, en las carreteras de nuestro país, sea un tanto difícil. La ausencia de tránsito y las características geométricas de los aeropuertos permiten, en ellos, la aplicación exitosa de esta máquina.

## V. COMPACTACION.

El costo de compactación representa una muy pequeña parte del costo total de la obra. A cambio de esto, la compactación tiene una decisiva influencia en la calidad y tiempo de vida de la obra. Una compactación eficiente incrementa sustancialmente el valor soporte y la estabilidad del material, mejora la impermeabilidad en la mayoría de los casos y prácticamente elimina los asentamientos. Así, la compactación hace al suelo capaz de soportar las cargas de los vehículos y reduce sustancialmente los costos de mantenimiento.

La compactación de subbase y base ha tenido una evolución muy importante con la introducción de compactadores vibratorios autopropulsados.

Actualmente, para compactar la producción de una planta mezcladora de subbase y base de 540 Ton/hr de capacidad, se requiere de un compactador vibratorio autopropulsado de 9 Ton. de peso estático compuesto de un solo rodillo, y de un compactador neumático autopropulsado de 11 Ton con llantas de 90 psi. El compactador neumático se utiliza no por falta de capacidad de produc

ción del compactador vibratorio, sino porque éste no puede orillarse lo suficiente para compactar los hombros del pavimento. El compactador vibratorio - autopropulsado cuenta con la tracción suficiente para compactar espesores hasta de 25 cm, lo que hace que el número de capas de pavimento reduzca.

El costo de compactación de subbase y base utilizando el equipo antes mencionado es como sigue:

|   |           |
|---|-----------|
| Compactador vibratorio CA25A llantas tracción | \$ 426.41 |
| Compactador neumático SP548D                  | 478.02    |
|   | <hr/>     |
|   | \$ 904.43 |

$$\frac{\$ 904.43/\text{hr} \times 1.35}{200 \text{ m}^3/\text{hr}} = \$ 6.10/\text{m}^3$$

Las ventajas principales de este método de compactación son las siguientes:

- 1.- Bajo costo.
- 2.- Menos interrupción al tránsito.
- 3.- Estabilización de equipo para compactar tanto subbase y base como carpeta asfáltica.

Alimentador de banda de 24" por 6'6" (Barber Greene F8-A), de velocidad variable, motor de 2HP, peso 800 kg. Depreciación 8000 hr, 200 hr/mes y 6 me ses/año.

Valor de la máquina (1) lab. Tepexpan, Méx.

Valor de \_\_\_\_\_ \$ 15710000

Valor de \_\_\_\_\_

Valor de la máquina (2) sin \_\_\_\_\_ \$

Valor de rescate

Valor neto de depreciación (3) \$ 15710000

**COSTO DE TENENCIA**

1 Depreciación  $\frac{\text{Valor neto de depreciación (3)} \ \$157,100.00}{\text{Periodo de depreciación} \ 8,000 \text{ hr.}} = \$ \ 1964$

2 Intereses y seguro

Tasa anual: Intereses 15%, Seguro 2%

Uso anual: 1200 hr

$\frac{\text{Factor x Valor de la máquina (1)}}{1000} \quad \frac{0.0828 \times \$ 157,100.00}{1000} = \ 1301$

Costo de tenencia \$ 3265

**COSTO DE OPERACION**

|                  | Consumo<br>horario   | Costo unitario  |
|------------------|----------------------|-----------------|
| 3 Combustible    |                      |                 |
| Combustoleo      | _____ lt. x \$ _____ | /lt. = \$ _____ |
| Diesel           | _____ lt. x _____    | /lt. = _____    |
| Gasolina         | _____ lt. x _____    | /lt. = _____    |
| Petróleo diáfano | _____ lt. x _____    | /lt. = _____    |

Combustible

\$ \_\_\_\_\_

4 Lubricantes grasas y filtros

|                 | Consumo<br>horario | Costo unitario |           |
|-----------------|--------------------|----------------|-----------|
| Aceite diesel   | 0.01 lt.           | \$ 13.42/lt.   | = \$ 0.13 |
| Aceite gasolina | 1t.                | /lt.           | =         |
| Aceite meropa   | 1t.                | /lt.           | =         |
| Aceite térmico  | 1t.                | /lt.           | =         |
| Hidráulico      | 1t.                | /lt.           | =         |
| Mandos finales  | 1t.                | /lt.           | =         |
| Transmisión     | 1t.                | /lt.           | =         |
| Grasa           | 0.01 lt.           | 14.41/lt.      | = 0.14    |
| Grasa Compound  | 1t.                | /lt.           | =         |
| Grasa coples    | 1t.                | /lt.           | =         |
| Filtros         |                    |                | =         |

Lubricantes, grasas y filtros

\$ 028

5 LLantas  $\frac{\text{Costo de cambio de llantas}}{\text{Horas de vida de las llantas}}$  \$                      / hr.

6 Reparaciones

Factor rep. x Valor de la máquina (1)  $\frac{1.2 \times \$ 157,100.00}{8,000 \text{ hr.}}$  = 2356

7 Conceptos especiales

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Conceptos especiales

Costo de operación \$ 2384

8 Salario(s) horario(s) \_\_\_\_\_

9 Flete de Tepexpan, Méx. a la obra y regreso \$ 6,000.00/1200/hr 500

COSTO DE LA HORA MAQUINA \$ 6149

Camión pipa Chevrolet CS61703, motor de 170 HP a 2300 RPM, capacidad 8m<sup>3</sup>. peso 3276 kg (chasis 2426 kg, tanque 850 kg). Depreciación 8000 hr, 150 hr/mes y 8 meses/año.

|        |                      |
|--------|----------------------|
| Chasis | \$ 179,067.00        |
| Tanque | 44,590.00            |
|        | <u>\$ 223,657.00</u> |

|   |             |
|---|-------------|
| Valor de la máquina (1) lab. Tepexpan, Méx. | \$ 22370000 |
| Valor de las llantas                        |             |
| 6 (900 x 20) 10 a \$ 3,060.00               |             |

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| Valor de las llantas                | \$ 1836000 |
| Valor de la máquina (2) sin llantas | 20534000   |
| Valor de rescate                    | 2000000    |
| Valor neto de depreciación (3)      | 18534000   |

**COSTO DE TENENCIA**

|                                  |   |         |
|----------------------------------|---|---------|
| 1 Depreciación                   | $\frac{\text{Valor neto de depreciación (3)} \$ 185,340.00}{\text{Valor de depreciación } 8,000 \text{ hr.}}$ | 2317    |
| 2 Intereses y seguro             |   |         |
| Tasa anual:                      | Intereses 15%, Seguro 2%.   |         |
| Uso anual:                       | 1200 hr.  |         |
| Factor x Valor de la máquina (1) | $\frac{0.0828 \times \$ 223,700.00}{1000}$  | 1852    |
| Costo de tenencia.               |   | \$ 4169 |

**COSTO DE OPERACION**

|                  | Consumo<br>horario | Costo unitario |         |
|------------------|--------------------|----------------|---------|
| 3 Combustible    |                    |                |         |
| Combustoleo      | lt. x \$           | /lt. = \$      |         |
| Diésel           | lt. x              | /lt. =         |         |
| Gasolina         | 15 lt. x           | 2.80 /lt. =    | 42.00   |
| Petróleo diáfano | lt. x              | /lt. =         |         |
| Combustible      |                    |                | \$ 4200 |

4 Lubricantes, grasas y filtros

|                 | Consumo<br>horario | Costo unitario |      |
|-----------------|--------------------|----------------|------|
| Aceite diesel   | lt. x              | \$ /lt. =      | \$   |
| Aceite gasolina | 0.115 lt. x        | 14.61/lt. =    | 1.68 |
| Aceite meropa   | lt. x              | /lt. =         |      |
| Aceite térmico  | lt. x              | /lt. =         |      |
| Hidráulico      | lt. x              | /lt. =         |      |
| Mandos finales  | lt. x              | /lt. =         |      |
| Transmisión     | 0.04 lt. x         | 10.10/lt. =    | 0.40 |
| Grasa           | 0.025 kg. x        | 14.41/kg. =    | 0.36 |
| Grasa compound  | kg. x              | /kg. =         |      |
| Grasa coples    | kg. x              | /kg. =         |      |
| Filtros         | \$ 65.00/200 hr    | =              | 0.32 |

Lubricantes, grasas y filtros \$ 277

5 Llantas  $\frac{\text{Costo de cambio de llantas } \$ 18,360.00}{\text{Horas de vida de las llantas } 750 \text{ hr.}} = 2448$

6 Reparaciones

$\frac{\text{Factor rep. x Valor de la máquina (2) } 1.0 \times \$ 205,340.00}{\text{Período de depreciación } 8,000 \text{ hr.}} = \$ 2567$

7 Conceptos especiales

---



---



---



---

Conceptos especiales

Costo de operación \$ 9492

8 Salario(s) horario(s) 1 chofer \$ 8,500.00/mes  
5667

9 Flete de Tepexpan, Méx., a la obra y regreso \$8,000.00/1200 hr 666

COSTO DE LA HORA MAQUINA \$ 19994

Compactador neumático de 9 ruedas Bros SP54BD motor Ford 592E inglés - -  
 (x 220 americano) de 55 HP a 2000 RPM, peso vacío 3470 kg, lastrado 11340 kg.  
 Depreciación 12000 hr, 125 hr/mes y 8 meses/año.

Valor de la máquina (1) lab. Tepexpan, Méx. \$ 5660000

Valor de las llantas

9 (7.50 x 15) 10 90 psi a \$ 11,700.00

Valor de las llantas 1830000

Valor de la máquina (2) sin llantas 5507000

Valor de rescate 1000000

Valor neto de depreciación (3) 4507000

**COSTO DE TENENCIA**

1 Depreciación  $\frac{\text{Valor neto de depreciación (3)}}{\text{Periodo de depreciación}} = \frac{\$ 450,700.00}{12000 \text{ hr.}} = \$ 3756$

2 Intereses y Seguro

Tasa anual: Intereses 15%, Seguro 2%.

Uso anual: 1000 hr.

$\frac{\text{Factor x Valor de la máquina (1)}}{1000} = \frac{0.0937 \times \$ 566,000.00}{1000} = 5303$

Costo de tenencia \$ 9059

**COSTO DE OPERACION**

|                  | Consumo<br>horario | Costo Unitario  |        |
|------------------|--------------------|-----------------|--------|
| 3 Combustible    |                    |                 |        |
| Combustóleo      | _____ lt. x \$     | _____ /lt. = \$ | _____  |
| Diesel           | 7.4 lt. x          | 0.65/lt. =      | 4.81   |
| Gasolina         | _____ lt. x        | _____ /lt. =    | _____  |
| Petróleo diáfano | _____ lt. x        | _____ /lt. =    | _____  |
| Combustible      |                    |                 | \$ 481 |

4 Lubricantes, grasas y filtros.

|                 | Consumo<br>Horario | Costo unitario          |
|-----------------|--------------------|-------------------------|
| Aceite diesel   | 0.13 lt. x         | \$ 13.43 /lt. = \$ 1.74 |
| Aceite gasolina | lt. x              | \$ /lt. = \$            |
| Aceite meropa   | lt. x              | \$ /lt. = \$            |
| Aceite térmico  | lt. x              | \$ /lt. = \$            |
| Hidráulico      | 0.08 lt. x         | \$ 14.61 /lt. = \$ 1.17 |
| Mandos finales  | lt. x              | \$ /lt. = \$            |
| Transmisión     | 0.03 lt. x         | \$ 14.49 /lt. = \$ 0.43 |
| Grasa           | 0.03 kg. x         | \$ 14.41 /kg. = \$ 0.43 |
| Grasa Compound  | kg. x              | \$ /kg. = \$            |
| Grasa coples    | kg. x              | \$ /kg. = \$            |
| Filtros         |                    | = \$ 1.20               |

Lubricantes, grasas y filtros \$ 498

5 Llantas  $\frac{\text{Costo de cambio de llantas } \$ 15,300.00}{\text{Horas de vida de las llantas } 2,000 \text{ hr.}}$  765

6 Reparaciones

$\frac{\text{Factor rep. x Valor de la máquina (2) } 0.8 \times \$ 550,700.00}{\text{Periodo de depreciación } 12,000 \text{ hr.}}$  = 3671

7 Conceptos especiales

|  |  |  |
|--|--|--|
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

Conceptos especiales

Costo de operación \$ 5415

8 Salario(s) horario(s) 1 operador \$ 10,410.00/mes 8328

9 Flete de Tepexpan, Méx., a la obra y regreso \$ 25,000.00/100 hr. 25000

COSTO DE LA HORA MAQUINA \$ 47802

Compactador Dynapac CA25A motor Cat D3145 de 125 HP a 2400RPM, llantas - de tracción, ancho del rodillo 2.13 m (84"), peso 9208 kg. Depreciación - 12000 hr., 200 hr/mes y 6 meses/año.

|   |              |
|---|--------------|
| Valor de la máquina (1) lab. Tepexpan, Méx. | \$ 135400000 |
| Valor de las llantas                        |              |
| 2 (23.1 x 18) a \$ 10,900.00                |              |
| <hr/>                                       |              |
|   | 2180000      |
| Valor de las llantas                        | 2180000      |
| Valor de la máquina (2) sin llantas         | 133220000    |
| Valor de rescate                            | 25000000     |
| Valor neto de la depreciación (3)           | 108220000    |

COSTO DE LA TENENCIA

|                                      |  |           |
|--------------------------------------|--|-----------|
| 1 Depreciación                       | $\frac{\text{Valor neto de depreciación(3)} \ \$1'082,200.00}{\text{Período de depreciación} \ 12000 \text{ hr.}}$ | = \$ 9018 |
| 2 Intereses y seguro                 |  |           |
| Tasa anual: Intereses 15%, Seguro 2% |  |           |
| Uso anual: 1200 hr.                  |  |           |
| Factor x Valor de la máquina (1)     | $\frac{0.0792 \times \$ 1'354,000.00}{1000}$   | = 10724   |
| Costo de tenencia                    |  | \$ 19742  |

COSTO DE OPERACION

|                  | Consumo<br>horario | Costo unitario |         |
|------------------|--------------------|----------------|---------|
| 3 Combustible    |                    |                |         |
| Combustible      | lt. x \$           | /lt. = \$      |         |
| Diesel           | 20 lt. x \$        | 0.65/lt. = \$  | 13.00   |
| Gasolina         | lt. x \$           | /lt. = \$      |         |
| Petróleo diáfano | lt. x \$           | /lt. = \$      |         |
| Combustible      |                    |                | \$ 1300 |

|   |  |                              |                 |           |
|---|--|------------------------------|-----------------|-----------|
| 4 | Lubricantes, grasas y filtros                |                              |                 |           |
|   |  | Consumo<br>horario           | Costo unitario  |           |
|   | Aceite diesel                                | 0.221t.                      | x \$ 13.43/lt.  | = \$ 2.95 |
|   | Aceite gasolina                              | 1t.                          | x \$ /lt.       | = \$      |
|   | Aceite meropa                                | 1t.                          | x \$ /lt.       | = \$      |
|   | Aceite térmico                               | 1t.                          | x \$ /lt.       | = \$      |
|   | Hidráulico                                   | 1t.                          | x \$ /lt.       | = \$      |
|   | Mandos finales                               | 1t.                          | x \$ /lt.       | = \$      |
|   | Transmisión                                  | 0.1 lt.                      | x \$ 14.49 /lt. | = \$ 1.45 |
|   | Grasa  | 0.35 kg.                     | x \$ 14.41 /kg. | = \$ 5.04 |
|   | Grasa compound                               | kg.                          | x \$ /kg.       | = \$      |
|   | Grasa coples                                 | kg.                          | x \$ /kg.       | = \$      |
|   | Filtros                                      |                              |                 | = 1.46    |
|   | Lubricantes, grasas y filtros                |                              |                 | \$ 1091   |
| 5 | Llantas                                      | Costo de cambio de llantas   | \$ 21,800.00    |           |
|   |  | Horas de vida de las llantas | 2,000 hr.       | = 1090    |
| 6 | Reparaciones                                 |                              |                 |           |
|   | Factor rep. x Valor de la máquina (2)        | 0.9 x \$ 1'332,200.00        |                 |           |
|   | Período de depreciación                      |                              | 12,000 hr.      | = 7991    |
| 7 | Conceptos especiales                         |                              |                 |           |
|   | Conceptos especiales                         |                              |                 |           |
|   | Costo de operación                           |                              |                 | \$ 13472  |
| 8 | Salario(s) horario(s) 1 operador             | \$ 15,520.00/mes             |                 | 7760      |
| 9 | Flete de Tepexpan, Méx., a la obra y regreso | \$ 20,000.00/1200 hr         |                 | 1667      |
|   | COSTO DE LA HORA MAQUINA                     |                              |                 | \$ 42641  |

Disgregador de terrones Barber Greene con motor eléctrico de 10 HP, peso 800 kg. Depreciación 8000 hr., 200 hr/mes y 5 meses/año.

Valor de la máquina (1) lab. Tepexpan, Méx. \$ 7500000  
 Valor de \_\_\_\_\_

Valor de \_\_\_\_\_  
 Valor de la máquina (2) sin \_\_\_\_\_ \$  
 Valor de rescate  
 Valor neto de depreciación (3) \$ 7500000

**COSTO DE TENENCIA**

1 Depreciación  $\frac{\text{Valor neto de depreciación (3)} \$ 75,000.00}{\text{Período de depreciación } 8000 \text{ hr.}} = \$ 937$

2 Intereses y seguro

Tasa anual: Intereses 15%, Seguro 2%

Uso anual: 1000 hr.

$\frac{\text{Factor x Valor de la máquina (1)}}{1000} = \frac{0.0973 \times \$ 75,000.00}{1000} = \$ 730$

Costo de tenencia \$ 1667

**COSTO DE OPERACION**

|                  | Consumo<br>horario   | Costo unitario  |
|------------------|----------------------|-----------------|
| 3 Combustible    |                      |                 |
| Combustóleo      | _____ lt. x \$ _____ | /lt. = \$ _____ |
| Diesel           | _____ lt. x \$ _____ | /lt. = \$ _____ |
| Gasolina         | _____ lt. x \$ _____ | /lt. = \$ _____ |
| Petróleo diáfano | _____ lt. x \$ _____ | /lt. = \$ _____ |

Combustible \$

4 Lubricantes, grasas y filtros.

|                 | Consumo<br>horario | Costo unitario       |
|-----------------|--------------------|----------------------|
| Aceite diesel   | lt. x \$           | /lt. = \$            |
| Aceite gasolina | lt. x \$           | /lt. = \$            |
| Aceite meropa   | lt. x \$           | /lt. = \$            |
| Aceite térmico  | lt. x \$           | /lt. = \$            |
| Hidráulico      | lt. x \$           | /lt. = \$            |
| Mandos finales  | lt. x \$           | /lt. = \$            |
| Transmisión     | lt. x \$           | /lt. = \$            |
| Grasa           | 0.01 kg. x \$      | 14.41 /kg. = \$ 0.14 |
| Grasa compound  | kg. x \$           | /kg. = \$            |
| Grasa coples    | kg. x \$           | /kg. = \$            |
| Filtros         |                    | =                    |

Lubricantes, grasas y filtros. \$ 014

5 Llantas  $\frac{\text{Costo de cambio de llantas}}{\text{Horas de vida de las llantas}} = \frac{\$}{\text{hr.}}$

6 Reparaciones

$\frac{\text{Factor rep. x Valor de la máquina (1)}}{\text{Período de depreciación}} = \frac{1.0 \times \$ 75,000.00}{8000 \text{ hr.}} = 938$

7 Conceptos especiales

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Conceptos especiales.

Costo de operación \$ 952

8 Salario(s) horario(s) \_\_\_\_\_

9 Flete de Tepexpan, Méx., a la obra y regreso \$ 6,000.00/1000 hr. 600

COSTO DE LA HORA MAQUINA \$ 3219

Motoconformadora Cat 12F, motor D 333 NA de 115 HP a 2000 RPM, peso 12190 kg. Depreciación 12000 hr, 200 hr/mes y 8 meses/año.

Valor de la máquina (1) lab. Tepexpan, Méx. \$ 188600000

Valor de las llantas

6 (13.00 x 24) 12 a \$ 4,600.00

\$ 20,100.00

Valor de las llantas 4770000

Valor de la máquina (2) sin llantas \$ 183830000

Valor de rescate 36000000

Valor neto de depreciación (3) \$ 147830000

COSTO DE TENENCIA

1 Depreciación  $\frac{\text{Valor neto de depreciación (3)} \ \$1'478,300.00}{\text{Periodo de depreciación} \ 12000 \text{ hr.}} = \$ 12319$

2 Intereses y seguro

Tasa anual: Intereses 15%, Seguro 2%.

Uso anual: 1600 hr.

$\frac{\text{Factor x Valor de la máquina (1)} \ 0.0612 \times \$ 1'886,000.00}{1000} = \$ 11542$

Costo de tenencia \$ 23861

COSTO DE OPERACION

|                  | Consumo<br>horario | Costo unitario       |
|------------------|--------------------|----------------------|
| 3 Combustible    |                    |                      |
| Combustoleo      | lt. x \$           | /lt. = \$            |
| Diesel           | 25 lt. x \$        | 0.65 /lt. = \$ 16.25 |
| Gasolina         | lt. x \$           | /lt. = \$            |
| Petróleo diáfano | lt. x \$           | /lt. = \$            |

Combustible 1525

4 Lubricantes, grasas y filtros

|                 | Consumo<br>horario | Costo unitario |           |
|-----------------|--------------------|----------------|-----------|
| Aceite diesel   | 0.08 lt. x \$      | 13.43/lt.      | = \$ 1.07 |
| Aceite gasolina | lt. x \$           | /lt.           | = \$      |
| Aceite meropa   | lt. x \$           | /lt.           | = \$      |
| Aceite térmico  | lt. x \$           | /lt.           | = \$      |
| Hidráulico      | 0.08 lt. x \$      | 14.61/lt.      | = \$ 1.17 |
| Mandos finales  | 0.04 lt. x \$      | 10.10/lt.      | = \$ 0.40 |
| Transmisión     | 0.08 lt. x \$      | 14.49/lt.      | = \$ 1.16 |
| Grasa           | 0.04 kg. x \$      | 14.41/kg.      | = \$ 0.58 |
| Grasa compound  | kg. x \$           | /kg.           | = \$      |
| Grasa coples    | kg. x \$           | /kg.           | = \$      |
| Filtros         |                    |                | = \$ 2.19 |

Lubricantes, grasas y filtros.

\$ 657

5 Llantas  $\frac{\text{Costo de cambio de llantas}}{\text{Horas de vida de las llantas}} = \frac{\$ 27,600.00}{2000 \text{ hr.}} = 1380$

6 Reparaciones

$\frac{\text{Factor rep. x Valor de la máquina (2)}}{\text{Período de depreciación}} = \frac{0.8 \times \$ 1'838,300.00}{12000 \text{ hr.}} = 12255$

7 Conceptos especiales

|                                   |               |
|-----------------------------------|---------------|
| 2 cuchillas a \$ 1,011.08/200 hr. | = \$ 10.11/hr |
| 2 gavilanes a \$ 999.35/500 hr.   | = \$ 4.11/hr  |
| 17 puntas a \$ 166.06/200 hr.     | = \$ 14.11/hr |
| 17 patas a \$ 782.23/5000 hr.     | = \$ 2.66/hr. |

Conceptos especiales

3088

Costo de operación \$ 19006

8 Salario(s) horario(s) 1 operador \$ 15,820.00

7910

9 Flete de Tepexpan, Méx., a la obra y regreso \$ 30,000.00/1600 hr 1875

COSTO DE LA HORA MAQUINA

\$ 52652

Planta de luz (PL3) Cat D330 de 75 KW, motor D330 TAC de 150 HP a 1800 RPM, peso 1125 kg. Depreciación 12000 hr, 200 hr/mes y 8 meses/año.

|   |             |
|---|-------------|
| Valor de la máquina (1) lab. Tepexpan, Méx. | \$ 36560000 |
| Valor de _____                              |             |
| <hr/>                                       |             |
| Valor de _____                              |             |
| Valor de la máquina (2) sin _____           | \$          |
| Valor de rescate                            | 4000000     |
| Valor neto de depreciación (3)              | \$ 32560000 |

COSTO DE TENENCIA

|   |                                  |   |      |      |
|---|----------------------------------|---|------|------|
| 1 | Depreciación                     | $\frac{\text{Valor neto de depreciación (3)} \ \$325,600.00}{\text{Periodo de depreciación} \ 12000 \text{ hr.}}$ | = \$ | 2713 |
| 2 | Intereses y Seguro               |   |      |      |
|   | Tasa anual:                      | Intereses 15%, Seguro 2%.   |      |      |
|   | Uso anual                        | 1600 hr.  |      |      |
|   | Factor x Valor de la máquina (1) | $\frac{0.0612 \times \$ 365,600.00}{1000}$  | =    | 2237 |
|   | Costo de tenencia                |   | \$   | 4951 |

COSTO DE OPERACION

|   | Consumo<br>horario | Costo unitario                       |         |
|---|--------------------|--------------------------------------|---------|
| 3 | Combustible        |                                      |         |
|   | Combustóleo        | _____ lt. x \$ _____ /lt. = \$ _____ |         |
|   | Diesel             | 26 lt. x \$ 0.65 /lt. = \$ 16.90     |         |
|   | Gasolina           | _____ lt. x \$ _____ /lt. = \$ _____ |         |
|   | Petróleo diáfano   | _____ lt. x \$ _____ /lt. = \$ _____ |         |
|   | Combustible        |                                      | \$ 1690 |

4 Lubricantes, grasas y filtros.

|                 | Consumo<br>horario | Costo unitario  |           |
|-----------------|--------------------|-----------------|-----------|
| Aceite diesel   | 0.39 lt.           | x \$ 13.43/lt.  | = \$ 5.24 |
| Aceite gasolina | 1t.                | x \$ /1t.       | = \$      |
| Aceite meropa   | 1t.                | x \$ /1t.       | = \$      |
| Aceite térmico  | 1t.                | x \$ /1t.       | = \$      |
| Hidráulico      | 1t.                | x \$ /1t.       | = \$      |
| Mandos finales  | 1t.                | x \$ /1t.       | = \$      |
| Transmisión     | 1t.                | x \$ /1t.       | = \$      |
| Grasa           | 0.001 kg.          | x \$ 14.41 /kg. | = \$ 0.01 |
| Grasa compound  | kg.                | x \$ /kg.       | = \$      |
| Grasa coples    | kg.                | x \$ /kg.       | = \$      |
| Filtros         |                    |                 | = \$ 1.55 |

Lubricantes, grasas y filtros \$ 680

5 Llantas  $\frac{\text{Costo de cambio de llantas}}{\text{Horas de vida de las llantas}}$  \$ \_\_\_\_\_ hr. = \$ \_\_\_\_\_

6 Reparaciones

$\frac{\text{Factor rep. x Valor de la máquina (1)}}{\text{Periodo de depreciación}}$   $\frac{0.9 \times \$ 365,600.00}{12000 \text{ hr.}}$  = 2742

7 Conceptos especiales

---



---



---



---

Conceptos especiales

Costo de operación \$ 5112

8 Salario(s) horario(s) \_\_\_\_\_

9 Flote de Tepexpan, Méx., a la obra y regreso \$ 5,000.00/1600 hr. 312

COSTO DE LA HORA MAQUINA 10375

Planta mezcladora de base Cedarapids 2A, de 300 a 600 Ton/hr de capacidad, motor generador D 333 ATA de 145 HP a 1800 RPM, alimentador doble tipo delantal de 36", transportador de banda de 36" x 45' 6", mezclador de 2 flechas, - tolva de 5 yd<sup>3</sup>, tanque de agua de 10000 lt \$ 43,700.00, tubería metálica de 2.13 m de diámetro, peso de la planta 15116 kg, del tanque 1150 kg y de la tubería 3464 kg. Depreciación 12000 hr, 200 hr/mes y 6 meses/año.

|   |              |
|---|--------------|
| Valor de la máquina (1) lab. Tepexpan, Méx.                               | \$ 376960000 |
| Valor de la tubería   |              |
| 10.36 m tubería metálica de 2.13 m de diámetro calibre 8 a \$ 5,034.74/m. |              |
| Valor de la tubería   | 5216000      |
| Valor de la máquina (2) sin tubería                                       | \$ 371744000 |
| Valor de rescate  | 55000000     |
| Valor neto de depreciación (3)  | 316744000    |

**COSTO DE TENENCIA**

|                                       |  |  |            |
|---------------------------------------|--|--|------------|
| 1 Depreciación                        | $\frac{\text{Valor neto de depreciación (3)}}{\text{Periodo de depreciación}}$ | $\frac{3'167,440.00}{12000 \text{ hr.}}$ | = \$ 26395 |
| 2 Intereses y seguro                  |  |  |            |
| Tasa anual: Intereses 15%, Seguro 2%. |  |  |            |
| Uso anual 1200 hr.                    |  |  |            |
| Factor x Valor de la máquina (1)      | $\frac{0.0792}{1000}$  | $\times \$ \frac{3'769,600.00}{1000}$    | = 29955    |
| Costo de tenencia                     |  |  | \$ 56250   |

**COSTO DE OPERACION**

|                 | Consumo horario      | Costo unitario      |         |
|-----------------|----------------------|---------------------|---------|
| 3 Combustible   |                      |                     |         |
| Combustóleo     | _____ lt. x \$ _____ | /lt. = \$ _____     |         |
| Diesel          | 34 lt. x \$ _____    | 0.65/lt. = \$ _____ | 22.10   |
| Gasolina        | _____ lt. x \$ _____ | /lt. = \$ _____     |         |
| Petróleo diésel | _____ lt. x \$ _____ | /lt. = \$ _____     |         |
| Combustible     |                      |                     | \$ 2210 |

4 Lubricantes, grasas y filtros

|                 | Consumo<br>horario | Costo unitario         |
|-----------------|--------------------|------------------------|
| Aceite diesel   | 0.43 lt. x         | \$ 13.43/lt. = \$ 5.77 |
| Aceite gasolina | 1t. x              | \$ /lt. = \$           |
| Aceite meropa   | 1t. x              | \$ /lt. = \$           |
| Aceite térmico  | 1t. x              | \$ /lt. = \$           |
| Hidráulico      | 1t. x              | \$ /lt. = \$           |
| Mandos finales  | 1t. x              | \$ /lt. = \$           |
| Transmisión     | 0.009 lt. x        | \$ 10.10/lt. = \$ 0.09 |
| Grasa           | 0.05 kg. x         | \$ 14.41/kg. = \$ 0.72 |
| Grasa compound  | kg. x              | \$ /kg. = \$           |
| Grasa coples    | kg. x              | \$ /kg. = \$           |
| Filtros         |                    | = \$                   |

Lubricantes, grasas y filtros \$ 814

5 Llantas  $\frac{\text{Costo de cambio de llantas}}{\text{Horas de vida de las llantas}} = \frac{\$ \text{---}}{\text{hr.}}$

6 Reparaciones

$\frac{\text{Factor rep. x Valor de la máquina (2)}}{\text{Periodo de depreciación}} = \frac{1.0 \times \$ 3'717,440.00}{12000 \text{ hr.}} = \$ 30979$

7 Conceptos especiales

10.36 m tubería metálica de 2.13 m de diámetro calibre 8  
a \$ 5,034.74/m. \$ 52,160.00/2000 hr.

Conceptos especiales 2608

Costo de operación \$ 36610

8 Salario(s) horario(s) 1 operador \$ 9,990.00/mes.  
4 peones a \$ 5,960.00/mes 16915

9 Flete de Tepexpan, Méx., a la obra y regreso  
\$ 40,000.00/1200 hr. 3333

COSTO DE LA HORA MAQUINA \$ 113109

Tractor Cat D7F, motor de 180 HP a 2000 RPM, cuchilla 7U, cilindros de - inclinación, desgarrador 7 de dos dientes, control hidráulico 173 B, peso - - 21345 kg. Depreciación 12000 hr.; 200 hr/mes y 8 meses/año.

Valor de la máquina (1) lab. Tepexpan, Méx. \$ 330000000  
 Valor de conceptos especiales

---

Valor de conceptos especiales 5250000  
 Valor de la máquina (2) sin conceptos especiales \$ 324750000  
 Valor de rescate 66000000  
 Valor neto de depreciación (3) \$ 258750000

**COSTO DE TENENCIA**

1 Depreciación  $\frac{\text{Valor neto de depreciación(3)}}{\text{Período de depreciación}} = \frac{\$2'587,500.00}{12000 \text{ hr.}} = \$ 21562$

2 Intereses y seguro

Tasa anual: Intereses 15%, Seguro 2%

Uso anual: 1600 hr.

$\frac{\text{Factor x Valor de la máquina (1)}}{1000} = \frac{0.0612 \times \$ 3'300,000.00}{1000} = 20196.$

Costo de tenencia \$ 41758

**COSTO DE OPERACION**

|                 | Consumo<br>horario | Costo unitario |       |
|-----------------|--------------------|----------------|-------|
| 3 Combustible   |                    |                |       |
| Combustóleo     | lt. x \$           | /lt. = \$      |       |
| Diesel          | 33.3 lt. x \$      | 0.65 /lt. =    | 21.64 |
| Gasolina        | lt. x \$           | /lt. = \$      |       |
| Petróleo diésel | lt. x \$           | /lt. = \$      |       |

Combustible \$ 2164

4 Lubricantes, grasas y filtros

|                 | Consumo<br>horario | Costo unitario      |
|-----------------|--------------------|---------------------|
| Aceite diesel   | 0.15lt. x \$       | 13.43/lt. = \$ 2.01 |
| Aceite gasolina | lt. x \$           | /lt. = \$           |
| Aceite meropa   | lt. x \$           | /lt. = \$           |
| Aceite térmico  | lt. x \$           | /lt. = \$           |
| Hidráulico      | 0.11lt. x \$       | 14.61/lt. = \$ 1.61 |
| Mandos finales  | 0.08lt. x \$       | 10.10/lt. = \$ 0.81 |
| Transmisión     | 0.11lt. x \$       | 14.49/lt. = \$ 1.59 |
| Grasa           | 0.05kg. x \$       | 14.41/kg. = \$ 0.72 |
| Grasa compound  | kg. x \$           | /kg. = \$           |
| Grasa coples    | kg. x \$           | /kg. = \$           |
| Filtros         |                    | = \$ 1.68           |

Lubricantes, grasas y filtros.

\$ 842 .

5 Llantas  $\frac{\text{Costo de cambio de llantas}}{\text{Horas de vida de las llantas}} = \frac{\$}{\text{hr.}}$

6 Reparaciones

$\frac{\text{Factor rep. x Valor de la máquina (2)}}{\text{Período de depreciación}} = \frac{0.9 \times \$ 3'247.500.00}{12000 \text{ hr.}} = 24356$

7 Conceptos especiales

2 puntas a \$ 1,290.76/100 hr = \$ 25.81/hr.

2 pernos a \$ 382.72/100 hr = \$ 7.65/hr.

2 protectores a \$ 2,495.27/1500 hr = \$ 3.33/hr

2 patas a \$22,085.52/700 hr = \$ 6.31/hr.

Conceptos especiales

4311

Costo de operación

\$ 31674

8 Salario(s) horario(s) 1 operador \$ 19,360.00/mes

9580

9 Flete de Tepexpan, Méx., a la obra y regreso

\$ 40,000.00/1600 hr.

2500

COSTO DE LA HORA MAQUINA

\$ 85612







centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



CURSO: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS

TEMA: COMPACTACION EN EL CAMPO

ING. FEDERICO ALCARAZ LOZANO

Julio, 1979.



## COMPACTACION EN EL CAMPO.

### I. INTRODUCCION.

La palabra "compactación" resulta de sustantivar el Adjetivo "compacto" - que deriva del latín "compactus", participio pasivo de "compingere" que quiere decir unir, juntar.

Desde tiempos antiguos se ha reconocido la conveniencia de compactar los terraplenes de los caminos. Los métodos primitivos incluían llevar borregos de un lado para otro del terraplén y arrastrar con caballos aplanadoras pesadas de madera.

Hasta hace pocos años se podía contar con la compactación hecha por las unidades de transporte y por aplanadoras casuales, junto con los asentamientos naturales, para estabilizar los terraplenes, de modo que retuvieran su forma y soportaran las cargas que se colocaran sobre ellos.

En los últimos quince años ha habido un gran progreso en la ciencia de la compactación de los suelos. Los estudios de laboratorio han resuelto muchos problemas del comportamiento del suelo, y los fabricantes han diseñado una amplia variedad de equipo para producir el máximo de compactación con el máximo de economía.

La compactación de los suelos debe ejecutarse de la forma más adecuada, ya que a excepción de unas correctas características de drenaje, es el factor que tiene mayor influencia en las condiciones funcionales de cualquier obra civil, como pueden ser terraplenes, sub-bases, bases y superficies de rodadura.

Se desprende de lo anterior, que la vida útil de una obra, en la que interviene la compactación, dependerá en gran parte del grado de compactación especificado, el cual deberá ser estrictamente controlado.

La realización de proyectos cada vez más ambiciosos y de programas más agresivos ha originado una intensa y constante evolución del equipo de compactación.

Se han introducido mejoras, tales como: poderosos sistemas hidráulicos, sensores electrónicos confiables, diseños más funcionales, mayor versatilidad en su uso, transmisiones rápidas, potentes motores, etc., las cuales se han traducido en una mayor producción de los equipos.

Con el objeto de poder cumplir con plazos cada vez menores en la ejecución de obras cada vez mayores, se ha llegado a la necesidad de utilizar equipos de gran producción.

Los grandes equipos de carga, acarreo y tiro de material, han obligado a los fabricantes de equipo de compactación a diseñar máquinas compactadoras capaces de balancear al tiro con la compactación, para evitar interferencia de actividades y pérdida de tiempo, lo que da por resultado un proyecto antieconómico.

## II. CLASIFICACION DE LOS SUELOS.

Para poder clasificar los suelos nos basaremos en el "Sistema Unificado de Clasificación de Suelos" (S.U.C.S.).

Este sistema cubre los suelos gruesos y los finos, distinguiendo ambos - por el cribado a través de la malla 200; las partículas gruesas son mayores - que dicha malla y las finas menores. Un suelo se considera grueso si más del 50% de sus partículas son gruesas, y fino; si más de la mitad de sus partículas, en peso, son finas.

### 1) SUELOS GRUESOS.

El símbolo de cada grupo está formado por dos letras mayúsculas, que son las iniciales de los nombres ingleses de los suelos más típicos de ese grupo.

G (Gravel) Gravas y suelos en que predominen éstas.

S (Sand) Arenas y suelos arenosos.

Las gravas y las arenas se separan con la malla No. 4, de manera que un suelo pertenece al grupo genérico G, si más del 50% de su fracción gruesa (retenida en la malla 200) no pasa la malla No. 4, y es del grupo genérico S, en caso contrario.

- a) Material prácticamente limpio de finos, bien graduado. Símbolo W - (well graded). En combinación con los símbolos genéricos, se obtienen los grupos GW y SW.
- b) Material prácticamente limpio de finos, mal graduado. Símbolo P -- (poorly graded). En combinación con los símbolos genéricos, da lugar a los grupos GP y SP.
- c) Material con cantidad apreciable de finos no plásticos. Símbolo M (del Sueco Mjo y Mjaja). En combinación con los símbolos genéricos, da lugar a los grupos GM y SM.

- d) Material con cantidad apreciable de finos plásticos. Símbolo C - - (Clay). En combinación con los símbolos genéricos, da lugar a los grupos GC y SC.

## 2) SUELOS FINOS.

También en este caso el Sistema considera a los suelos agrupados, formándose el símbolo de cada grupo por dos letras mayúsculas, elegidas con un criterio similar al usado para los suelos gruesos, y dando lugar a las siguientes divisiones:

M Del Sueco Mo y Mjala) Limos inorgánicos.

C (Clay) Arcillas inorgánicas.

O (Organic) Limos y Arcillas Orgánicas.

Cada uno de estos tres tipos de suelos se subdividen, según su límite líquido, en dos grupos. Si este es menor del 50%, es decir, si son suelos de compresibilidad baja o media, se añade al símbolo genérico la letra L (Low - Compressibility), obteniéndose por esta combinación los grupos ML, CL y OL. Los suelos finos con límite líquido mayor del 50%, o sea de alta compresibilidad, llevan tras el símbolo genérico la letra H (High Compressibility), teniendo así los grupos MH, CH, OH.

Al final de este capítulo aparece una tabla general del "Sistema Unificado de Clasificación de Suelos".

Los materiales friccionantes son principalmente gravas y arenas; entendiéndose por fricción interna a la resistencia al desplazamiento entre las partículas internas del material.

Los materiales cohesivos son arcillas y limos arcillosos; cohesión podemos definirla como la atracción mutua de las partículas de un suelo debido a fuerzas moleculares y a la presencia de humedad.

## III. COMPACTACIÓN

### 1. DEFINICION

En la terminología de Mecánica de Suelos, la reducción de los vacíos de un suelo recibe varios nombres: Consolidación, Compactación, Densificación, etc., existen ligeras diferencias en el significado de los dos primeros.

## SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACION DE SUELOS INCLUYENDO IDENTIFICACION Y DESCRIPCION

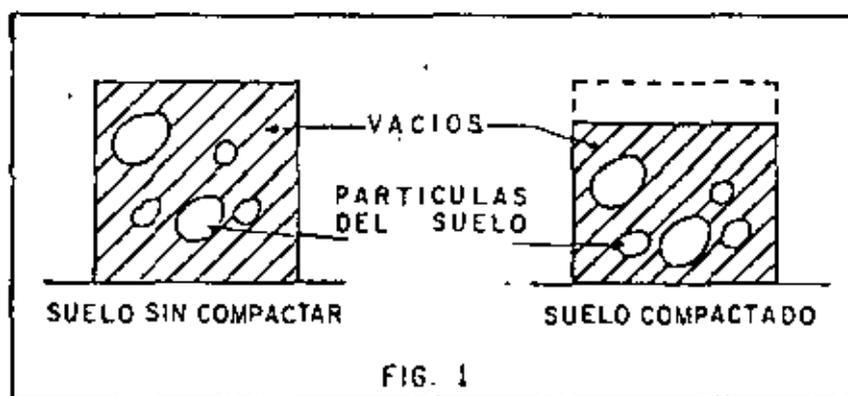
| PROCEDIMIENTO DE IDENTIFICACION EN EL CAMPO<br>(Excluyendo las partículas mayores de 7.6 cm. (3") Lasano las fracciones espesas estiradas)     |  |  |  | SIMBOLOS DEL GRUPO (A) | NOMBRES TÍPICOS  | INFORMACION NECESARIA PARA LA DESCRIPCION DE LOS SUELOS   |    |  |
|--|--|--|--|------------------------|--|---|----|--|
| <b>SUELOS DE PARTICULAS GRUESAS</b><br>Más de la mitad del material retenido en la malla N° 200 (Ø)  | <b>ARENAS</b><br>Más de la mitad de la fracción gruesa pasa la malla N° 4 (Para clasificación visual puede usarse 75 cm como equivalente a la abertura de la malla N° 4) | <b>GRAVAS</b><br>Más de la mitad de la fracción gruesa retenida en la malla N° 4 | Amplia gama en los tamaños de las partículas y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios | GW                     | Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena, con poca o nada de finas. | Dese el nombre típico, indique los porcentajes aproximados de grava y arena, tamaño máximo, plasticidad, características de la superficie y dureza de las partículas gruesas, nombre local y geológico; cualquier otra información descriptiva pertinente y el símbolo entre paréntesis.<br><br>Para los suelos alterados agréguese información sobre estratificación, compactación, cementación, condiciones de humedad y características de drenaje.<br><br><b>EJEMPLO</b><br>Arena limosa con grava, como un 20% de grava de partículas duras, angulosas y de 15 cm. de tamaño máximo, arena gruesa a fina de partículas redondeadas o subangulosas, alrededor de 10% de finas no plásticas de baja resistencia en estado seco; compacta y húmeda en el lugar, arena aluvial. (SM) |    |  |
|  |  |  | Predominio de un tamaño o un tipo de tamaños, con ausencia de algunos tamaños intermedios              | GP                     | Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena, con poca o nada de finas   |   |    |  |
|  |  |  | Fracción fina poca o nada plástica (Para identificación véase grupo ML abajo)                          | GM                     | Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo                             |   |    |  |
|  |  |  | Fracción fina plástica (Para identificación véase grupo CL abajo)                                      | GC                     | Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla                       |   |    |  |
|  |  |  | Amplia gama en los tamaños de las partículas y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios | SW                     | Arenas bien graduadas, arenas con grava con poca o nada de finas           |   |    |  |
|  |  |  | Predominio de un tamaño o un tipo de tamaños, con ausencia de algunos tamaños intermedios              | SP                     | Arenas mal graduadas, arenas con grava con poca o nada de finas            |   |    |  |
| Fracción fina poca o nada plástica (Para identificación véase grupo ML abajo)  | SM   | Arenas limosas, mezclas de arena y limo  |  |                        |  |   |    |  |
| Fracción fina plástica (Para identificación véase grupo CL abajo)  | SC   | Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla                                    |  |                        |  |   |    |  |
| PROCEDIMIENTO DE IDENTIFICACION EN LA FRACCION QUE PASA LA MALLA N° 40   |  |  |  |                        |  |   |    |  |
| <b>SUELOS DE PARTICULAS FINAS</b><br>Más de la mitad del material pasa la malla N° 200 (Las partículas de 0.075 cm. de diámetro (malla N° 200) | <b>LIMOS Y ARCILLAS</b><br>Limite líquido menor de 50  | Nulo o ligero  | Rápido o lento   | Nula                   | ML   | Dese el nombre típico, indique el grado y carácter de la plasticidad, cantidad y tamaño máximo de las partículas gruesas, color del suelo húmedo, nombre local y geológico, cualquier otra información descriptiva pertinente y el símbolo entre paréntesis.<br><br>Para los suelos alterados agréguese información sobre la estructura, estratificación, consistencia fuerte en estado inalterado — como remoldeado, condiciones de humedad y drenaje.<br><br><b>EJEMPLO</b><br>Limo arcilloso, café, ligeramente plástico, porcentaje reducido de arena fina, numerosos agujeros verticales de raíces, firme y seco en el lugar, limo (ML)  |    |  |
|  |  | Media o alta   | Nula o muy lenta   | Media                  | CL   |   |    |  |
|  |  | Ligero o media   | Lenta  | Ligera                 | OL   |   |    |  |
|  |  | Ligero o media   | Lento o nulo   | Ligero o media         | MH   |   |    |  |
|  |  | Alta o muy alta  | Nula   | Alta                   | CH   |   |    |  |
|  |  | Media o alta   | Nula o muy lenta   | Ligero o media         | OH   |   |    |  |
|  |  | SUELOS ALTAMENTE ORGANICOS   |  |                        |  |   | Pt | Turba y otros suelos altamente orgánicos |

(\*) Clasificaciones de frontera. — Los suelos que posean las características de dos grupos se designan con la combinación de los dos símbolos

(Ø) Todas las mallas en esta carta son las U.S. Standard.

Consolidación, se usa para la reducción de vacíos, relativamente lenta, debida a la aplicación de una carga estática, usualmente acompañada de expulsión de agua del suelo, por ejemplo, la reducción de vacíos en el suelo bajo un edificio.

El término compactación se usa para la reducción de vacíos, más o menos rápida, producida por medios mecánicos durante el proceso de construcción. (Fig. 1).



Al reducirse los vacíos del suelo hay un incremento del peso volumétrico del material, de donde se puede dar la siguiente definición.

**Compactación:** Es el aumento artificial, por medios mecánicos, del peso volumétrico de un suelo, esto se logra a costa de la reducción de los vacíos del mismo al conseguir un mejor acomodo de las partículas que los forman mediante la expulsión de aire y/o agua del material.

## 2. PROPOSITO E IMPORTANCIA.

La compactación mejora las características de un suelo en lo que se refiere a:

- a) Resistencia mecánica
- b) Resistencia a los asentamientos bajo cargas futuras
- c) Impermeabilidad

Entre las obras que requieren compactación se pueden señalar como más importantes las carreteras, las aeropistas y las presas de tierra.

Estas estructuras deberán ser capaces de soportar su propio peso y el peso de las cargas super-impuestas, si falla, el costo de la reparación puede ser muy elevado.

Desde el punto de vista del constructor el problema es obtener la densidad especificada por el diseñador. Obtenida esta densidad se asegura que la resistencia a futuros asentamientos y la impermeabilidad sean las supuestas por el diseñador, sin embargo, la obtención de la densidad de diseño no necesariamente asegura la resistencia mecánica supuesta, ya que ésta depende, en muchos suelos, de la humedad a la cual fué compactado. Es necesario entonces que la compactación sea efectuada a la humedad especificada, especialmente para suelos cohesivos.

Se hace notar que compactar a mayores grados del especificado no es conveniente, es decir, compactar más, puede resultar perjudicial al proyecto.

La falla de algunas obras han obligado a que las especificaciones de compactación sean cada vez más estrictas; las tolerancias en más o en menos, del grado de compactación especificado, son generalmente fijadas desde el inicio de la obra.

### 3. PRUEBAS DE COMPACTACION.

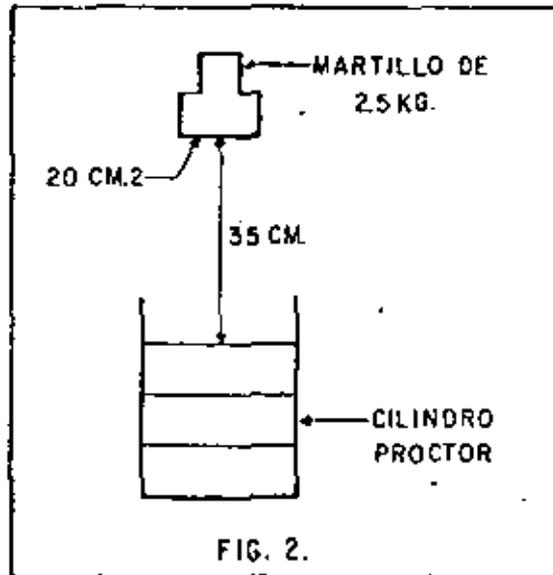
En la construcción de terraplenes sería ideal poder medir la resistencia del suelo para determinar cuando se ha alcanzado la resistencia necesaria, pero el equipo para medir esta resistencia (especialmente a esfuerzos de compresión y cortante) es difícil de manejar, es caro y no es aplicable a todos los suelos, por lo tanto se han preparado las siguientes pruebas de laboratorio.

- A) Proctor
- B) Proctor Modificada
- C) Porter

A). Proctor: R.R. Proctor estableció que hay una correspondencia entre el peso volumétrico seco de un suelo compactado y su resistencia. El equipo para hacer pruebas de compactación en la obra es un equipo económico y sencillo. Proctor desarrolló una prueba que consiste en:

- a) Se toma una muestra representativa del suelo a compactar, de humedad conocida.
- b) Se toma un cilindro de 4" de diámetro x 4 1/2" de altura, se llena en tres capas aproximadamente iguales con material de prueba.

- c) Cada capa se compacta con 25 golpes de un martillo de 2,5 kg con un área de contacto de 20 cm<sup>2</sup>, el que se deja caer de 35 cm de altura (Fig. 2). Todo esto con el objeto de siempre dar al material la misma energía de compactación.



- d) Se pesa el material y como el volumen es conocido se calcula el peso volumétrico húmedo, simplemente dividiendo el peso del material entre su volumen. Como la humedad es conocida, se resta el peso del agua y se obtiene el peso volumétrico seco para esa humedad.
- e) Se repite la prueba varias veces, variando cada vez el grado de humedad, con lo que se obtienen pares de valores Humedad-Peso Volumétrico Seco.

Con estos pares de valores se dibuja la siguiente gráfica (Fig. 3).

Puede observarse que hay un cierto contenido de humedad para el cual el peso volumétrico es máximo, este peso se conoce como: "Peso Volumétrico Seco Máximo" (P.V.S.M.), o peso proctor, y el contenido de humedad como humedad óptima.

El diseñador entonces especifica el porcentaje del peso proctor que debe obtenerse en la construcción del terraplén y la humedad óptima.

Por ejemplo: Si el proyectista especifica 95% Proctor en el caso de la gráfica, tenemos: P.V.S.M. = 1820 kg/m<sup>3</sup>

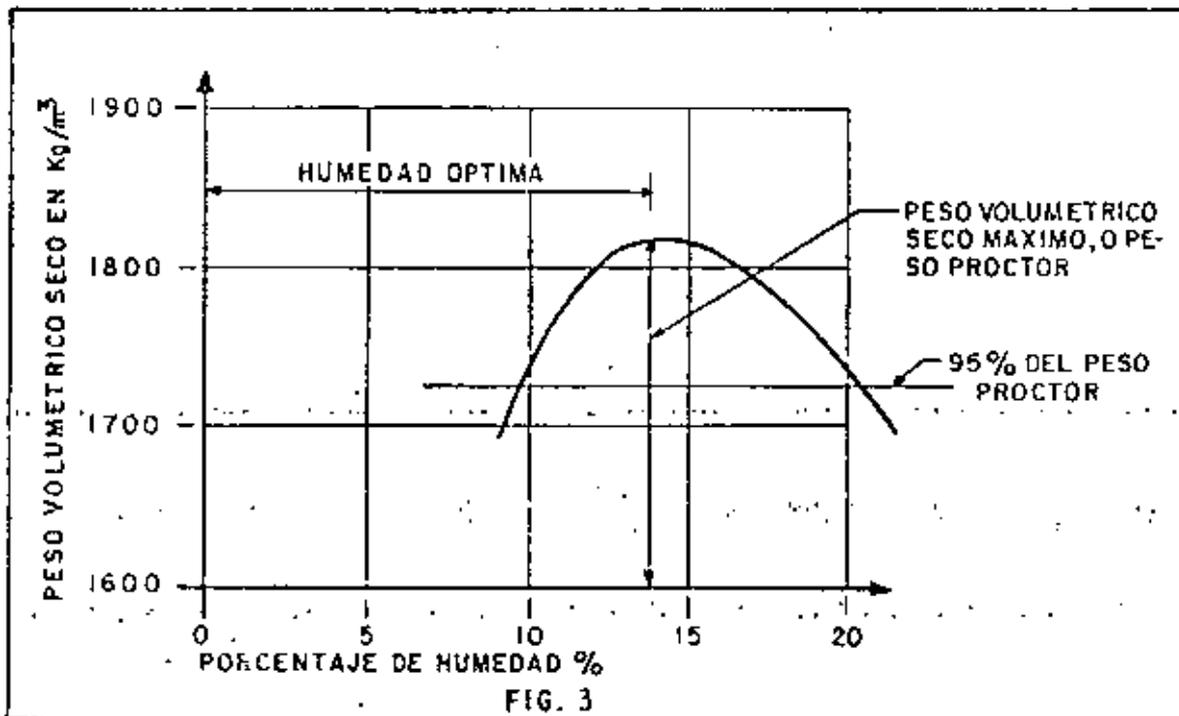
$$95\% \text{ de P.V.S.M.} = 0.95 \times 1820 = 1729 \text{ kg/m}^3$$

es decir el constructor debe obtener un peso volumétrico seco mínimo de 1729 kg/m<sup>3</sup> en ese material.

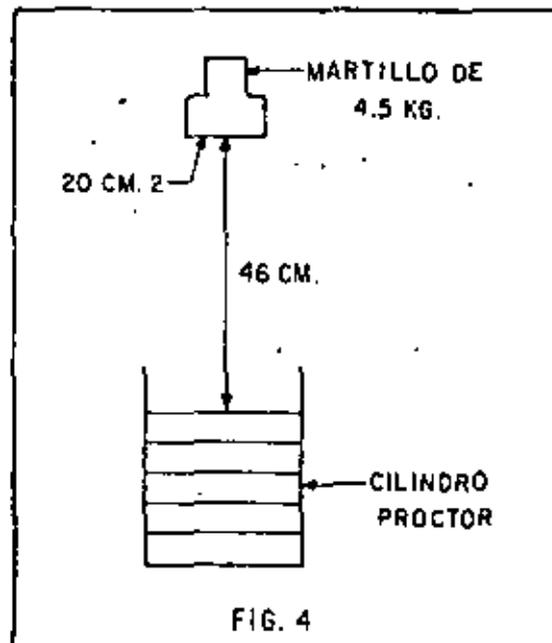
La razón de la existencia de un peso volumétrico máximo es que en todos los suelos, al incrementarse su humedad, se les proporciona un medio lubricante entre sus partículas, que permite un cierto acomodo de estas cuando se sujetan a un cierto trabajo de compactación. Si se sigue aumentando la humedad, con el mismo trabajo de compactación, se llega a obtener un mejor acomodo de sus partículas y en consecuencia un mayor peso volumétrico, si se aumenta más la humedad todavía, el agua empieza a ocupar el espacio que deberían ocupar las partículas del suelo y por lo tanto comienza a bajar el peso volumétrico del material, para el mismo trabajo de compactación.

Por lo tanto, si se aumenta o disminuye la humedad será necesario aumentar el trabajo del equipo de compactación, lo que, en general, no es económico.

B) Proctor Modificada: Conforme fueron aumentando las cargas sobre las terracerías por el uso de camiones y aeroplanos cada vez más pesados, se vio la necesidad de desarrollar mayores densidades y resistencias en muchos materiales usando mayor trabajo de compactación. Por esta razón se desarrolló la prueba Proctor modificada,



Para esta prueba se usa el mismo cilindro proctor, pero el material se compacta en 5 capas con un martillo de 4.5 kg y cayendo de una altura de 46cm, dando 25 golpes por capa (Fig. 4).



En todos los aspectos las dos pruebas son semejantes, únicamente el trabajo de compactación se ha incrementado aproximadamente 4,5 veces.

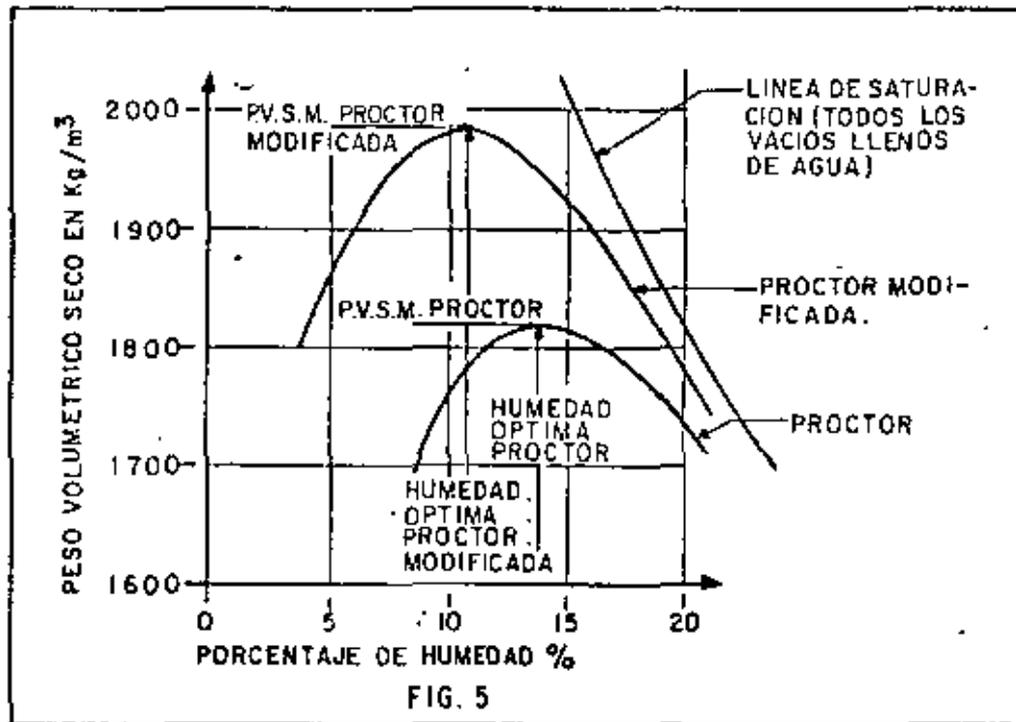
La gráfica siguiente es un ejemplo de la prueba proctor y la prueba proctor modificada efectuadas en el mismo material (Fig. 5).

Obsérvese en esta gráfica que aunque el trabajo de compactación se ha incrementado 4.5 veces, la densidad solamente se incrementó 9%, y que la humedad óptima disminuyó 3%. Esto último es invariablemente cierto.

c) Porter: Tanto la prueba Proctor como la Proctor modificada han dado muy buen resultado en suelos cuyos tamaños máximos son de 10 mm (3/8"), en suelos con partículas mayores el golpe del martillo no resulta uniforme y por lo tanto la prueba puede variar de resultados en un mismo material.

Para obviar esta dificultad se ideó la prueba Porter, que consiste en lo siguiente:

- a) Se toma una muestra del material a probar y se seca.
- b) Se pasa por la malla de 25 mm (1") y se determina el porcentaje, en peso, retenido en la malla, si el porcentaje es menor del 15%, se -



usará para la prueba el material que pasó la malla. Si el porcentaje retenido es mayor del 15% se prepara, del material original, una muestra que pase la malla de 1" y que sea retenida en la malla No.4, de esta muestra se pesa un tanto igual al peso del retenido, el que se agrega al material que pasó la malla de 1", con este nuevo material se procede a la prueba.

- c) A 4 kg de la muestra así preparada se le incorpora una cantidad de agua conocida; y se homogeniza con el material.
- d) Con este material se llena, en tres capas, un molde metálico de 6" de diámetro por 8" de altura con el fondo perforado. Cada capa se pica 25 veces con una varilla de 5/8" (1,9 cm) de diámetro por 30cm de longitud con punta de bala.
- e) Sobre la última capa se coloca una placa circular ligeramente menor que el diámetro interior del cilindro, y se mete el molde en una prensa de 30 Ton.
- f) Se aplica la carga gradualmente de tal manera que en cinco minutos se alcance una presión de 140.6 kg/cm<sup>2</sup>, la cual debe mantenerse durante un minuto, e inmediatamente se descarga en forma gradual durante un minuto.

Si al llegar a la carga máxima no se humedece la base del molde, la humedad ensayada es inferior a la óptima.

- g) Se prosigue por tanteos hasta que la base del molde se humedezca al alcanzar la carga máxima. La humedad de esta prueba es la humedad óptima. Se determina entonces el peso volumétrico seco de la muestra dentro del cilindro, a este peso se le conoce como el "Peso Volumétrico Seco Máximo Porter", y que será el peso comparativo para el trabajo de campo.

Por ejemplo: si en la prueba Porter obtuvimos un peso Volumétrico Seco - Máximo" de 2,000 kg/m<sup>3</sup>, y el diseñador ha pedido el 95% Porter, en la obra tendremos que alcanzar un peso volumétrico seco de:  $0.95 \times 2,000 = 1,900$  kg/m<sup>3</sup>.

#### 4. METODOS DE CONTROL.

Para medir en la obra si se ha alcanzado el peso volumétrico especificado hay varios métodos:

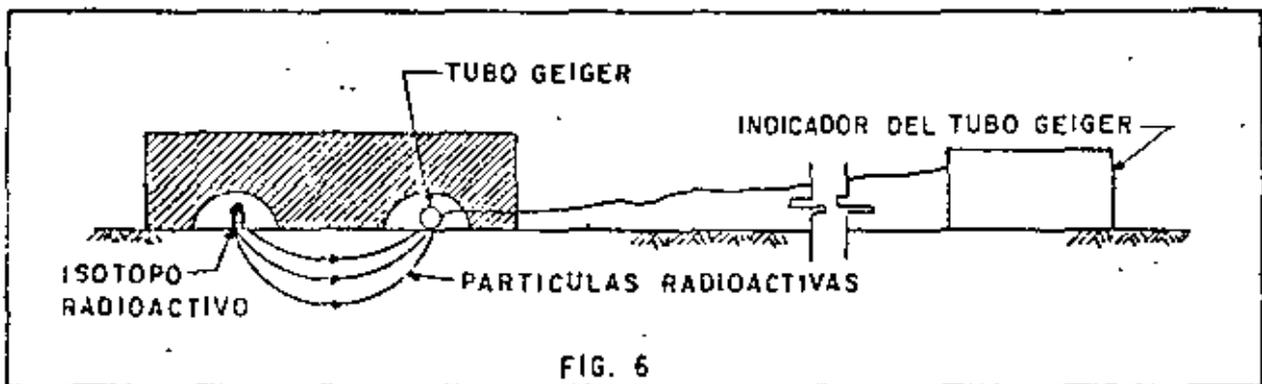
- A) Medida física de peso y volumen
- B) Mediciones nucleares
- C) Otros

A) Medida Física de Peso y Volumen: En cualquiera de los métodos existentes el principal problema radica en la determinación de la humedad para poder calcular el peso volumétrico seco en función del peso volumétrico húmedo que es el que se obtiene en las pruebas de campo. Normalmente se calienta una parte del material hasta secarlo y por diferencia se obtiene la humedad, pero este método es lento y peligroso porque en algunos suelos se altera el peso volumétrico con el calentamiento, debido a la evaporación de partes orgánicas principalmente. Nunca debe llegarse a la calcinación que también puede alterar el peso volumétrico, este método consiste en:

- a) Se excava un agujero de 10 a 15 cm de diámetro, o un cuadrado de 15 cm por lado, a la misma profundidad de la capa por probar.
- b) El material excavado es cuidadosamente recogido y pesado. Se seca para determinar la humedad y el peso volumétrico seco.
- c) El volumen del agujero es medido. El método usado generalmente es llenándolo con una arena de peso volumétrico constante que se tiene en un recipiente graduado.

- d) Conocidos el peso seco de la muestra y el volumen del agujero, se calcula el peso volumétrico seco de la muestra, que debe ser igual o mayor que el peso volumétrico seco especificado.

B) Prueba de Medición Nuclear: Para evitar el tiempo y costo que significa la prueba anterior se han ideado varios métodos, uno de ellos es el Método Nuclear, que consiste en un bloque de plomo que contiene un isótopo y un tubo Geiger (Fig. 6).

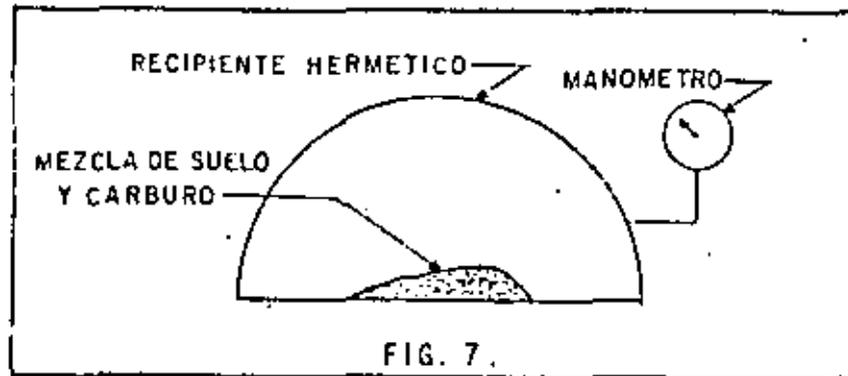


El bloque de plomo se coloca sobre la capa a probar, el número de partículas que llegan al tubo Geiger está en función de la masa del material que tienen que atravesar, es decir, es función del peso volumétrico, entonces la medida del indicador debe compararse con otra medida hecha en una capa que tenga el peso volumétrico especificado.

Estos aparatos necesitan frecuente calibración, no siempre hay una indicación clara cuando el aparato no funciona bien y su exactitud varía con el tipo de suelo.

Estas desventajas, sin embargo son despreciadas por los constructores en grandes trabajos de terracerías, pues el aparato le permite asegurar que una cierta capa ha sido compactada, con un alto grado de confiabilidad, prosiguiendo el trabajo de inmediato con la siguiente capa.

C) Otros: Como el problema principal es la determinación de la humedad se han desarrollado últimamente algunos métodos entre los que destaca principalmente el denominado "Speedy" (Fig. 7), que consiste en colocar un peso conocido de suelo mezclado con carburo de calcio dentro de un recipiente hermético provisto de un manómetro. El carburo reacciona con la humedad del suelo, produciendo gas acetileno y por lo tanto una presión que es registrada en el manómetro el que se puede inclusive graduar en gramos de agua, determinándose rápidamente de esta manera el porcentaje de humedad, y así poder calcular su peso volumétrico seco.



#### IV. TRABAJO DEL EQUIPO DE COMPACTACION.

Para comprender mejor la transmisión de los esfuerzos de compresión en un suelo, consideremos una placa rígida, circular, de área "A", colocada sobre un suelo, a la que se aplica una carga "L", dando una presión de contacto "p" (Fig. 8).

En el suelo se desarrollan presiones, si unimos los puntos de igual presión, obtendremos superficies llamadas, bulbos de presión.

Obsérvese lo siguiente:

- a) Si aumenta el tamaño de la placa pero la presión permanece constante, incrementando la carga; la profundidad del bulbo de presión aumenta (Fig. 9).
- b) Si aumenta la presión, y el área permanece constante (Fig. 10) la profundidad del bulbo no aumenta significativamente, pero la presión, y por lo tanto la energía de compactación, sí aumenta.

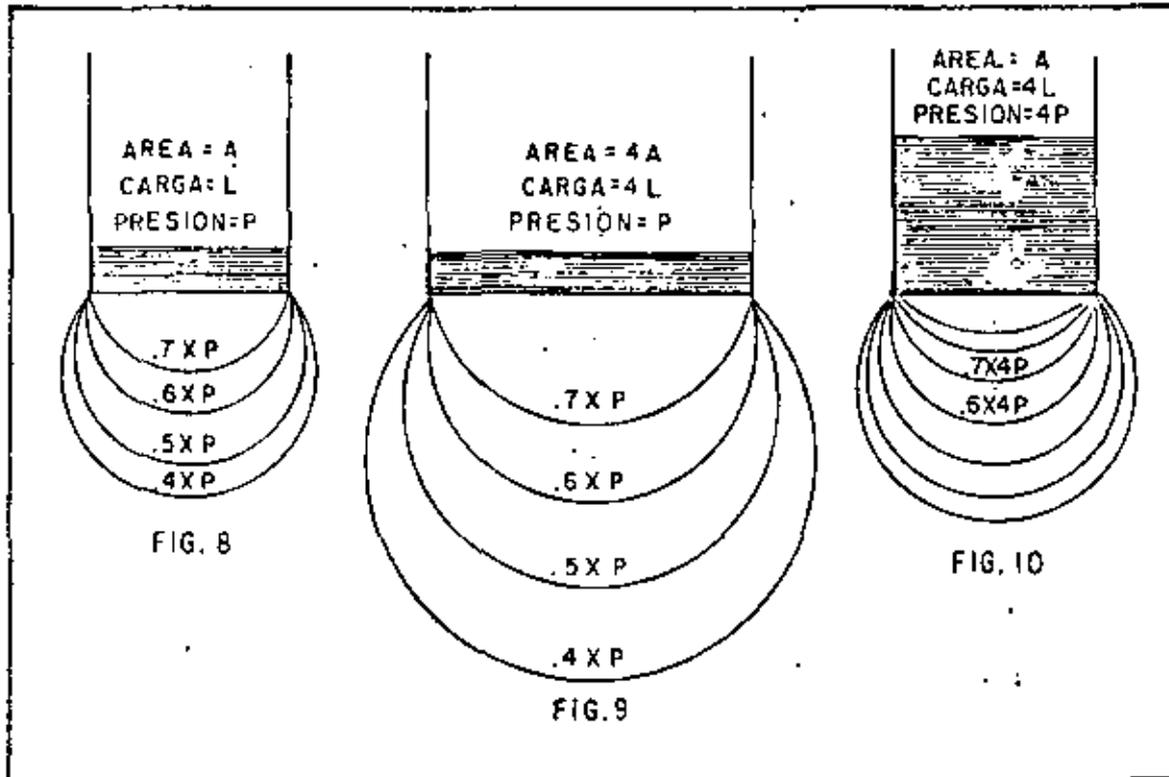
Si consideramos un cierto equipo de compactación, trabajando capas de un determinado espesor:

De (a) y (b) se deduce que es necesario controlar el espesor de las capas para tener suficiente presión en el suelo para obtener la compactación deseada.

De (b) se deduce que no podemos aumentar significativamente el espesor de la capa de compactación simplemente lastrando excesivamente el equipo.

De (a) se deduce que para aumentar el espesor de la capa, debemos cambiar el equipo por otro que tenga mayor superficie de contacto, aunque la presión permanezca constante.

La teoría de los bulbos de presión fue desarrollada por Boussinesq para un medio elástico. Para fines prácticos todos los suelos son elásticos y la teoría es razonablemente cierta aún para suelos granulares.



Los esfuerzos mecánicos empleados en la compactación, son una combinación de uno o más de los siguientes efectos:

- 1) PRESION ESTATICA: La aplicación de una fuerza por unidad de área.
- 2) IMPACTO: Golpeo con una carga de corta duración, alta amplitud y baja frecuencia.
- 3) VIBRACION: Golpeo con una carga de corta duración, alta frecuencia, baja amplitud.
- 4) AMASAMIENTO: Acción de amasado, reorientación de partículas próximas, causando una reducción de vacíos.
- 5) CON AYUDA DE ENZIMAS.

## 1. COMPACTACION POR PRESION ESTATICA.

Este principio se basa en la aplicación de pesos más o menos grandes sobre la superficie del suelo.

La acción de este principio de compactación es de arriba hacia abajo, es decir, las capas superiores alcanzan primero mayores densidades que las de -- abajo.

Este principio de compactación tiene dos inconvenientes en la obtención de una rápida densificación:

A) Su Acción de Arriba hacia Abajo: El inconveniente de que la parte superior se compacte primero que la de abajo, es que el esfuerzo compactivo debe atravesar la parte ya compactada, para poder compactar la inferior. Se consume por lo tanto mayor energía de compactación.

También suele suceder que las características granulométricas del material varíen, debido a la sobrecompactación de la porción superior de la capa; dicha sobrecompactación o exceso de energía compactiva produce una fragmentación de partículas.

B) Fomentar la resistencia de la fricción interna del material, durante la compactación: definiendo como fricción interna a la resistencia de las partículas de un suelo para deslizarse dentro de la masa del mismo, se puede juzgar este segundo inconveniente.

Si llamamos (F) a la fuerza aplicada por el compactador y (n) al coeficiente de fricción interna del material, se puede deducir la reacción (R) de las partículas para deslizarse dentro de la masa de suelo.

$$R = nF$$

A mayor fuerza aplicada mayor la reacción de la fricción interna del material, aquí es donde el papel que juega el agua resulta muy importante, ya que, tendrá efectos lubricantes entre las partículas reduciendo (n) y por consecuencia a (R).

Para este tipo de compactación es necesario hacer riegos intensivos de agua cuando el material así lo soporte.

## 2. COMPACTACION POR IMPACTO.

La compactación por medio de impacto se logra haciendo caer repetidamente un peso desde una cierta altura.

Cuando una unidad compactadora tiene una frecuencia baja y una amplitud grande, la unidad cae dentro de este tipo de compactación.

El principio en que se basa este tipo de compactación es que, cuando un cuerpo se levanta una cierta distancia sobre una superficie y se deja caer, la presión que ejerce sobre ésta, es varias veces mayor que la presión que ejerce el mismo cuerpo estando apoyado estáticamente sobre dicha superficie.

### 3. COMPACTACION POR VIBRACION.

Este principio de compactación es el que últimamente ha tenido mayor desarrollo y prácticamente ha invadido todos los materiales por compactar.

En la mayoría de los tipos de material, la compactación dinámica o vibratoria, supera en eficiencia a los compactadores estáticos.

Como en la compactación por presión estática, en este tipo de compactación también se aplica una cierta presión, pero al mismo tiempo se somete al material a rápidos y fuertes impactos o vibraciones, entre 700 y 4,000, dependiendo del compactador.

Debido a las vibraciones producidas por el equipo sobre el material, la fricción interna de éste, desaparece momentáneamente, propiciando el acomodo de las partículas.

Esto se puede demostrar mediante el experimento de girar una perforadora de álabes dentro de un recipiente que contenga arena o grava, primero en estado estático y luego colocando el recipiente sobre una placa vibratoria.

La vibración multiplica la movilidad interna del material en forma contundente; en suelos de granulometría gruesa la movilidad dinámica es de 10 a 30 veces mayor que la movilidad estática.

La experiencia sueca nos proporciona la siguiente tabla:

| Material | Contenido de agua<br>% | Momento Resistivo (kg-cm) |                 |
|----------|------------------------|---------------------------|-----------------|
|          |                        | En reposo                 | Con vibraciones |
| Grava    | 0                      | 1700                      | 40              |
| Arena    | 10                     | 500                       | 45              |
| Limo     | 12                     | 150                       | 25              |

La compactación por vibración tiene un efecto de penetración como el sonido, el cual también es dinámico, pero tiene una frecuencia mayor y audible; este tipo de compactación evita los efectos de arco y disminuye la fricción -

interna del material permitiendo que las fuerzas compactivas trabajen a mayor profundidad y a mayor anchura.

Con este principio de compactación las partículas de material se ven sujetas a presión estática y a impulsos dinámicos de las fuerzas vibratorias, - con lo cual se logra una compactación con menor esfuerzo.

La densificación de un material por medio de compactadores vibratorios - es de abajo hacia arriba.

#### VENTAJAS DE LA COMPACTACION POR VIBRACION.

- a) Es posible compactar a más altas densidades; facilita la obtención de los últimos porcentos del grado de compactación que son tan difíciles de obtener, y a veces imposibles de obtener, con compactadores estáticos.
- b) Permite el uso de compactadores más pequeños.
- c) Se puede trabajar sobre capas de material de mayor espesor.
- d) Permite hacer trabajos más rápidos por menor número de pasadas.
- e) Por las razones anteriores los costos de compactación resultan más económicos.

#### 4. COMPACTACION POR AMASAMIENTO.

Amasar en este caso puede confundirse con exprimir, es decir el efecto - de una pata de cabra al penetrar en un material ejerce presión hacia todos los lados, obligando al agua y/o al aire a salir por la superficie.

La compactación por este principio se lleva a cabo de abajo hacia arriba; es decir, las capas inferiores se densifican primero y las superiores posteriormente. Por esto se dice que un rodillo pata de cabra emerge o sale cuando el material se encuentra compactado debidamente.

Los rodillos pata de cabra se emplean fundamentalmente en materiales cohesivos; en cambio su efectividad es casi nula en materiales granulares.

#### 5. COMPACTACION CON LA AYUDA DE ENZIMAS.

Mediante la adición de productos enzimáticos en el agua de compactación, se ha pretendido obtener, en combinación con algún otro esfuerzo compactador mecánico, la densificación más rápida de los materiales.

Según la definición de Summer o Somers una enzima es: "cierta substancia química-orgánica que está formada por plantas, animales y microorganismos, capaz de incrementar la velocidad de transformación química del medio donde se encuentra, sin que sea consumida por ello en este proceso, llegando a formar parte del conjunto".

Según los fabricantes de enzimas para compactación, esta se logra mediante una reacción química de ionización de los componentes orgánicos e inorgánicos del terreno, permitiendo que esta reacción origine una fusión molecular progresiva, lo que trae por consecuencia que las partículas del suelo se agrupan y se transformen en una masa compacta y firme.

Se hace hincapié en que el agregar productos enzimáticos al agua de compactación no densificará al material tratado, sino que es necesario aplicar esfuerzo compactivo adicional; es decir, se usará algún equipo compactador y agua con enzimas, con lo cual puede reducirse el tiempo de compactación.

## V. EQUIPO DE COMPACTACION.

Hay una gran variedad de equipos de compactación, se describirán sus características básicas:

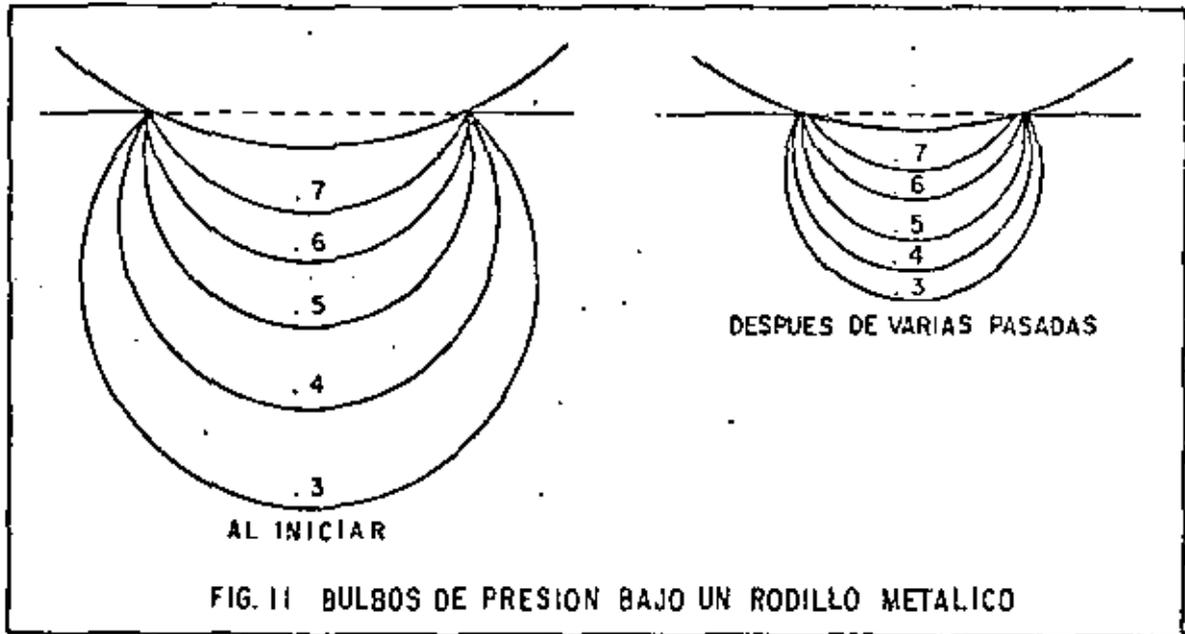
### 1. RODILLOS METALICOS.

Un rodillo metálico utiliza solamente presión estática con un mínimo de manipulación en materiales plásticos.

Cuando estos rodillos inician la compactación de una capa el área de contacto es más o menos ancha y se forma un bulbo de presión de una cierta profundidad, conforme avanza la compactación, el ancho del área de contacto se reduce, y por lo tanto también se reduce la profundidad del bulbo de presión y aumentan los esfuerzos de compresión en la cercanía de la superficie (Fig. 11). Estos esfuerzos son con frecuencia suficientes para triturar los agregados en materiales granulares, e invariablemente causan la formación de una costra en la superficie de la capa (encarpetamiento).

Si a esto se agrega la costumbre de hacer riegos adicionales durante la compactación, para compensar la evaporación, en una capa en donde la penetración del agua es difícil por la misma compactación del material llegaremos a un estado de estratificación de la humedad, en este momento la formación de la costra es inevitable.

También es costumbre más o menos generalizada, el sobre lastrar estos equipos cuando no se está obteniendo la compactación, para aumentar la penetración y la profundidad del bulbo de presión, esto generalmente tiene como consecuencia el sobre esforzar la superficie.



Un rodillo metálico, no compacta pequeñas áreas suaves, debido a que la rigidez de la rueda las puentea, estas áreas suaves se presentan con frecuencia en terracerías debido a la irregularidad de la capa.

Dentro de este grupo se puede hacer la división siguiente:

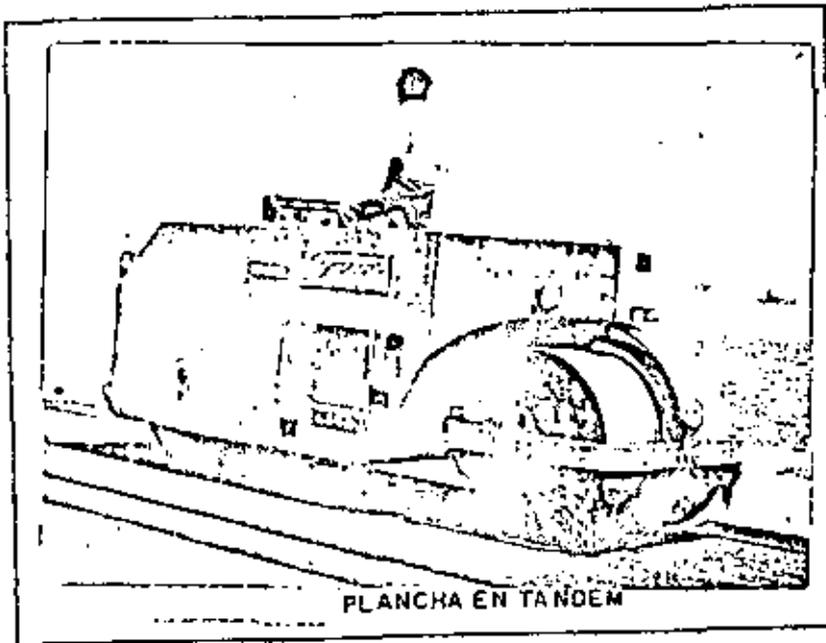
A) Planchas Tandem.- Son aquellas que tienen dos o tres rodillos metálicos paralelos. Los rodillos son generalmente huecos para ser lastrados con agua y/o arena. Tienen generalmente dos números por nomenclatura. El primero es el peso de la máquina sin lastre y el segundo es el peso de la máquina lastrada totalmente (Fig. 12).

B) Planchas de Tres Ruedas.- Son quizás de más antiguo diseño; estas planchas tienen dos ruedas traseras paralelas y una rueda delantera; las ruedas pueden ser huecas para ser lastradas o formadas por placas de acero rodadas con atiesadores (Fig. 13).

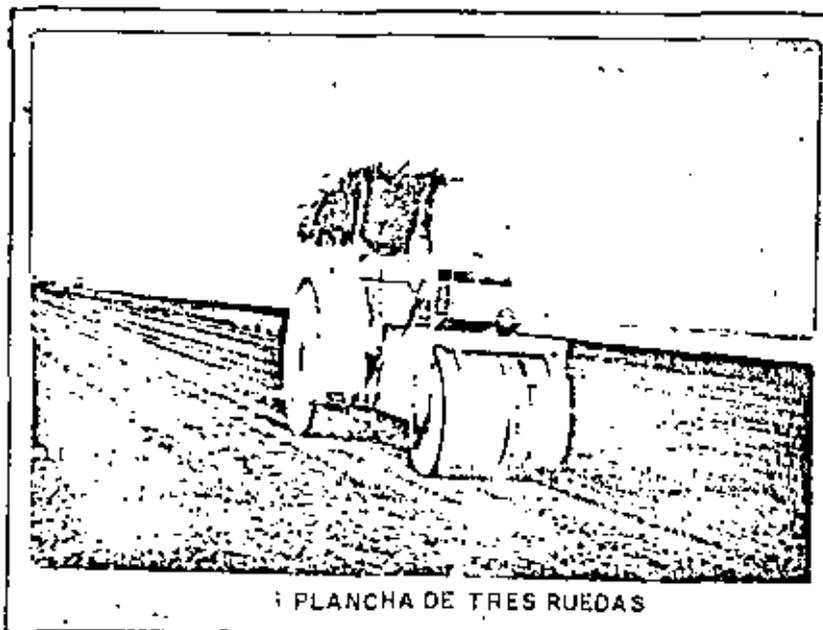
Las planchas tandem, a pesar de que son generalmente de menor peso que las de tres rodillos, suelen tener mayor compresión por centímetro lineal de generatriz que las de tres rodillos, por tener menor superficie de contacto con el material.

Tanto las planchas tandem como las de tres rodillos, tienen bajas velocidades de operación y poca seguridad al compactar las orillas de terraplenes altos.

Son efectivas en suelos de naturaleza granular donde su efecto tritura -



dór puede ser necesario; su efectividad se ve mermada en materiales granulo -  
plásticos, donde se tiende a un encarpetamiento; en materiales plásticos o co  
hesivos no tienen gran aplicación.



Resumiendo, puede decirse que estas máquinas por su lentitud y poca profundidad de acción, han perdido terreno en la compactación de grandes movimientos de tierra; también en algunas aplicaciones específicas que tienen estos equipos como la compactación de carpetas asfálticas, van siendo desplazadas por otras máquinas compactadoras.

## 2. RODILLOS NEUMATICOS.

Los rodillos neumáticos son muy eficientes y a menudo esenciales para la compactación de sub-bases, bases y carpetas, sus bulbos de presión son semejantes a los de los rodillos metálicos, pero el área de contacto permanece constante por lo que no se produce el efecto de reducción del bulbo. Por otra parte, el efecto de puenteo del rodillo metálico, sobre zonas suaves, se elimina con llantas de suspensión independiente.

Estos compactadores pueden ser jalados o autopropulsados.

Se pueden dividir conforme al tamaño de sus llantas en:

- A) De llantas pequeñas
- B) De llantas grandes

A) DE LLANTAS PEQUEÑAS.- Generalmente tienen dos ejes en tandem y el número de llantas puede variar entre 7 y 13. El arreglo de las llantas es tal que las traseras traslapan con las delanteras (Fig. 14).

Algunos de estos compactadores tienen montadas sus ruedas en forma tal que oscilan o "bailan" al rodar, lo que aumenta su efecto de amasamiento.

Estos compactadores proporcionan una presión de contacto semejante a la proporcionada por equipos de mayor peso y llantas grandes, tienen mayor maniobrabilidad, no empujan mucho material adelante de ellos, tienen poca profundidad de acción y poca flotación en materiales sueltos.

B) DE LLANTAS GRANDES.- Son generalmente arrastrados por tractor y pesan de 15 a 50 Ton. Tienen 4 ó 6 llantas en un mismo eje. Su costo horario es generalmente caro por el tipo de tractor que se utiliza para arrastrarlos.

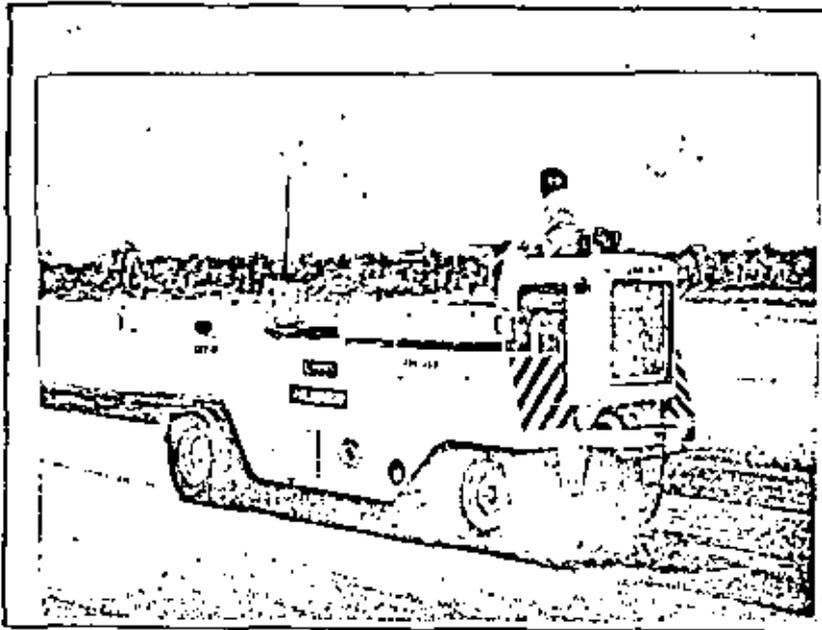
Su mejor aplicación es usarlos como compactadores de prueba.

Los dos factores más importantes que intervienen en este tipo de compactadores son:

a) Peso total.- Dependiendo del número total de llantas y del sistema de suspensión del compactador se puede conocer el peso o fuerza aplicada por

llanta. A mayor peso total, mayor carga por llanta, en caso de tratarse de una suspensión isostática.

b) La presión de inflado es importante, pero está ligada íntimamente a la carga de la llanta. Si "W" es el peso del compactador, y "p" es la presión de contacto (Fig. 15):

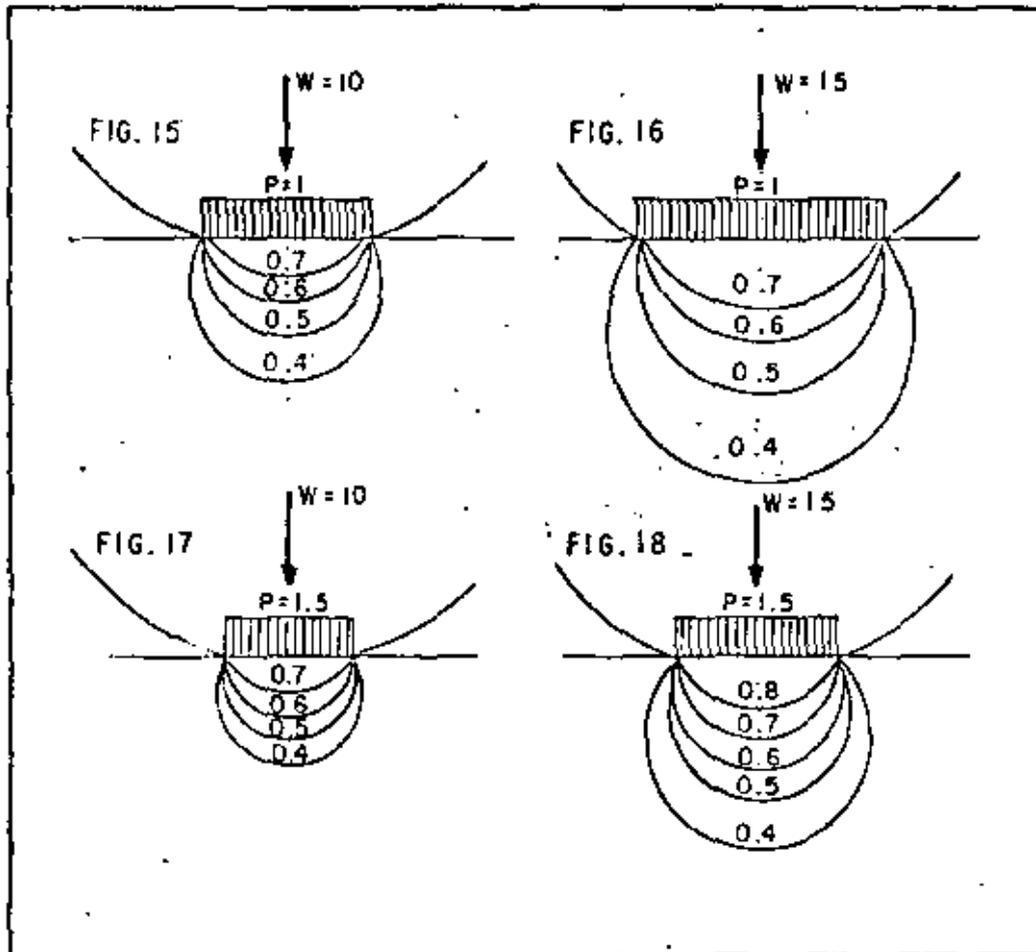


Podemos observar que si aumentamos el peso sin aumentar la presión (Fig. 16), aumentamos la profundidad del bulbo, pero no aumentamos la presión, esto nos permitiría trabajar capas relativamente mayores, pero el aumento de eficiencia es casi nulo, y las llantas durarán menos pues estamos aumentando el trabajo de deformación de la llanta.

Si aumentamos la presión sin aumentar la carga (Fig. 17) disminuimos la profundidad del bulbo de presión, y podemos llegar a encarpetar la capa. Esto puede ser eficiente si la capa es delgada como suele serlo en bases y subbases.

Si aumentamos el peso y la presión (Fig. 18), estamos aumentando la presión efectiva sobre la capa y por lo tanto el trabajo de compactación sobre la capa, sin embargo esto nos puede disminuir la vida útil de las llantas de las llantas y del equipo.

En el concepto moderno de un compactador neumático la carga sobre la llanta y la presión de inflado, deben ser las adecuadas para dar la presión de contacto suficiente para ejercer el esfuerzo requerido de compactación (es aconsejable no alejarse mucho de las recomendaciones del fabricante).

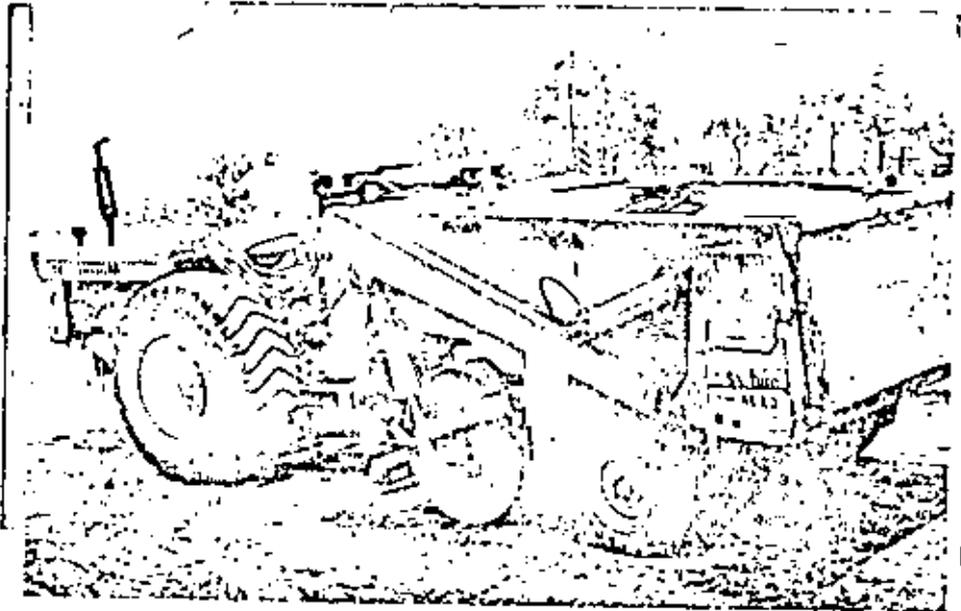


Por la razón anterior los fabricantes de equipo progresistas han provisto a sus máquinas, con implementos para variar rápidamente la presión de inflado de sus equipos.

Las presiones de inflado usuales son del orden de 50 psi, para compactadores pequeños (hasta 10 ton) y pueden llegar hasta 80 psi en compactadores grandes. (de 10 a 60 ton).

La presión de inflado no es igual a la de contacto ya que interviene (en mucho) la rigidez de la llanta inflada.

Tienen aplicaciones especializadas como la compactación del terreno natural en aeropuertos (grandes extensiones, terreno plano, alto grado de compactación, fácil acceso, etc), tienen gran utilidad para sellar las capas superiores, con lo que se logra una buena impermeabilidad.



### 3. RODILLOS PATA DE CABRA.

Son ahora raramente usados, excepto para amasamiento y compactación de arcillas donde la estratificación debe ser eliminada como en el corazón impermeable de una presa. Debido a la pequeña área de contacto de una pata y el alto peso de éstos equipos el bulbo de presión es intenso y poco profundo. La compactación se consigue por penetración y amasamiento más que por efecto del bulbo de presión (Fig. 20).

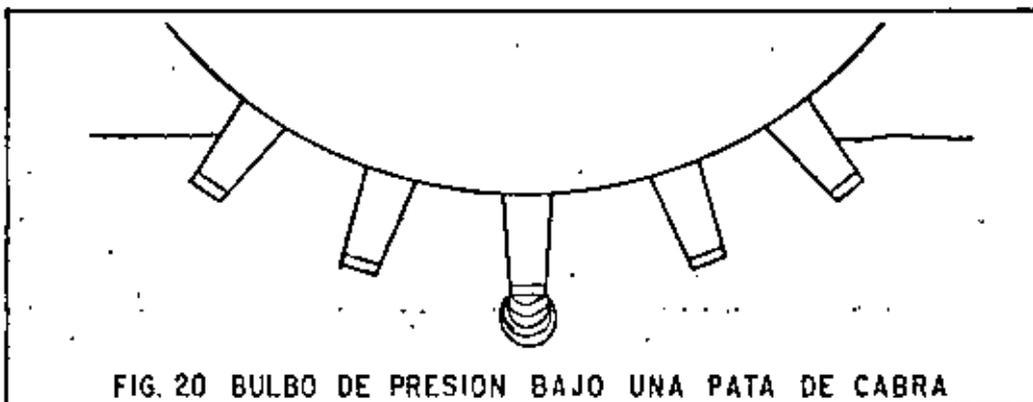
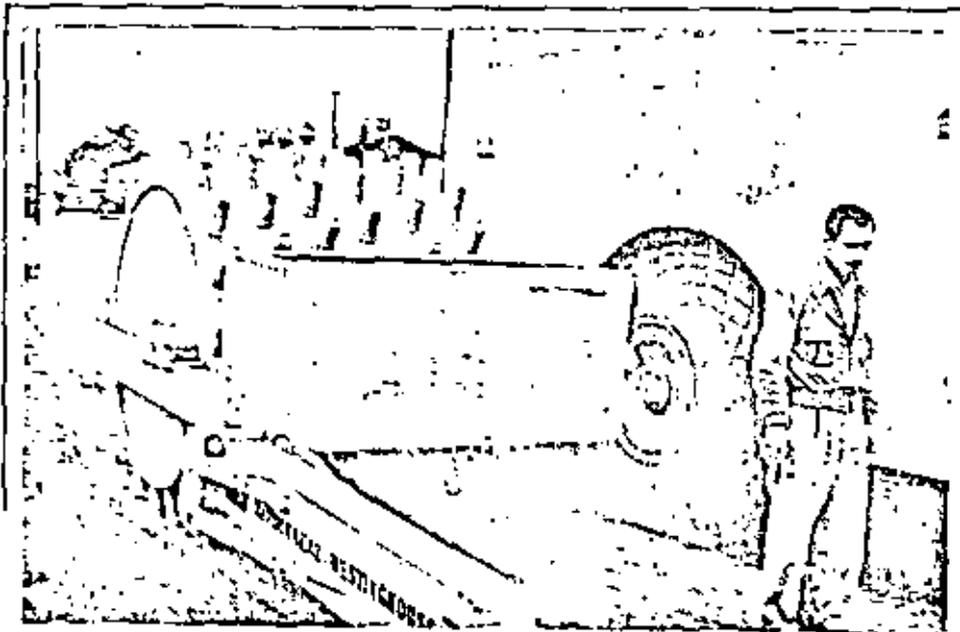


FIG. 20 BULBO DE PRESION BAJO UNA PATA DE CABRA

Los rodillos pata de cabra son lentos, tienen una gran resistencia al rodamiento, por lo que consumen mucha potencia. Este equipo es todavía usado en especificaciones algunas veces, pero su uso está declinando debido a los altos costos que tienen, usualmente por unidad de volumen compactado (Fig. 21).



#### 4. RODILLO DE REJA.

Este compactador fue desarrollado originalmente para disgregar y compactar rocas poco resistentes a la compresión, como rocas sedimentarias y algunas metamórficas, para hacer caminos de penetración transitables todo el año.

El rodillo transita sobre la roca suelta sobre el camino, rompiéndola y produciendo finos que llenan los vacíos formando una superficie suelta y estable. Como una guía la roca que se puede escarificar también se puede disgregar.

Al ser usado este equipo se encontró que era capaz de compactar a una velocidad una gran variedad de suelos. Los puntos altos de la reja producen efecto de impacto, y cuando es remolcado a alta velocidad, produce efecto de vibración, efectivo en materiales granulares. El perfil alternado alto y bajo de la rejilla produce efecto de amasamiento por lo que este rodillo también es eficiente en materiales plásticos. Desafortunadamente, como los materiales plásticos suelen ser pegajosos, se atascan de material los huecos de la reja y se reduce la eficiencia (Fig. 22).

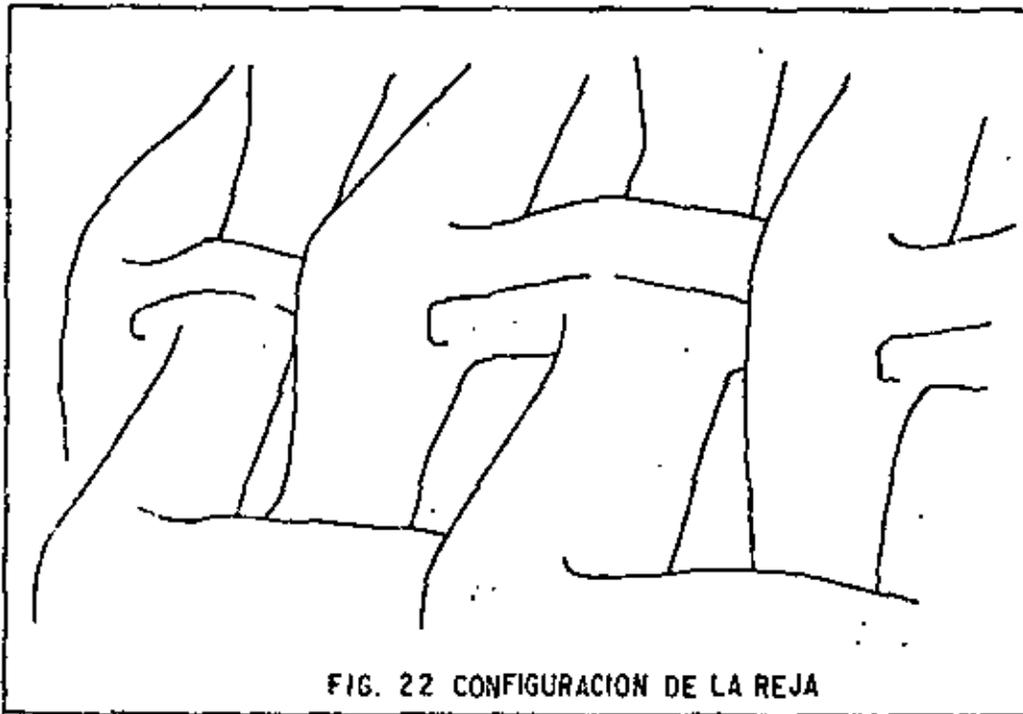


FIG. 22 CONFIGURACION DE LA REJA

Estos rodillos, debido a su misma configuración no pueden dejar una superficie tersa como puede ser una base de una carretera.

#### 5. RODILLO DE IMPACTO (TAMPING ROLLER).

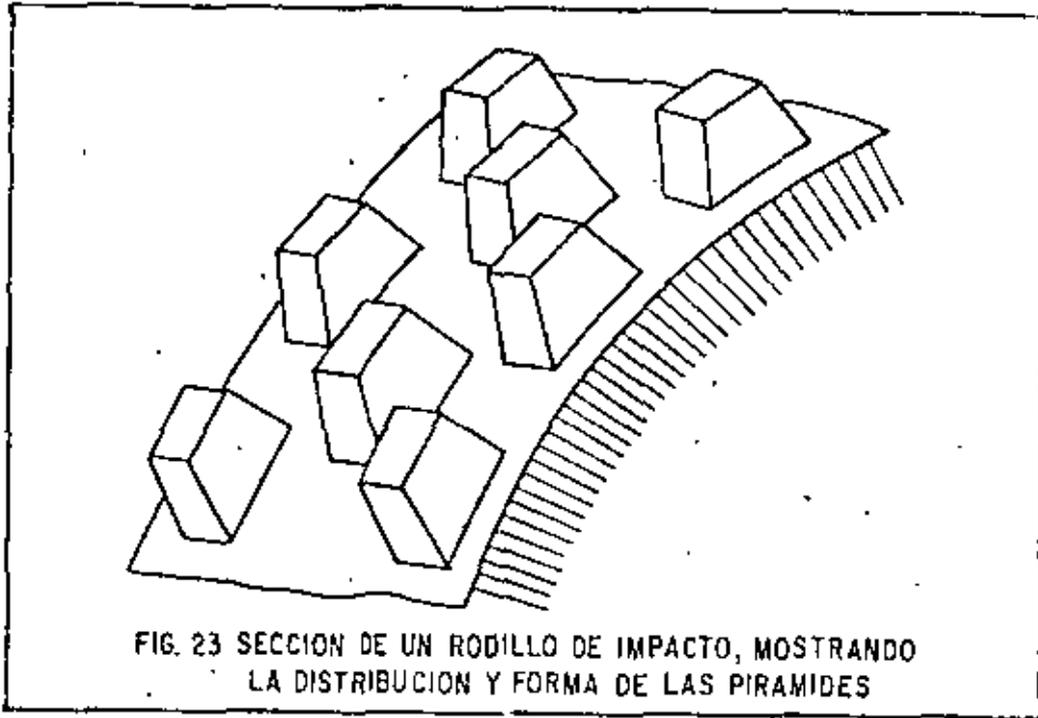
A causa de los problemas de limpieza del rodillo de reja, se diseñó un nuevo rodillo usando los mismos principios: el rodillo de impacto, es un rodillo metálico, en el que se han fijado unas salientes en forma aproximada de una pirámide rectangular truncada (Fig. 23).

Estas pirámides no son de la misma altura pues hay unas más altas que otras, siguiendo el modelo de puntos altos y bajos del rodillo de reja, esto da las mismas ventajas, pudiéndose limpiar fácilmente por medio de dientes sujetos al marco.

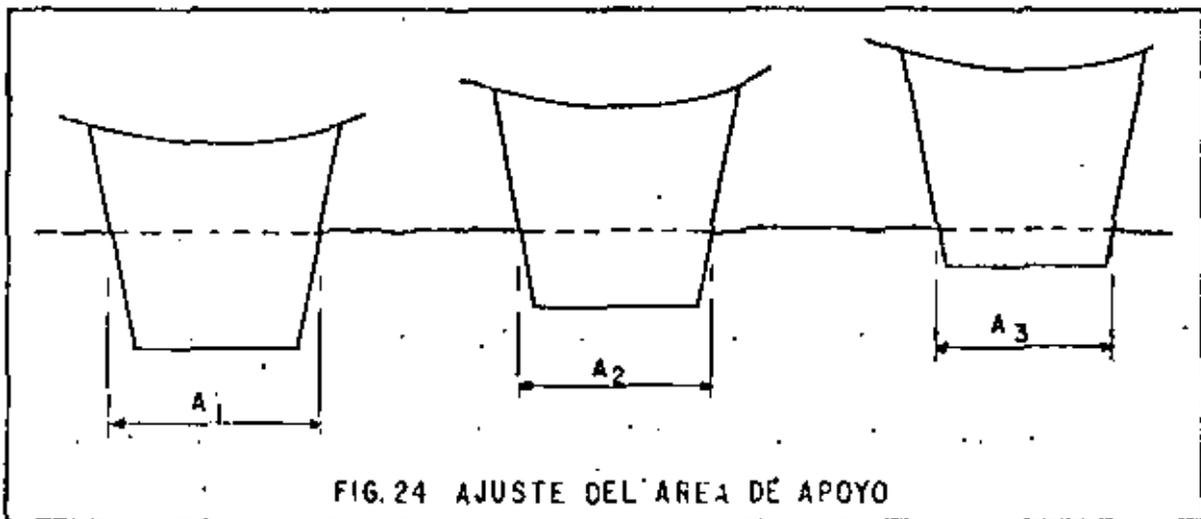
Estas salientes han sido diseñadas de tal manera que el área de contacto se incrementa con la penetración, ajustándose automáticamente la presión a la resistencia del suelo compactado (Fig. 24).

El diseño contempla también una fácil entrada y salida a la capa, lo que disminuye la resistencia al rodamiento.

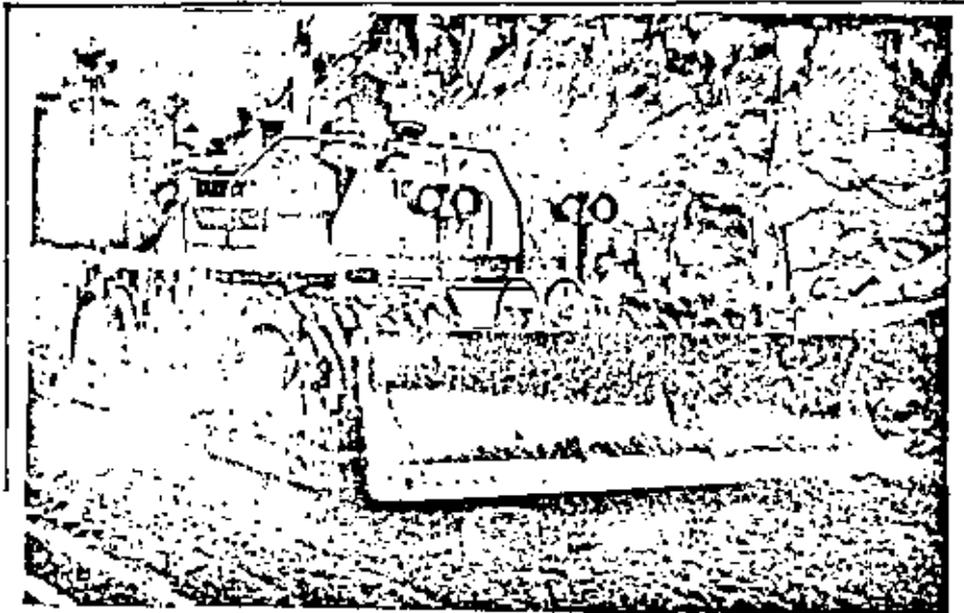
Estos rodillos han probado ser muy eficientes y eliminan estratificación en los terraplenes, esto es importante en corazones impermeables de presas.



Quando un rodillo de impacto empieza una nueva capa, que no sea mayor de 30 cm. los bulbos de presión y las ondas de impacto proveen suficiente amasamiento con la capa inferior para eliminar la estratificación que ocurre con cualquier otro compactador excepto la pata de cabra.



El rodillo de impacto ha probado ser uno de los más versátiles y económicos compactadores en terracerías, capaz de compactar eficientemente la mayor parte de los suelos (Fig. 25).



## 6. RODILLOS VIBRATORIOS.

Estos rodillos funcionan disminuyendo temporalmente la fricción interna del suelo. Como en los suelos granulares (gravas y arenas) su resistencia depende principalmente de la fricción interna (en los suelos plásticos depende de la cohesión), la eficiencia de estos rodillos está casi limitada a suelos granulares.

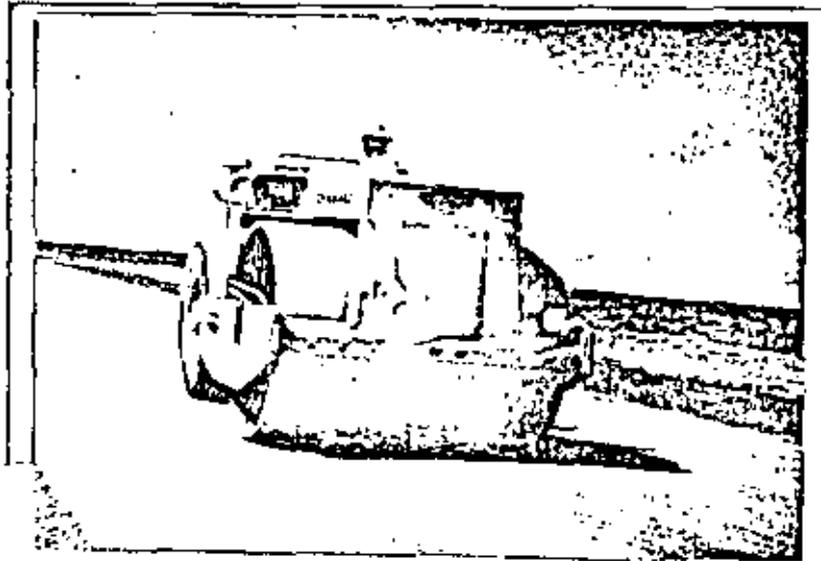
La vibración provoca un reacomodo de las partículas del suelo que resulta en un incremento del peso volumétrico, pudiendo alcanzar espesores porces de la capa (0.80 m).

Estos rodillos pueden producir un gran trabajo de compactación en relación a su peso estático ya que la principal fuente de trabajo es la fuerza dinámica de compactación. (Fig. 26).

Buscando extender ventajas a suelos cohesivos se han desarrollado rodillos pata de cabra vibratorios, en los que la fuerza y la amplitud de la vibración se han aumentado, y se ha disminuido la frecuencia. Con el mismo objeto se han acoplado dos rodillos vibratorios, "fuera de fase", a un marco rígido para obtener efecto de amasamiento.

Estos rodillos se clasifican por su tamaño, pequeños hasta 9,000 kg de fuerza dinámica y grandes de más de 9,000, pudiendo llegar hasta 20,000 kg o más. Los grandes pueden llegar a sobreesforzar suelos débiles por lo que hay que manejarlos con cuidado.

Todos los vibradores deben de manejarse a velocidades de 2.5 a 5 km/h. - Velocidades mayores no incrementan la producción, y con frecuencia no se tiene la compactación.



## VI. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA COMPACTACION.

Los factores que primordialmente influyen en la obtención de una compactación económica son:

- 1) CONTENIDO DE HUMEDAD DEL MATERIAL
- 2) GRANULOMETRIA DEL MATERIAL
- 3) NUMERO DE PASADAS DEL EQUIPO
- 4) PESO DEL COMPACTADOR
- 5) PRESION DE CONTACTO
- 6) VELOCIDAD DEL EQUIPO COMPACTADOR
- 7) ESPESOR DE CAPA.

1) **CONTENIDO DE HUMEDAD.** El agua tiene en el proceso de compactación, el papel de lubricante entre las partículas del material. Una falta de humedad exigirá mayor esfuerzo compactivo, así como también lo exigirá un exceso de la misma.

Debe recordarse que todo material tiene un contenido óptimo de humedad, para el cual se obtiene, bajo una cierta energía de compactación, una densidad máxima.

El agua, entonces, facilita el trabajo de compactación.

2) **GRANULOMETRIA DEL MATERIAL.** Para la obtención de una eficiente compactación es necesario, que haya partículas de varios tamaños en el material por compactar, ya que las partículas de menor tamaño ocuparán los espacios formados entre partículas de mayor tamaño.

Un material que contenga partículas de un solo tamaño será difícilmente compactado; sólo a través de un enérgico esfuerzo de compactación, el que provocará la fragmentación de las partículas, podrá ser densificado.

Es oportuno hacer notar aquí, que la forma de las partículas también tiene importancia en la compactación. Materiales con partículas de forma angulara son generalmente más fácilmente compactados por sus acunamientos, que materiales con partículas redondeadas.

3) **NUMERO DE PASADAS.** El número de pasadas que un equipo deba dar sobre un material dependerá de (Fig. 27):

- A) Tipo de compactador
- B) Tipo de material
- C) Contenido de humedad
- D) Forma en que se aplique la presión al material
- E) Maniobrabilidad del equipo

4) **PESO DEL COMPACTADOR.** La presión ejercida sobre el material dependerá, en parte, del peso del equipo de compactación.

5) **PRESION DE CONTACTO.** Más que el peso del compactador importa la presión de contacto; ésta depende de:

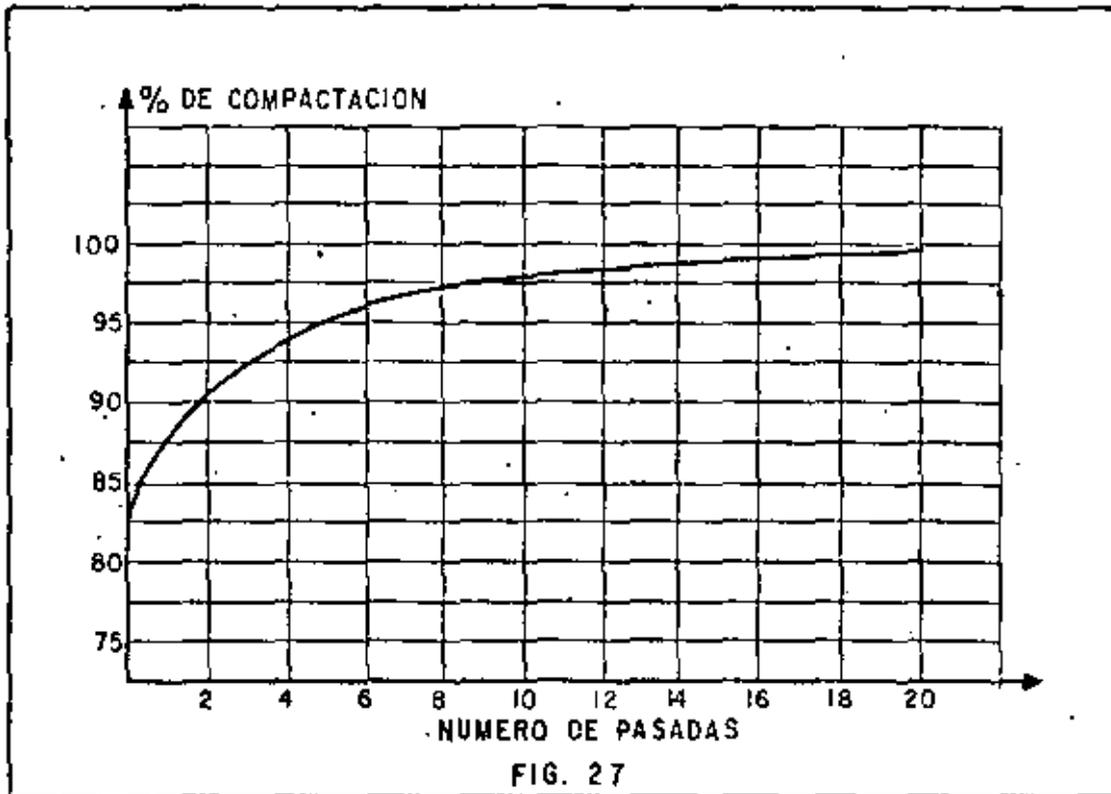


FIG. 27

- A) Tipo de material
- B) Estado del material (Suelto o Semicompacto)
- C) Area expuesta por el compactador
- D) Presión de inflado en el caso de un equipo sobre neumáticos
- E) Peso del compactador
- F) Temperatura del material tratándose de mezclas asfálticas

Los fabricantes de equipo de compactación se han preocupado por que sus máquinas ejerzan presiones de contacto uniformes, lo cual han logrado mediante suspensiones isostáticas.

Es necesario hacer hincapié, que resulta de mayor importancia la presión de contacto de un compactador, que el peso del mismo.

Por ejemplo un compactador muy pesado necesita de un mayor número de llantas o de llantas más grandes, con lo cual, el área de contacto entre el compactador y el material se incrementa, resultando la presión de contacto, similar a la de un compactador normal con menos llantas o llantas menores.

6) VELOCIDAD DEL EQUIPO.- De la velocidad de traslación del compactador y del número de pasadas, dependerá la habilidad de producción de un determinado equipo.

El equipo de compactación debe ser de una eficiencia tal, que no interfiera con el veloz equipo de depósito de material.

En virtud de que el equipo para movimiento de tierras se ha mejorado en tamaño, rapidez y eficiencia, así también los equipos de compactación se han modificado para poder mantenerse a un nivel de producción semejante.

La maniobrabilidad de un equipo compactador influye definitivamente en la velocidad del equipo.

7) ESPESOR DE CAPA. El espesor de capa por compactar dependerá esencialmente de:

- A) Tipo de material
- B) Humedad en el material
- C) Tipo de compactador
- D) Grado de compactación especificado.

Para determinar cual es el espesor de capa, de un cierto material, que puede compactar un equipo determinado, se puede uno referir al método del tubo de presión.

Suponiendo que se quiere compactar, con un determinado equipo, un material que con una presión de 2.7 kg/cm<sup>2</sup> se densifica correctamente, tratemos de encontrar el espesor de capa.

$$\text{presión} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Area}}$$

Se supone una área circular de contacto = 3.14 e<sup>2</sup>

La fuerza es el peso por llanta del compactador = F.

La presión de contacto es:

$$p_o = \frac{F}{3.14 e^2}$$

De donde:

$$e = \sqrt{\frac{F}{3.14 p_0}}$$

Suponiendo  $F = 1800 \text{ kg}$  y  $p_0 = 9 \text{ kg/cm}^2$ .

$$e = \sqrt{\frac{1800 \text{ kg}}{3.14 \times 9}} = 8 \text{ cm}$$

Recurriendo a los factores de influencia para diferentes profundidades de la teoría de Boussinesq obtenemos:

| Profundidad          | Factor de Influencia | Presión                      |
|----------------------|----------------------|------------------------------|
| $e = 8 \text{ cm}$   | $p_1 = 0.6 p_0$      | $P_1 = 5.4 \text{ kg/cm}^2$  |
| $2e = 16 \text{ cm}$ | $p_2 = 0.3 p_0$      | $P_2 = 2.7 \text{ kg/cm}^2$  |
| $3e = 24 \text{ cm}$ | $p_3 = 0.15 p_0$     | $P_3 = 1.35 \text{ kg/cm}^2$ |
| $4e = 32 \text{ cm}$ | $p_4 = 0.09 p_0$     | $P_4 = 0.81 \text{ kg/cm}^2$ |

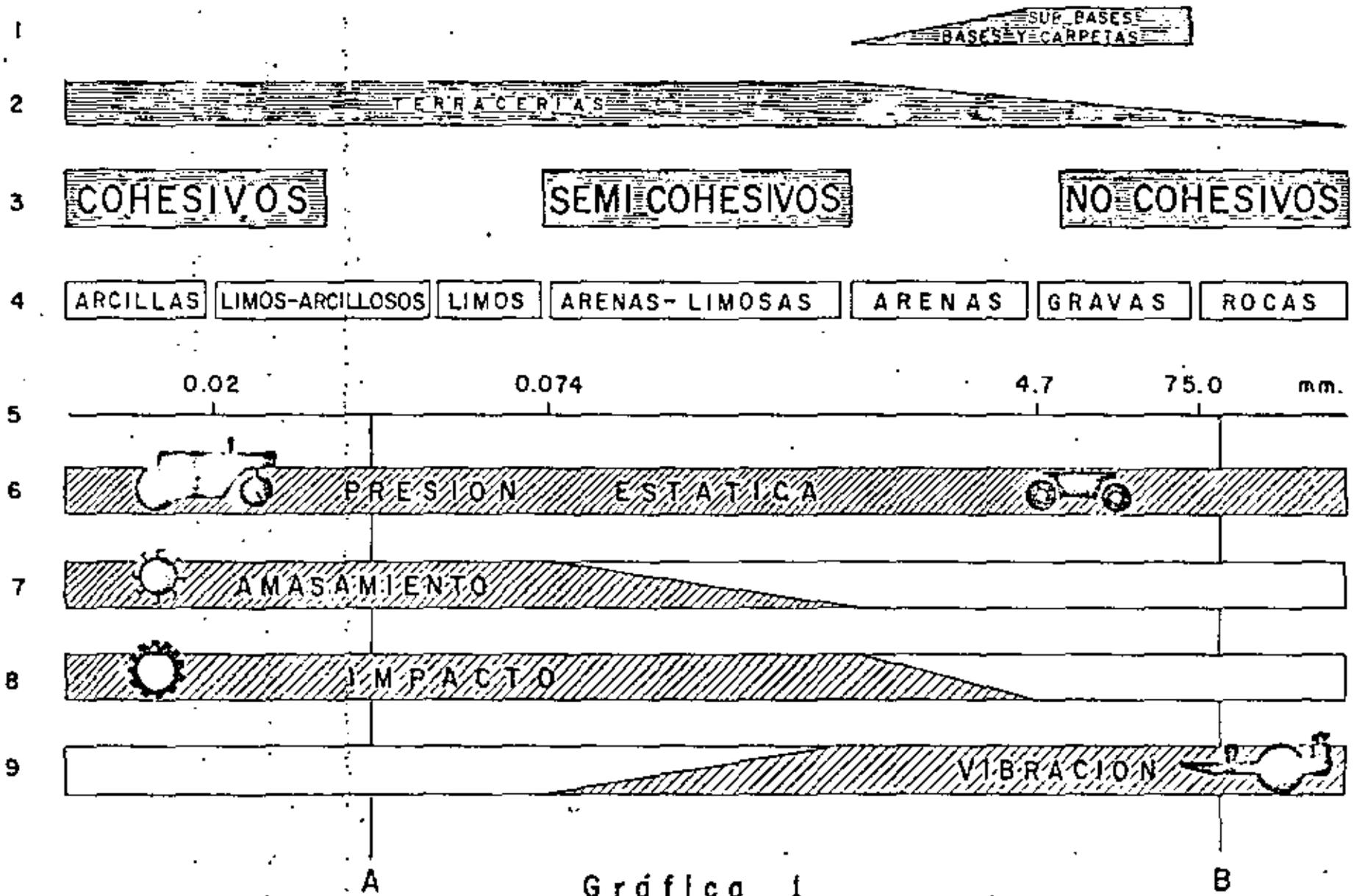
De lo anterior se concluye que para un material que requiere  $2.7 \text{ kg/cm}^2$  de presión para ser compactado eficientemente con un compactador de  $1800 \text{ kg}$  de carga por rueda y una presión de contacto de  $9 \text{ kg/cm}^2$  se puede usar un espesor de capa de  $16 \text{ cm}$ .

#### VII: SELECCION DE COMPACTADORES.

La selección del compactador más adecuado no siempre es sencilla, ya que depende de muchos factores: tipo de suelo, tipo de trabajo, método de movimiento de tierras, compatibilidad de trabajo, etc., en la selección final deben hacerse intervenir, cuando menos, los factores mencionados. Es frecuente y muy eficiente el uso de varios equipos que combinen los diferentes efectos de compactación.

Los factores más importantes que deben tomarse en cuenta para esta selección son:

# SELECCION DE EQUIPO



Gráfica 1

- 1) Tipo de Material
- 2) Tamaño de la Obra.
- ✓3) Requerimientos especiales.

### 1) TIPO DE MATERIAL

En la gráfica 1 se muestra en los renglones 4 y 5 los diferentes materiales y su respectivo tamaño en mm. En el renglón 3 se clasifican en cohesivos, semicohesivos y no cohesivos, (los más finos son cohesivos y los granulares - no cohesivos) en los renglones 1 y 2 se indica su uso más frecuente:

- 1) Sub-bases, bases y carpetas: siempre materiales no cohesivos (arenas y gravas).
- 2) Terracerías: normalmente materiales cohesivos y semicohesivos, a veces no cohesivos.

En el renglón 6: la compactación por presión estática (rodillos metálicos y neumáticos) es aplicable a todos los suelos. Limitación: bajo rendimiento, excepto en los compactadores neumáticos grandes.

En el renglón 7: la compactación por amasamiento (rodillo pata de cabra estática y pata de cabra vibratoria) es útil para suelos cohesivos y semicohesivos (arcillas, limos y algo en arenas limosas). Limitación: alto costo de la pata de cabra estática.

En el renglón 8: la compactación por impacto (rodillo de impacto y rodillo de reja) aplicable a toda clase de suelos, pero el mal acabado que dan a la capa sólo permite aplicarlos en terracerías, normalmente arcillas y limos, a veces arenas. Limitación: el rodillo de reja se atasca con los materiales cohesivos y hay que parar frecuentemente a limpiarlo, sin embargo es un excelente disgregador, por lo que el rodillo de reja es extraordinario en terracerías que necesitan disgregado.

En el renglón 9: la compactación por vibración (rodillo liso vibratorio) es aplicable en suelos no cohesivos (arenas y gravas) y a veces algunos semicohesivos (arenas limosas).

### Conclusiones:

- a) Para suelos cohesivos se debe preferir pata de cabra vibratoria o rodillo de impacto.
- b) Para suelos no cohesivos se debe preferir rodillo liso vibratorio.
- c) Para todos los suelos: rodillo neumático.

d) Las mejores combinaciones son:

Para suelos cohesivos: Neumático grande y pata de cabra o neumático y rodillo de impacto. (Línea A, gráfica 1).

Para suelos no cohesivos: Neumático grande y rodillo vibratorio (Línea B, gráfica 1).

## 2) TAMAÑO DE OBRA.

Dependiendo del tamaño de la obra y habiendo ya seleccionado el tipo de compactador adecuado para el material por compactar, se puede determinar el número de compactadores necesarios para cumplir con el plazo estipulado.

## 3) REQUERIMIENTOS ESPECIALES.

Existen casos en que por requerimientos especiales es necesario decidirse por un determinado tipo de compactador, como cuando las especificaciones solicitan un compactador que no estratifique el terraplén (corazones arcillosos), ésto nos haría seleccionar una pata de cabra vibratoria o un rodillo de impacto.

Debemos tener en mente que, en construcción pesada, la inversión en equipo es cuantiosa y que éste se adquiere usualmente fuera del país, por lo que es muy importante pesar cuidadosamente todas las posibilidades para poder escoger la máquina más eficiente; esto es: la menor inversión posible al más bajo costo unitario en el mínimo tiempo realizable.

## VIII. REGLAS A SEGUIR EN CASO DE TENER PROBLEMAS CON LA COMPACTACION.

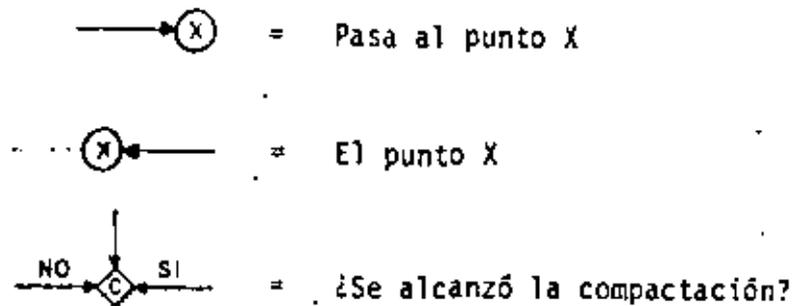
¿Qué hacer cuando el control nos indica una falla?

Esta pregunta la vamos a contestar por medio de diagramas lógicos, que siguen a continuación, en los que intenta, en forma general, mostrar un camino lógico para un análisis formal.

En estos diagramas se usan los siguientes símbolos:

 = Un hecho o una acción.

 = Una alternativa.



### IX. RENDIMIENTO DEL EQUIPO DE COMPACTACION Y COSTO DE LA COMPACTACION.

#### 1) RENDIMIENTO DE UN EQUIPO DE COMPACTACION.

Para determinar la producción horaria de un equipo de compactación se deben tomar en cuenta los siguientes factores:

- A) Ancho compactado por la máquina = A.
- B) Velocidad de operación = V
- C) Espesor de capa = E
- D) Número de pasadas para obtener la compactación especificada = N

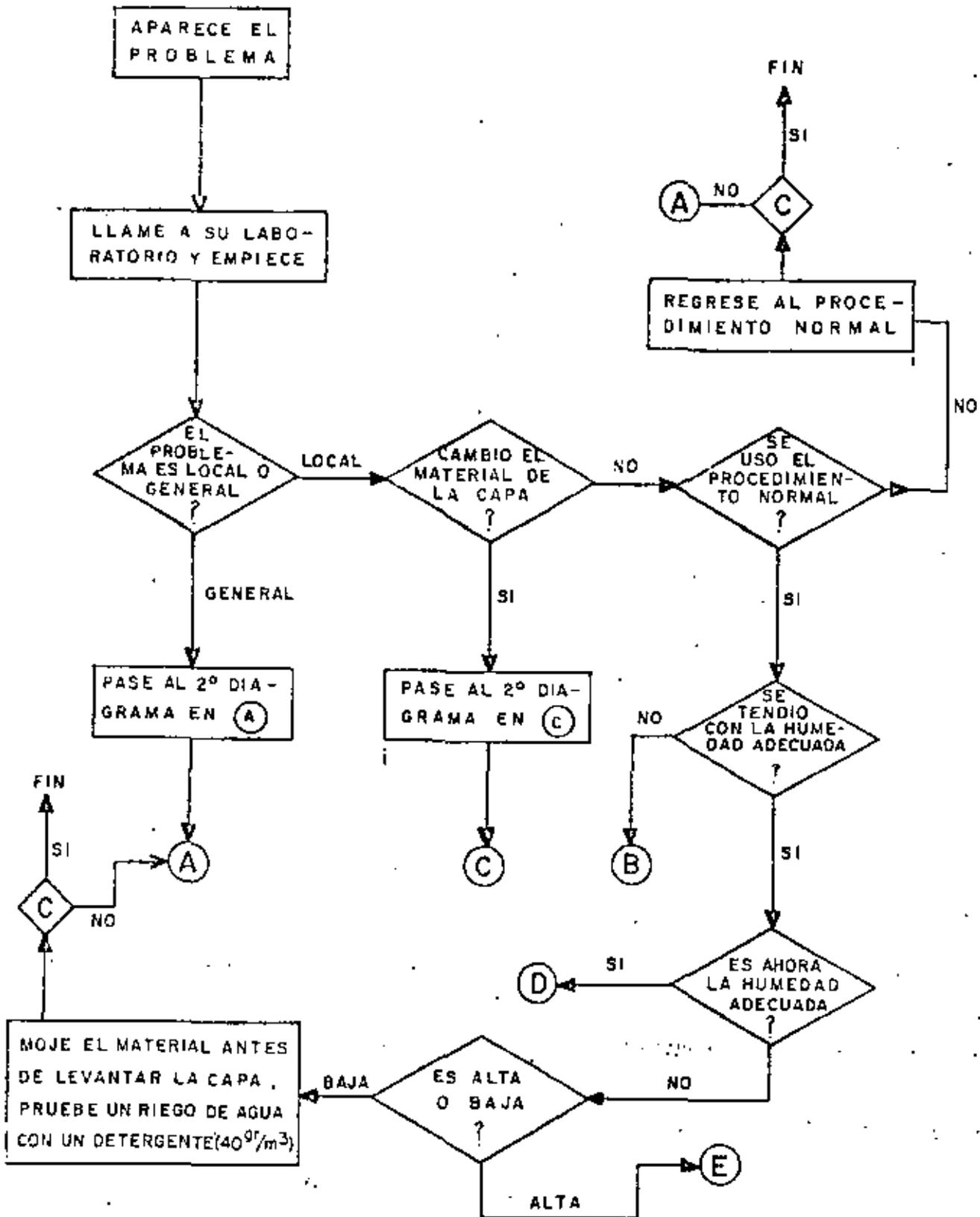
Para calcular la producción se determina primero el área cubierta en una hora con una pasada; dividiendo la cifra así obtenida entre el número de pasadas requeridas para obtener la compactación estipulada, resulta el área compactada de suelo por hora. Multiplicando esta última área por el espesor compactado de capa se obtiene el volumen compactado por hora.

La fórmula puede escribirse:

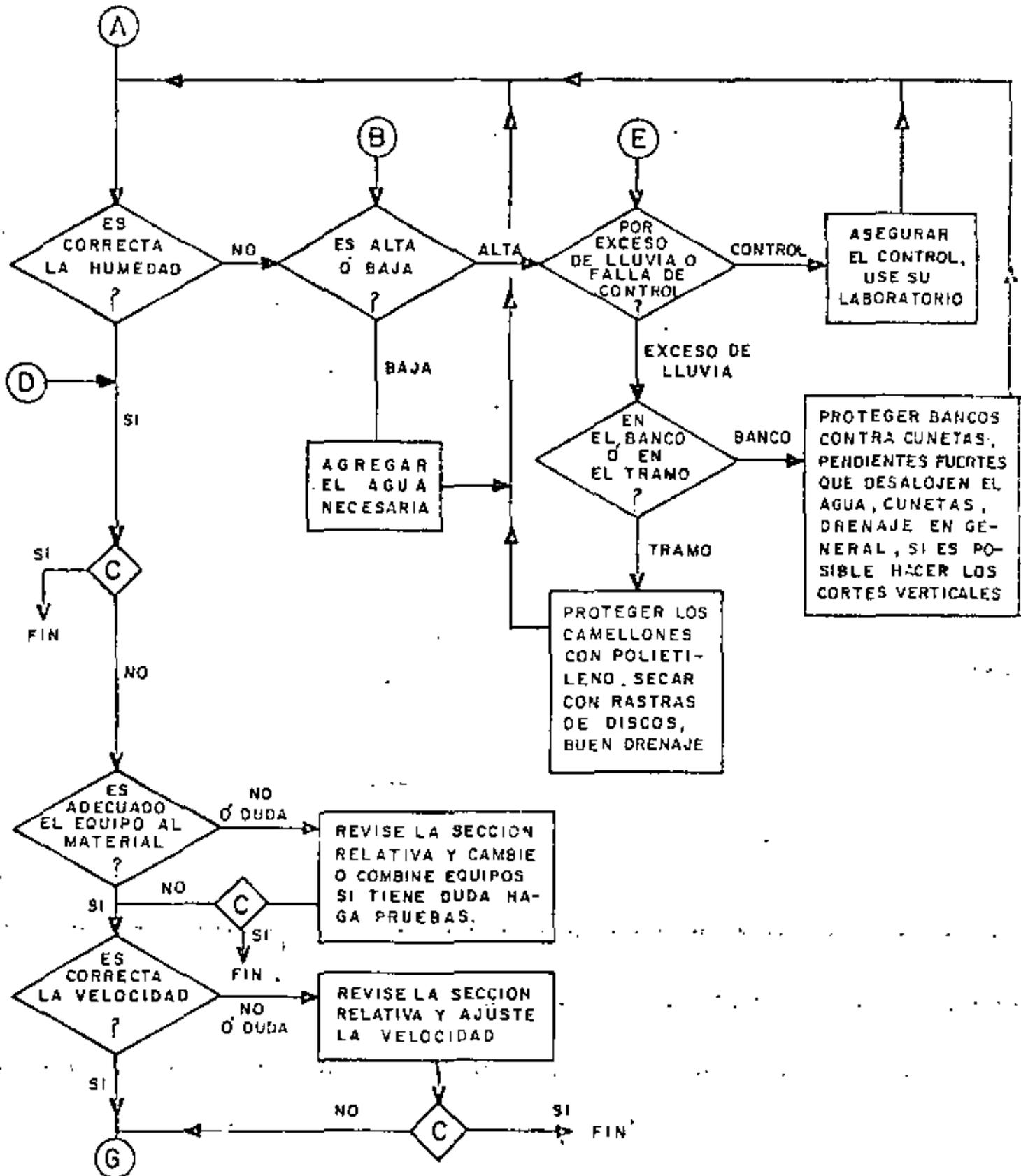
$$P = \frac{A \times V \times E \times 10 \times C}{N}$$

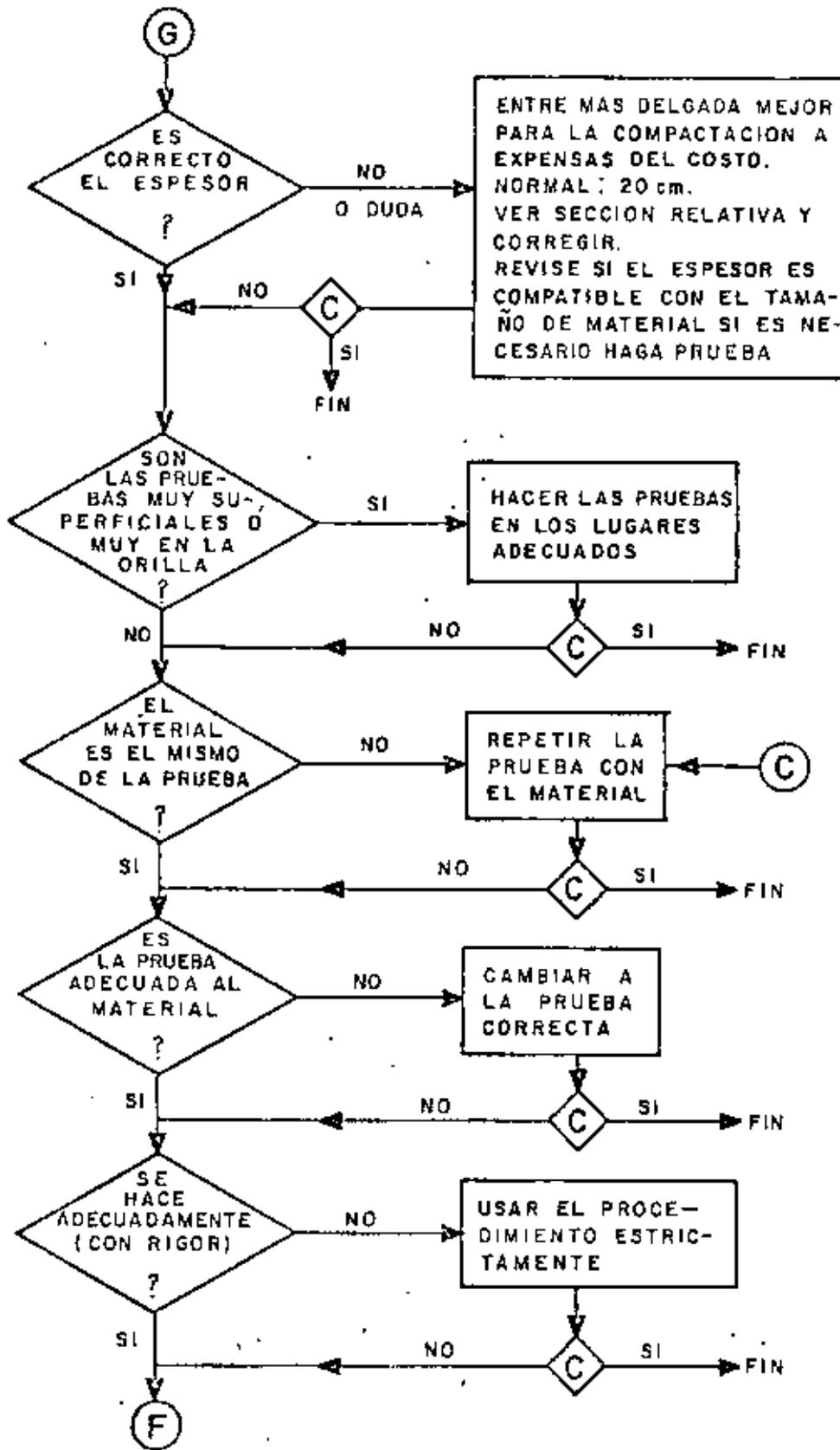
- P = Producción horaria (m<sup>3</sup>/h)
- A = Ancho compactado por la máquina (m)
- V = Velocidad (km/h)
- E = Espesor de capa (cm)
- N = Número de pasadas
- 10 = Factor de conversión
- C = Eficiencia (0.6 a 0.8)

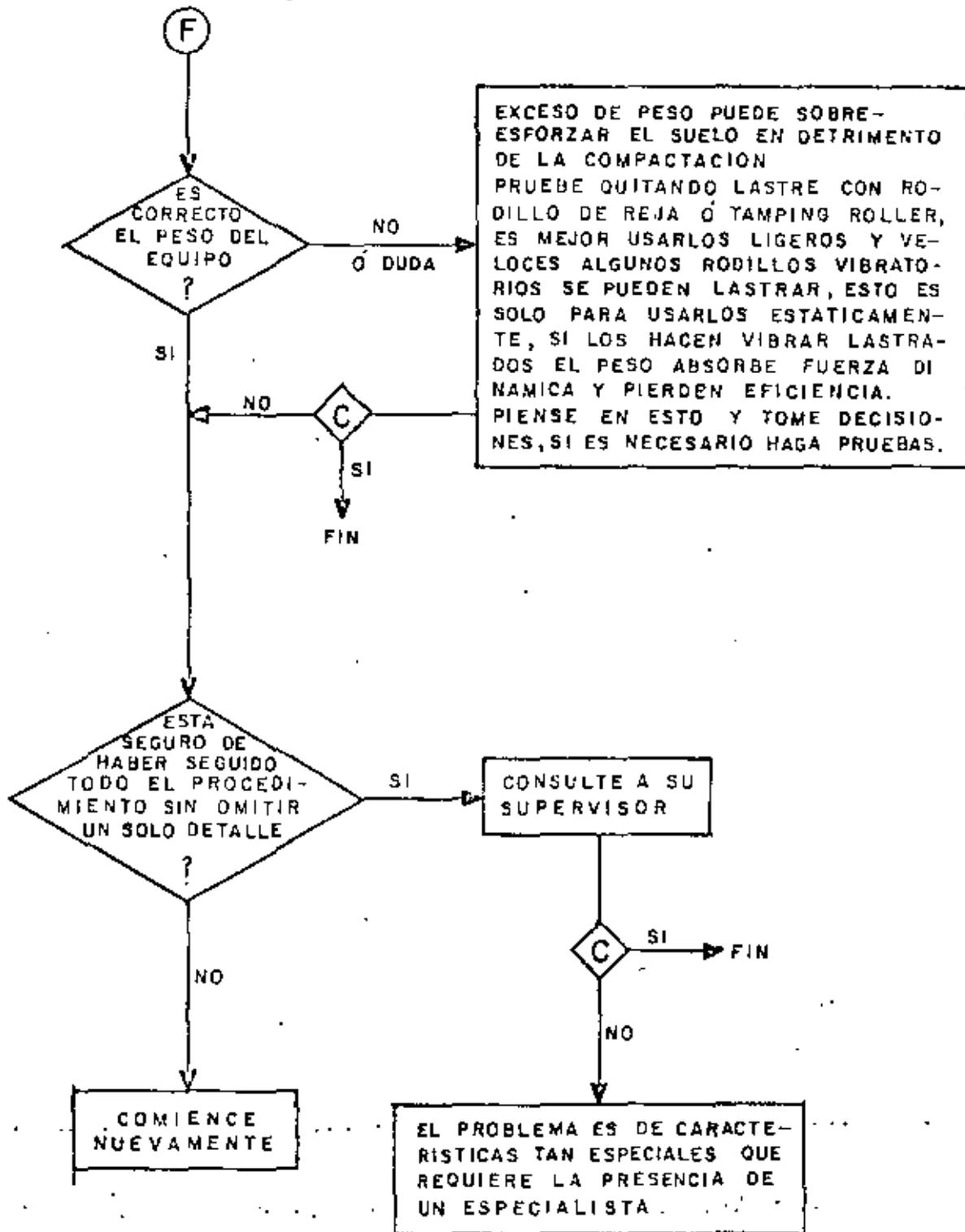
# PRIMER DIAGRAMA



# SEGUNDO DIAGRAMA







La eficiencia (C) afecta la capacidad teórica, reduciéndola por traslapes de pasadas paralelas, por tiempo perdido para dar vuelta y otros factores.

Conociendo los factores anteriores para cada equipo compactador, se pueden graficar, para espesor constante, las capacidades de producción como se indica en la gráfica (Fig. 28).

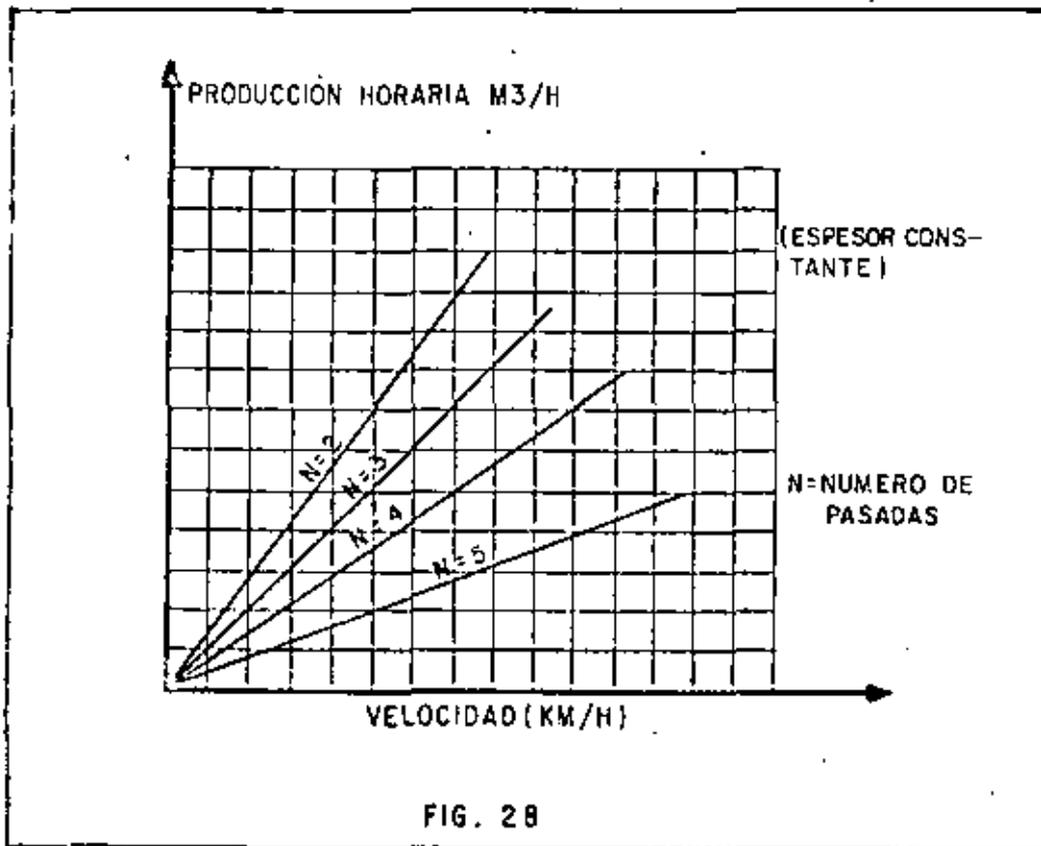


FIG. 28

## 2) COSTO DE LA COMPACTACION.

Conociendo la capacidad de producción de un compactador y para conocer el costo del (m<sup>3</sup>) compactado es necesario determinar el costo horario del equipo.

Para la determinación del costo horario del equipo de compactación se siguen los mismos pasos que se siguen para la determinación de cualquier otro costo horario de equipo de construcción.

Es decir se deben obtener:

A) Cargos fijos.

Depreciación

Intereses

Seguros

Almacenaje

Mantenimiento

B) Consumos

Combustibles

Lubricantes

Llantas

C) Operación

D) Transporte

Sumando.

A) Cargos fijos

B) Consumos

C) Operación

D) Transporte

COSTO HORARIO

Determinado el costo horario del equipo y conociendo la producción del mismo, para un cierto grado de compactación, se puede obtener el costo por (m<sup>3</sup>) compactado:

$$\text{Costo por m}^3 = \frac{\text{Costo Horario Equipo}}{\text{Producción Horaria Equipo}}$$

E J E M P L O (1)

Se tiene por compactar un material compuesto por 30% limo y 70% arena.

Consideramos que se trata de un material granular y por lo tanto, un compactador vibratorio es el indicado.

Se analizarán las siguientes alternativas:

- 1.- Rodillo liso vibratorio arrastrado por tractor agrícola.
- 2.- Rodillo sencillo liso vibratorio autopropulsado.
- 3.- Rodillo doble (tandem) vibratorio autopropulsado.

1. DETERMINACION DE COSTOS HORARIO.

- 1.- Rodillo liso arrastrado por tractor agrícola.

|                               |                             |
|-------------------------------|-----------------------------|
| PRECIO DE ADQUISICION RODILLO | \$ 180,000.00               |
| PRECIO DE ADQUISICION TRACTOR | \$ 140,000.00               |
|                               | <u>                    </u> |
|                               | \$ 320,000.00               |

Se considera una vida útil del conjunto de 8000 Horas y un valor de rescate de cero.

|              |                             |
|--------------|-----------------------------|
| Cargos fijos | \$ 102.00                   |
| Consumos     | 6.00                        |
| Operación    | 12.00                       |
| Transporte   | 3.00                        |
|              | <u>                    </u> |
|              | 123.00/HORA                 |

- 2.- Rodillo sencillo vibratorio autopropulsado

|                       |               |
|-----------------------|---------------|
| PRECIO DE ADQUISICION | \$ 390,000.00 |
|-----------------------|---------------|

Se considera también una vida útil de 8000 Horas y un valor de rescate de cero.

|              |                |
|--------------|----------------|
| Cargos fijos | \$ 112.00      |
| Consumos     | 6.00           |
| Operación    | 12.00          |
| Transporte   | 3.00           |
|              | <hr/>          |
|              | \$ 133.00/HORA |

3. Rodillo tandem vibratorio autopropulsado.

PRECIO DE ADQUISICION \$ 725,000.00

Haremos la misma consideración por lo que respecta a vida útil y valor de rescate que las alternativas anteriores.

|              |                |
|--------------|----------------|
| Cargos fijos | \$ 205.00      |
| Consumos     | 12.00          |
| Operación    | 12.00          |
| Transporte   | 3.00           |
|              | <hr/>          |
|              | \$ 232.00/HORA |

II. DETERMINACION DE PRODUCCIONES HORARIAS.

1. Rodillo arrastrado por tractor agrícola.

|                           |               |
|---------------------------|---------------|
| Ancho                     | = 1.50 m.     |
| Velocidad                 | = 4 km/h.     |
| Espesor                   | = 20 cm       |
| Número de pasadas         | = .4 para 95% |
| Coefficiente de reducción | = 0.7         |

$$p = \frac{1.50 \times 4 \times 20 \times 10 \times 0.7}{4}$$

$$p = 210 \text{ m}^3/\text{HORA}$$

2. Rodillo autopropulsado

|                           |   |            |
|---------------------------|---|------------|
| Ancho                     | = | 2.14 m     |
| Velocidad                 | = | 4 km/h     |
| Espesor                   | = | 20 cm      |
| Número de pasadas         | = | 4 para 95% |
| Coefficiente de reducción | = | 0.8        |

(Es de mayor maniobrabilidad y de mayor energía dinámica).

$$p = \frac{2.14 \times 4 \times 20 \times 10 \times 0.8}{4}$$

$$p = 342.4 \text{ m}^3/\text{HORA}$$

3. Rodillo tandem autopropulsado.

|                           |   |                          |
|---------------------------|---|--------------------------|
| Ancho                     | = | 1.50 m                   |
| Velocidad                 | = | 4 km/h                   |
| Espesor                   | = | 20 cm                    |
| Número de pasadas         | = | 2 (por ser dos rodillos) |
| Coefficiente de reducción | = | 0.8                      |

$$p = \frac{1.50 \times 4 \times 20 \times 10 \times 0.8}{2}$$

$$p = 480 \text{ m}^3/\text{HORA}$$

### III. DETERMINACION DE COSTO DE COMPACTACION.

|        | COSTO HORARIO | PRODUCCION              | COSTO x M <sup>3</sup> |
|--------|---------------|-------------------------|------------------------|
| Caso 1 | \$ 123.00/H   | 210 m <sup>3</sup> /h   | \$ 0.59/m <sup>3</sup> |
| Caso 2 | \$ 133.00/H   | 342.4 m <sup>3</sup> /h | \$ 0.39/m <sup>3</sup> |
| Caso 3 | \$ 232.00/H   | 480 m <sup>3</sup> /h   | \$ 0.48/m <sup>3</sup> |

Se hace notar que a pesar de que la diferencias de valor de adquisición entre los casos (1) y (3) es de 26% aproximadamente, se obtiene un ahorro en el caso (3), del costo de compactación, cercano al 20%.

Suponiendo que se contara con un compactador de impacto autopropulsado, con costo horario de \$ 240.00 y se tratara de compactar el material granular del ejemplo, se obtiene:

Producción Horaria:

|                           |   |  |
|---------------------------|---|--|
| Ancho                     | = | 1.94 m                                   |
| Velocidad                 | = | 9 km/Hora                                |
| Espesor                   | = | 20 cm                                    |
| Número de pasadas         | = | 8 pasadas (contando sus cuatro rodillos) |
| Coefficiente de reducción | = | 0.8                                      |

$$\text{Producción} = \frac{1.94 \times 9 \times 20 \times 10 \times 0.8}{8}$$

$$\text{Producción} = 349.2 \text{ m}^3/\text{H}$$

$$\text{Costo por compactación} = \frac{\$ 240.00/\text{H}}{349.2 \text{ m}^3/\text{H}}$$

$$\text{Costo} = \$ 0.69/\text{m}^3$$

El costo obtenido demuestra una mala selección del equipo, ya que resultó mayor que los obtenidos para rodillos vibratorios.

El caso contrario puede encontrarse cuando con un rodillo vibratorio liso se traten de compactarse materiales altamente cohesivos para los cuales el compactador de impacto resultará más ventajoso.

#### EJEMPLO (2)

- ▷ MATERIAL POR COMPACTAR: Arena bien graduada
- ▷ VOLUMEN POR COMPACTAR:  $800 \text{ m}^3$  sueltos/hora
- ▷ FACTOR DE REDUCCION AL 95% = 0.85

#### A) PLANCHA TANDEM

- ▷ Ancho rodillos = 2.00 m
- ▷ Velocidad máxima de desplazamiento 7 km/h
- ▷ Número de pasadas para obtener el 95% de compactación = 10
- ▷ Espesor compacto de capa = 12 cm
- ▷ Costo horario = \$ 68.00/h

#### B) RODILLOS VIBRATORIO AUTOPROPULSADO

- ▷ Ancho rodillo = 1.50 m
- ▷ Velocidad máxima de desplazamiento = 4 km/h.
- ▷ Número de pasadas para obtener el 95% de compactación = 3
- ▷ Espesor compacto de capa = 25 cm
- ▷ Costo horario = \$ 180.00/hora

#### PREGUNTAS

1. ¿Cuántas planchas tandem son necesarias para compactar  $800 \text{ m}^3$  sueltos por hora?
2. ¿Cuántos rodillos vibratorios son necesarios para compactar  $800 \text{ m}^3$  sueltos por hora?
3. ¿Cual equipo proporcionará una compactación más económica?

Se determinan primero las producciones horarias de Los equipos.

A) PLANCHA TANDEM

$$p = \frac{2.00 \times 7 \times 12 \times 10 \times 0.8}{10}$$

$$p = 134.4 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (compactos)}$$

B) RODILLO VIBRATORIO

$$p = \frac{1.50 \times 4 \times 25 \times 10 \times 0.8}{3}$$

$$p = 400 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (compactos)}$$

Como las producciones se han determinado en forma compacta y el volumen por hora por compactar está dado en m<sup>3</sup> sueltos, se debe convertir este último también a forma compacta.

$$\text{Volumen suelto} \times \text{factor de reducción} = \text{Vol compacto}$$

$$\text{Vol compacto} = 800 \text{ m}^3/\text{h} \times 0.85$$

$$= 680 \text{ m}^3/\text{h}$$

R E S P U E S T A S :

1. Se necesitan tantas planchas como:

$$\frac{680 \text{ m}^3/\text{h}}{134.4 \text{ m}^3/\text{h}} = \text{No. de planchas}$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ de planchas} = 5.06$$

Se pueden utilizar 5 unidades, pero con utilización óptima que frecuentemente resulta difícil de obtener.

Se recomienda usar 6 unidades.

2. Los rodillos vibratorios necesarios son:

$$\frac{680 \text{ m}^3/\text{h}}{400 \text{ m}^3/\text{h}} = \text{No. de rodillos}$$

$$\text{No. de rodillos} = 1.7$$

$$\text{No. de rodillos} = 2$$

Usando dos rodillos tendremos como factor de seguridad 0.3 de rodillo.

3. Determinación del costo de compactación:

A) Planchas tandem.

$$\text{Costo} = \frac{\text{Costo horario}}{\text{Producción}}$$

$$\text{Costo} = \frac{\$ 68.00/\text{h}}{134.4 \text{ m}^3/\text{h}}$$

$$\text{Costo} = \$ 0.51/\text{m}^3$$

B) Rodillos vibratorios.

$$\text{Costo} = \frac{\$ 180.00/\text{h}}{400 \text{ m}^3/\text{h}}$$

$$\text{Costo} = \$ 0.45/\text{m}^3$$

### EJEMPLO (3)

Una compañía dispone para un trabajo de terracerías, de un rodillo liso vibratorio autopropulsado con las siguientes características:

Ancho del rodillo = 1.50 m

Velocidad máxima de desplazamiento = 5 km/h

Número de pasadas para obtener el 100% de compactación = 9

Espesor compacto de capa = 18 cm

Costo horario = \$ 180.00/h

El material por compactar es una arcilla limosa y el volumen total es de 900,000 m<sup>3</sup> compactos.

### PREGUNTA.

¿Se justifica la adquisición de un compactador de impacto con las siguientes características?

Costo de adquisición = \$ 850,000.00

Costo horario = \$ 230.00/h

Producción horaria al 100% de compactación = 230 m<sup>3</sup>/h

¿Cuánto es el ahorro total por compactación?

Se debe determinar para cada equipo el costo de compactación.

A) Para rodillo vibratorio

$$\text{Producción} = \frac{1.50 \times 4 \times 18 \times 10 \times 0.8}{9}$$

$$\text{Producción} = 96 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Costo compactación} = \frac{\$ 180.00/\text{h}}{96 \text{ m}^3/\text{h}}$$

$$\text{Costo compactación} = \$ 1.88/\text{m}^3$$

B) Para compactador de impacto.

$$\text{Costo compactación} = \frac{\$ 230.00/h}{230 \text{ m}^3/h}$$

$$\checkmark \text{Costo compactación} = \$1.00/\text{m}^3$$

Comparando un costo contra el otro, se observa que existe una diferencia de \$ 0.88/m<sup>3</sup> a favor del compactador de impacto.

Como el volumen por compactar es de 900,000 m<sup>3</sup>, el ahorro total por compactación es de \$ 792,000.00 el cual justifica ampliamente la adquisición del compactador de impacto, que en este caso específico, resultaría el adecuado para el material por tratar.

#### X. CONCLUSIONES.

1. La forma de mejorar los elementos mecánicos en un suelo es la compactación.
2. Los efectos más importantes que produce una buena compactación en un suelo son: Resistencia mecánica, minimización de asentamientos y reducción de la permeabilidad.
3. El factor de mayor importancia para dar una compactación óptima en un suelo es el contenido de humedad del material.
4. Los esfuerzos de compactación pueden transmitirse al suelo por la combinación de uno o más de los siguientes efectos: Presión estática, impacto, vibración y amasamiento.
5. El compactador que deba usarse dependerá básicamente del tipo de suelo que se quiera compactar (gráfica 1).
6. La selección de compactadores deberá hacerse con mucho cuidado y tratando de hacer intervenir las variables posibles ya que de esto dependerá el éxito económico y funcional de la compactación.
7. De un buen control depende que la compactación se lleve a cabo correctamente.



centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



CURSO: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS

TEMA: CARPETAS DE RIEGOS

ING. FEDERICO ALCARAZ LOZANO



## CONSTRUCCION DE CARPETAS ASFALTICAS DE RIEGOS, CARPETAS DE MEZCLA EN FRIO CON PLANTA ESTACIONARIA Y CARPETAS DE MEZCLA EN EL LUGAR.

### I.- EQUIPOS Y MATERIALES.

Antes de describir los procedimientos de construcción, hablaremos de los equipos y materiales que intervienen en ellos.

- 1.- PETROLIZADORA. Esta máquina consiste básicamente en un tanque de almacenamiento para el asfalto y está provista de un sistema de calentamiento, de una bomba de presión, una barra de riego con espreas, tacómetro, termómetro y aditamento de medición de volúmenes.

Esta máquina debe ser capaz de regar los asfaltos de una manera uniforme y dosificada.

Para ello, el asfalto debe tirarse a una temperatura adecuada, y la presión en las espreas debe ser uniforme.

Para calentar los asfaltos a la temperatura indicada está provista de unos quemadores que pueden ser de diesel o de gas. Para mantener una presión y un flujo uniforme sobre la barra de riego, está provista de una bomba de engranes movida por un motor especial para ello.

Para operarla se siguen las siguientes operaciones:

- a) Se llena con una cantidad mayor a la que se va a regar (200 ó 300 Lts más).
- b) Se encienden los quemadores para calentar el asfalto a la temperatura adecuada, la que se vigila por medio del termómetro.
- c) Se calcula la velocidad de la máquina en función del número de litros por segundo de asfalto que tiran las barras y de la dosificación de asfalto para el riego.

Por ejemplo, sabemos que por cada metro de barra se tiran 4 lts/seg y que debemos tirar 1.2 lts/m<sup>2</sup>,

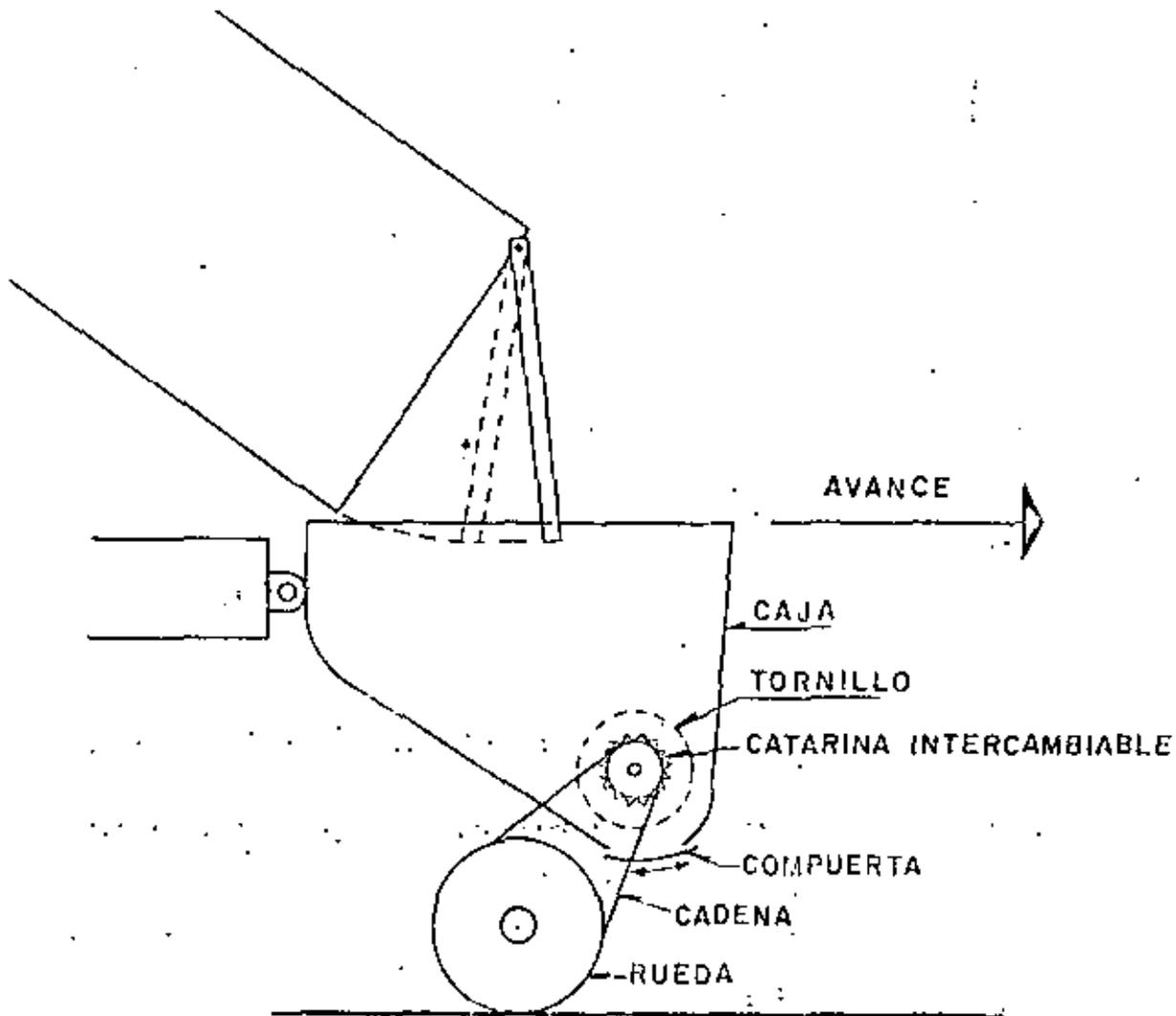
$$\text{velocidad} = \frac{4 \text{ lts/seg} \cdot \text{m}}{1.2 \text{ lts/m}^2} = 3.33 \text{ m/seg}$$

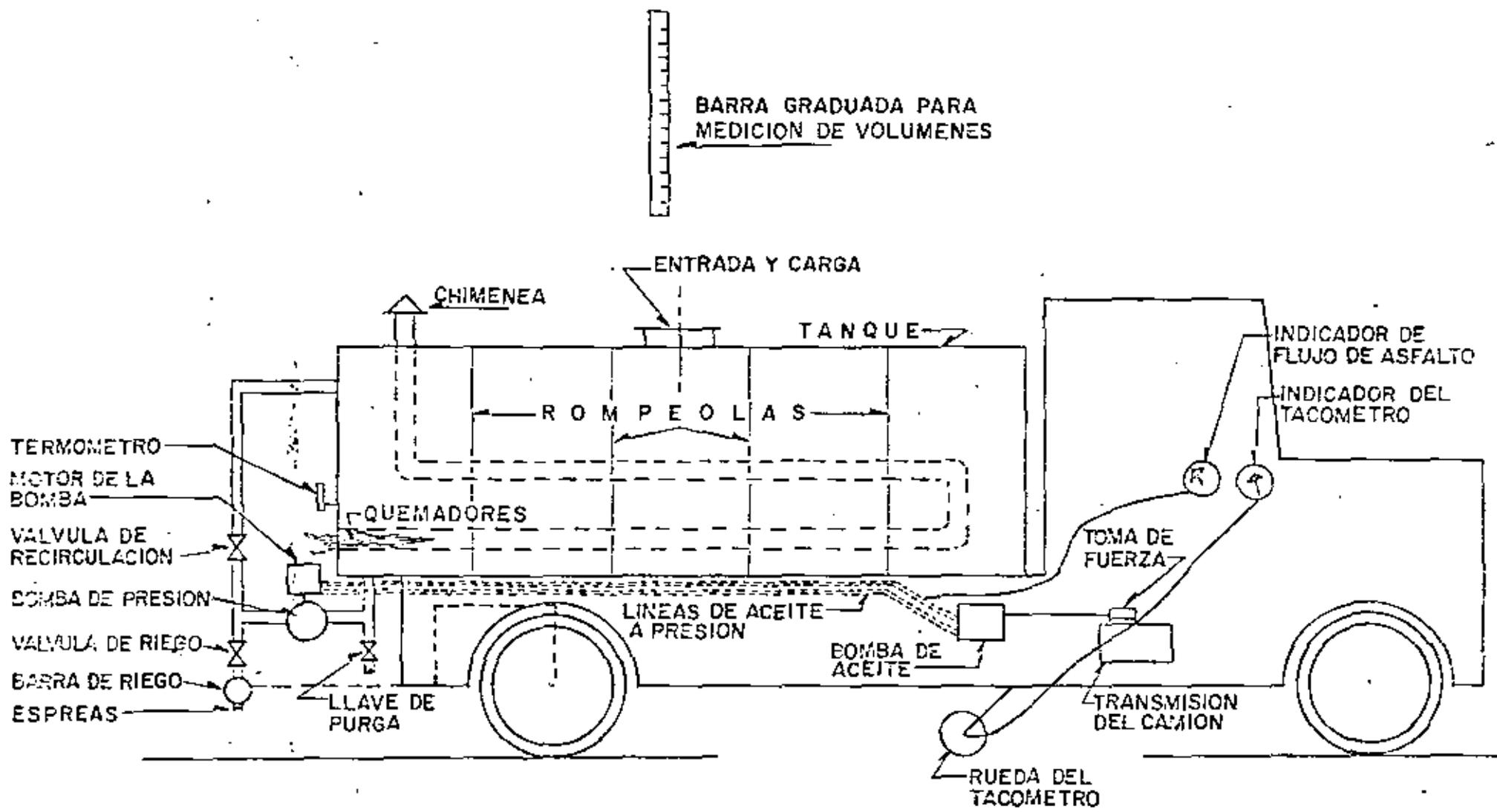
Esta velocidad se controla con el tacómetro que es una pequeña rueda adicional que mide velocidades pequeñas con una gran precisión. La carátula del tacómetro está cerca del volante visible al operador.

De esta forma la petrolizadora está lista para operar.

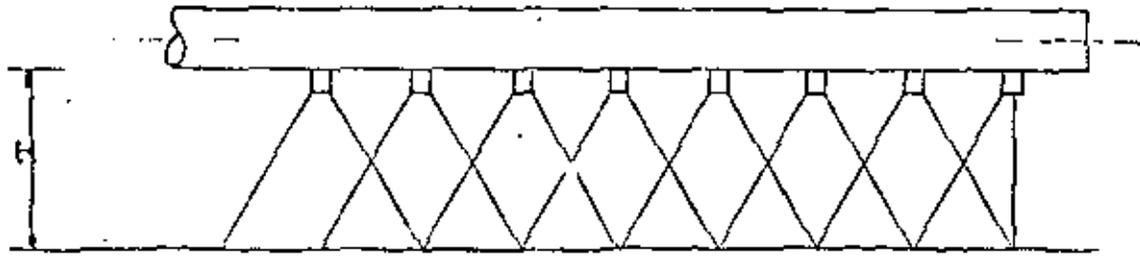
## 2.- ESPACIADOR DE MATERIALES PÉTREOS.

Esta máquina se engancha a un camión de volteo y sirve para extender el material pétreo de una manera uniforme y continua.

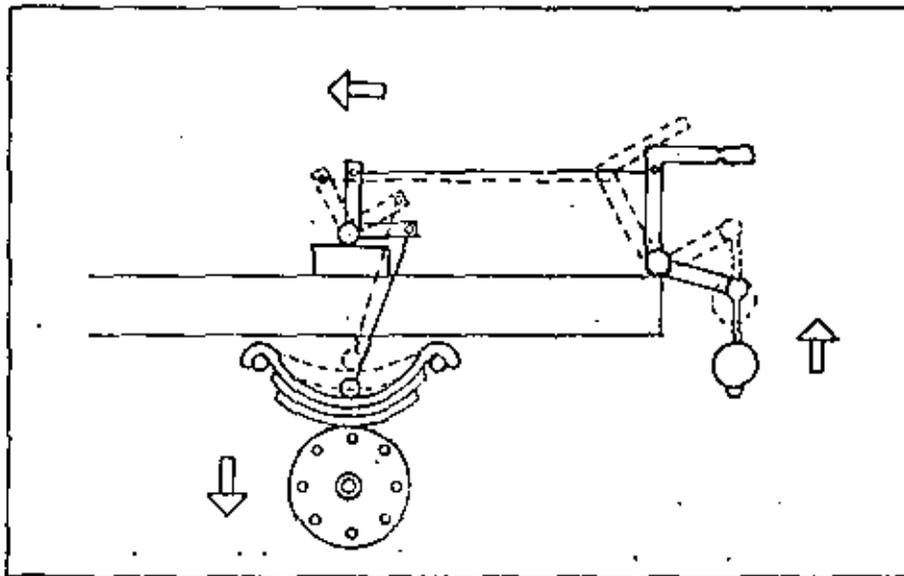




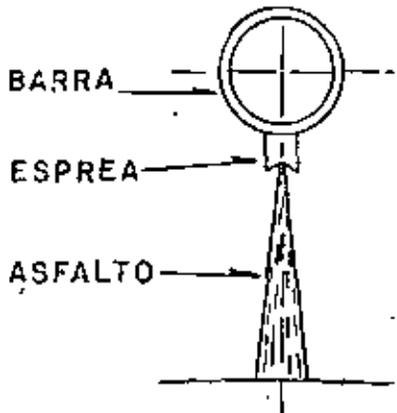
CROQUIS DE UNA PETROLIZADORA



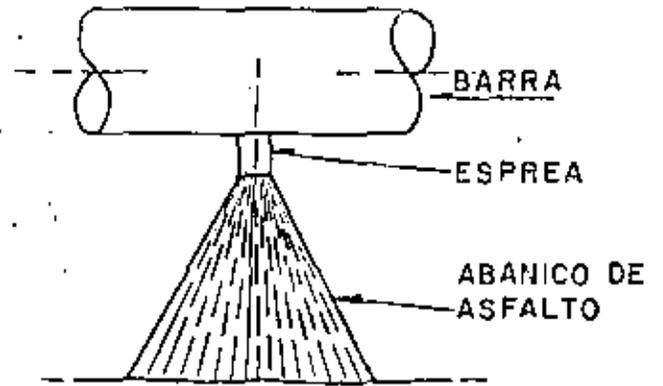
VISTA DE FRENTE (CORRECTO)  
FORMA COMO LAS ESPREAS DISTRIBUYEN  
EL ASFALTO (CONTINUACION)



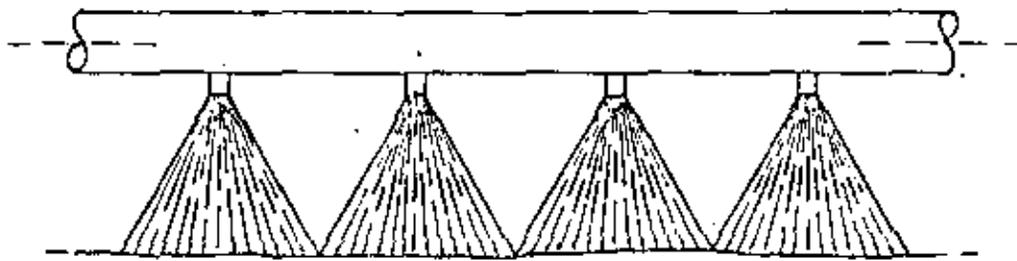
MECANISMO PARA MANTENER UNIFORME  
LA ALTURA DE LA BARRA DE RIEGO



VISTA DE LADO



VISTA DE FRENTE



VISTA DE FRENTE (INCORRECTO)

FORMA COMO LAS ESPREAS DISTRIBUYEN EL ASFALTO

### CROQUIS DE UN ESPARCIDOR

El material pétreo cae del camión a la caja del espaciador, un tornillo de Arquímedes movido por una cadena desde las ruedas del espaciador se encarga de uniformizar el flujo del material y una compuerta, movida por una palanca que regula el flujo del material. Estas máquinas se regulan a base de cambiar la catarina, la que controla la velocidad del tornillo.

Los principales defectos a evitar en carpetas de riegos son:

- 1) Rayado (aparición de rayas longitudinales).
- 2) Poco asfalto.
- 3) Desprendimiento de agregados.

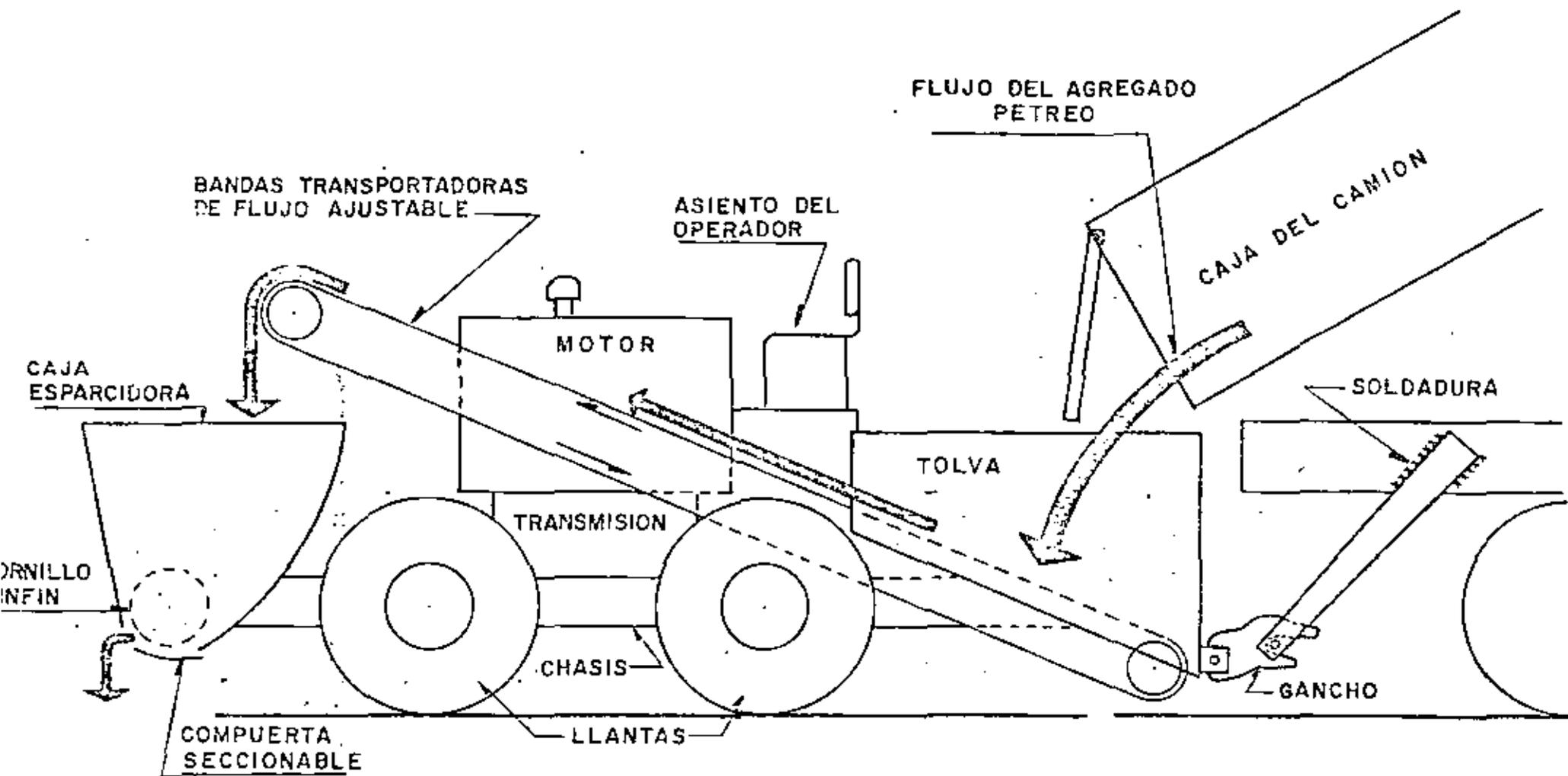
Estos se evitan con riegos uniformes y bien dosificados. Hasta hace poco tiempo, esto era muy difícil de hacer por las siguientes razones:

- a) Riegos de asfalto: la dosificación dependía de la habilidad del operador para mantener la velocidad es decir si el operador tenía que llevar la petrolizadora a 300 pies por minuto, normalmente la llevaba entre 250 y 350 f.p.m., lo que hacía el riego poco uniforme.

Por otra parte la altura de la barra de riego, generalmente fija a la máquina, dependía de la carga variable del asfalto, empezando baja la altura de la barra y terminando alta al vaciarse la petrolizadora. Esto provocaba traslapos variables de los chorros de las espaldas, lo que daba por resultado un riego rayado.

En las petrolizadoras modernas, estos defectos se han eliminado por medio de mecanismos que regulan el flujo del asfalto en función de la velocidad y mantienen fija la altura de la barra de riego.

- b) Riegos de material pétreo. Los continuos cambios del esparcidor colgado a los camiones provocaban retardos en el tiempo de riego y no permitían un riego continuo pero sí provocaban traslapos defectuosos en cada cambio. Esto se ha remediado con esparcidores autopropulsados de enganche rápido a los camiones y que disponen de tolvas de capacidad suficiente para permitir el cambio de camiones sin interrumpir el riego.



CROQUIS DE UN ESPARCIDOR  
 AUTOPROPULSADO

3.- MATERIALES PÉTREOS PARA CARPETAS DE RIEGOS.

Los materiales pétreos que se empleen en la construcción de carpetas asfálticas por el sistema de riegos, se denominarán como se indica en la tabla siguiente:

| Denominación del material pétreo | Que pase por malla de | Y se retenga en malla de |
|----------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| 1                                | 25.4 mm (1")          | 12.7 mm (1/2")           |
| 2                                | 12.7 mm (1/2")        | 6.3 mm                   |
| 3-A                              | 9.5 mm (3/8")         | Núm. 8                   |
| 3-B                              | 6.3 mm (1/4")         | Núm. 8                   |
| 3-E                              | 9.5 mm (3/8")         | Núm. 4                   |

y deben cumplir las siguientes granulometrías:

| Mallas              | Condiciones    | Denominación del material pétreo |          |         |         |         |
|---------------------|----------------|----------------------------------|----------|---------|---------|---------|
|                     |                | 1                                | 2        | 3-A     | 3-B     | 3-E     |
| De 31.8 mm (1 1/4") | Debe pasar     | 100%                             |          |         |         |         |
| De 25.4 mm (1")     | Debe pasar     | 95% mín                          |          |         |         |         |
| De 19.1 mm (3/4")   | Debe pasar     | 100%                             |          |         |         |         |
| De 12.7 mm (1/2")   | Debe pasar     |                                  | 95% mín  | 100%    |         |         |
|                     | Debe retenerse | 95% mín                          |          |         |         |         |
| De 9.5 mm (3/8")    | Debe pasar     |                                  |          | 95% mín | 100%    | 95% mín |
|                     | Debe retenerse |                                  |          |         | 95% mín |         |
| De 6.3 mm (1/4")    | Debe pasar     |                                  |          |         | 95% mín |         |
|                     | Debe retenerse |                                  | 95% mín  |         |         |         |
| Núm. 4              | Debe retenerse |                                  |          |         |         | 95% mín |
| Núm. 8              | Debe retenerse |                                  | 100% mín | 95% mín | 95% mín | 100%    |
| Núm. 40             | Debe retenerse |                                  |          | 100%    | 100%    |         |

Además estarán libres de polvo, de materia orgánica y de cualquier otro material extraño al pétreo, su humedad será como máximo la humedad de absorción y deberán pasar las siguientes pruebas:

- a) De desgaste Los Angeles, para cualquier tipo de material pétreo.....30% máximo.
- b) De intemperismo acelerado .....12% máximo.
- c) De forma de las partículas, para partículas alargadas y/o en forma de laja.....35% máximo.
- d) De afinidad con el asfalto:
  - d.1) Desprendimiento por fricción:.....25% máximo.
  - d.2) Cubrimiento con asfalto:.....90% mínimo.

4.- MATERIALES ASFALTICOS: (para todas las carpetas).

Los materiales asfálticos podrán ser cualesquiera de los siguientes:

- a) Asfaltos rebajados de fraguado rápido, que son los materiales asfálticos líquidos, compuestos de un cemento asfáltico y un disolvente del tipo de la nafta o gasolina.
- b) Asfaltos rebajados de fraguado medio, que son los materiales asfálticos líquidos, compuestos de un cemento asfáltico y un disolvente del tipo del queroseno.
- c) Asfaltos rebajados, de fraguado lento que son los materiales asfálticos líquidos, compuestos de un cemento asfáltico y un disolvente de baja volatilidad o aceite ligero.
- d) Emulsiones asfálticas, que son los materiales asfálticos líquidos estables, formados por dos fases no miscibles, en los que la fase continua de la emulsión está formada por agua y la fase discontinua por pequeños glóbulos de asfalto. Dependiendo del agente emulsificante, las emulsiones asfálticas pueden ser aniónicas, si los glóbulos de asfalto tienen carga electronegativa o catiónicas, si los glóbulos asfálticos tienen carga electropositiva. Las emulsiones asfálticas pueden ser de rompimiento rápido, medio y lento.

Y deberán satisfacer las siguientes pruebas:

a) Asfaltos rebajados de fraguado rápido.

| Características   | G R A D O |        |         |         |         |
|---|-----------|--------|---------|---------|---------|
|   | FR-0      | FR-1   | FR-2    | FR-3    | FR-4    |
| Pruebas al material asfáltico   |           |        |         |         |         |
| Punto de inflamación (copa abierta de Tag), °C mínimo.....                              |           |        | 27      | 27      | 27      |
| Viscosidad Saybolt-Furol:   |           |        |         |         |         |
| A 25°C, segundos.....   | 75-150    |        |         |         |         |
| A 50°C, segundos.....   |           | 75-150 |         |         |         |
| A 60°C, segundos.....   |           |        | 100-200 | 250-500 |         |
| A 82°C, segundos.....   |           |        |         |         | 125-250 |
| Destilación: Por ciento del total destilado a -- 360°C.                                 |           |        |         |         |         |
| Hasta 190°C, mínimo   | 15        | 10     |         |         |         |
| Hasta 225°C, mínimo   | 55        | 50     | 40      | 25      | 8       |
| Hasta 260°C, mínimo   | 75        | 70     | 65      | 55      | 40      |
| Hasta 315°C, mínimo   | 90        | 88     | 87      | 83      | 80      |
| Residuo de la destilación a 360°C. Por ciento del volumen total por diferencia, mínimo. | 50        | 60     | 67      | 73      | 78      |
| Agua por destilación, - por ciento, máximo.   | 0.2       | 0.2    | 0.2     | 0.2     | 0.2     |
| Pruebas al residuo de la destilación.   |           |        |         |         |         |
| Penetración, grados   | 80-120    | 80-120 | 80-120  | 80-120  | 80-120  |
| Ductilidad en centímetros, mínimo   | 100       | 100    | 100     | 100     | 100     |
| Solubilidad en tetracloruro de carbono, por ciento, mínimo.                             | 99.5      | 99.5   | 99.5    | 99.5    | 99.5    |

b) Asfaltos rebajados de fraguado medio.

| Características   | G R A D O |         |         |         |         |
|---|-----------|---------|---------|---------|---------|
|   | FM-0      | FM-1    | FM-2    | FM-3    | FM-4    |
| <u>Pruebas al material asfáltico</u>  |           |         |         |         |         |
| Punto de inflamación (copa abierta de Tag) °C mínimo.                                   | 38        | 38      | 66      | 66      | 66      |
| Viscosidad Saybolt-Furol:   |           |         |         |         |         |
| A 25°C, segundos  | 75-150    |         |         |         |         |
| A 50°C, segundos  |           | 75-150  |         |         |         |
| A 60°C, segundos  |           |         | 100-200 | 250-500 |         |
| A 82°C, segundos  |           |         |         |         | 125-250 |
| Destilación: Por ciento a 360°C   |           |         |         |         |         |
| Hasta 225°C, máximo   | 25        | 20      | 10      | 5       | 0       |
| Hasta 260°C, máximo   | 49-70     | 25-65   | 15-55   | 5-40    | 30 Máx. |
| Hasta 315°C, máximo   | 75-93     | 70-90   | 60-87   | 55-85   | 40-80   |
| Residuo de la destilación a 360°C. Por ciento del volumen total por diferencia, mínimo. | 50        | 60      | 67      | 73      | 78      |
| Agua por destilación, por ciento, máximo  | 0.2       | 0.2     | 0.2     | 0.2     | 0.2     |
| <u>Pruebas al residuo de la destilación.</u>  |           |         |         |         |         |
| Penetración, grados   | 120-300   | 120-300 | 120-300 | 120-300 | 120-300 |
| Ductilidad en centímetros mínimo.   | 100       | 100     | 100     | 100     | 100     |
| Solubilidad en tetracloruro de carbono, por ciento, mínimo.                             | 99.5      | 99.5    | 99.5    | 99.5    | 99.5    |

c) Asfaltos rebajados de fraguado lento.

| Características   | G R A D O |        |         |         |         |
|---|-----------|--------|---------|---------|---------|
|   | FL-0      | FL-1   | FL-2    | FL-3    | FL-4    |
| <b>Pruebas al material asfáltico</b>  |           |        |         |         |         |
| Punto de inflamación (copa abierta de Cleveland), °C mínimo.                    | 66        | 66     | 80      | 93      | 107     |
| <b>Viscosidad Saybolt-Furoi:</b>  |           |        |         |         |         |
| A 25°C, segundos  | 75-150    |        |         |         |         |
| A 50°C, segundos  |           | 75-150 |         |         |         |
| A 60°C, segundos  |           |        | 100-200 | 250-500 |         |
| A 82°C, segundos  |           |        |         |         | 125-250 |
| Destilación: Destilado total a 360°C, por ciento - en volumen                   | 15-40     | 10-30  | 5-25    | 2-15    | 10 Máx. |
| Agua por destilación, por ciento, máximo.                                       | 0.5       | 0.5    | 0.5     | 0.5     | 0.5     |
| Residuo asfáltico de 100 grados de penetración, - por ciento, mínimo.           | 40        | 50     | 60      | 70      | 75      |
| <b>Pruebas al residuo de la destilación.</b>                                    |           |        |         |         |         |
| Flotación en el residuo de la destilación, a 25°C, segundos.                    | 15-100    | 20-100 | 25-100  | 50-125  | 60-150  |
| Ductilidad del residuo asfáltico de 100 grados de penetración, 25°C, cm mínimo. | 100       | 100    | 100     | 100     | 100     |
| Solubilidad en tetracloruro de carbono, por ciento, mínimo.                     | 99.5      | 99.5   | 99.5    | 99.5    | 99.5    |

d.1) Emulsiones asfálticas aniónicas.

| Características   | G R A D O          |         |                   |                   |        |
|---|--------------------|---------|-------------------|-------------------|--------|
|   | Rompimiento Rápido |         | Rompimiento medio | Rompimiento lento |        |
|   | RR-1               | RR-2    | RM-2              | RL-1              | RL-2   |
| <u>Pruebas al material asfáltico</u>                        |                    |         |                   |                   |        |
| Viscosidad Saybolt-Furol a 25°C, segundos                   | 20-100             |         | 100 Mfn           | 20-100            | 20-100 |
| Viscosidad Saybolt-Furol a 50°C, segundos                   |                    | 75-400  |                   |                   |        |
| Residuo de la destilación, por ciento, en peso, mfn.        | 57                 | 62      | 62                | 57                | 57     |
| Asentamiento en 5 días, diferencia por ciento máximo.       | 3                  | 3       | 3                 | 3                 | 3      |
| Demulsibilidad:   |                    |         |                   |                   |        |
| 35 ml de 0.02 N CaCl <sub>2</sub> , por ciento, mínimo      | 60                 | 50      |                   |                   |        |
| 50 ml de 0.1 ON CaCl <sub>2</sub> , por ciento, máximo      |                    |         | 30                |                   |        |
| Retenido en la malla No. 20, por ciento máximo              | 0.10               | 0.10    | 0.10              | 0.10              | 0.10   |
| Miscibilidad con cemento Portland, por ciento, máximo.      |                    |         |                   | 2.0               | 2.0    |
| <u>Pruebas al residuo de la destilación.</u>                |                    |         |                   |                   |        |
| Penetración, 25°C, 100 g. 5 segundos, grados                | 100-200            | 100-200 | 100-200           | 100-200           | 40-90  |
| Solubilidad en tetracloruro de carbono, por ciento, mínimo. | 97.5               | 97.5    | 97.5              | 97.5              | 97.5   |
| Ductilidad, 25°C, cm - mínimo.                              | 40                 | 40      | 40                | 40                | 40     |

\*NOTA: La viscosidad de las emulsiones no debe aumentar más de treinta por ciento (30%) al bajar su temperatura de veinte grados centígrados (20°C) a diez grados centígrados (10°C), ni bajar más de treinta por ciento (30%) al subir su temperatura de veinte grados centígrados (20°C) a cuarenta grados centígrados (40°C).

d.2) Emulsiones asfálticas catiónicas.

| Características  | G R A D O          |          |                   |          |                   |        |
|--|--------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|--------|
|  | Rompimiento rápido |          | Rompimiento medio |          | Rompimiento lento |        |
|  | RR-2K              | RR-3K    | RM-2K             | RM-3K    | RL-2K             | RL-3K  |
| <b>Pruebas al material asfáltico</b>   |                    |          |                   |          |                   |        |
| Viscosidad Saybolt-Furo] 25°C, segundos  |                    |          |                   |          | 20-100            | 20-100 |
| Viscosidad Saybolt-Furo] 50°C, segundos  | 20-100             | 100-400  | 50-500            | 50-500   |                   |        |
| Residuo de la destilación, por ciento en peso, mínimo.                               | 60                 | 65       | 60                | 65       | 57                | 57     |
| Asentamiento en 5 días, diferencia en por ciento máximo.                             | 5                  | 5        | 5                 | 5        | 5                 | 5      |
| Retenido en la malla No. 20, por ciento, máximo.                                     | 0.10               | 0.10     | 0.10              | 0.10     | 0.10              | 0.10   |
| Cubrimiento del agregado (en condiciones de trabajo). Prueba de resistencia al agua: |                    |          |                   |          |                   |        |
| Agregado seco, por ciento de cubrimiento, mínimo.                                    |                    |          |                   | 80       | 80                |        |
| Agregado húmedo, por ciento de cubrimiento, mínimo                                   |                    |          |                   | 60       | 60                |        |
| Miscibilidad con cemento Portland, por ciento, máximo.                               |                    |          |                   |          | 2                 | 2      |
| Carga de la partícula  | Positiva           | Positiva | Positiva          | Positiva |                   |        |
| pH, máximo   |                    |          |                   |          | 6.7               | 6.7    |
| Disolvente en volumen, por ciento máximo.  | 3                  | 3        | 20                | 12       |                   |        |
| <b>Pruebas al residuo de la destilación</b>  |                    |          |                   |          |                   |        |
| Penetración, 25°C, 100 g, 5 segundos, grados.  | 100-250            | 100-250  | 100-250           | 100-250  | 100-200           | 40-90  |
| Solubilidad en tetracloruro de carbono, por ciento, mínimo                           | 97                 | 97       | 97                | 97       | 97                | 97     |
| Ductilidad, 25°C, cm mínimo.   | 40                 | 40       | 40                | 40       | 40                | 40     |

NOTA: La viscosidad de las emulsiones no debe aumentar más de treinta por ciento (30%) al bajar su temperatura de veinte grados centígrados (20°C) a diez grados centígrados (10°C), ni bajar más de treinta por ciento (30%) al subir su temperatura de veinte grados centígrados (20°C) a cuarenta grados centígrados (40°C).

Por otra parte, los materiales asfálticos deberán almacenarse en depósitos que reúnan los requisitos necesarios para evitar contaminaciónes y estarán protegidos contra incendios, fugas y pérdidas excesivas de disolventes.

Cuando se usen asfaltos rebajados se contará con un calentador y una bomba para poder hacer la carga a la petrolizadora.

Las temperaturas de los materiales asfálticos en el momento de ser empleo serán las siguientes:

a) Asfaltos rebajados de fraguado lento:

- FL-0 de 20°C a 30°C
- FL-1 de 30°C a 45°C
- FL-2 de 75°C a 85°C
- FL-3 de 85°C a 95°C
- FL-4 de 95°C a 100°C

b) Asfaltos rebajados de fraguado medio:

- FM-0 de 20°C a 40°C
- FM-1 de 30°C a 60°C
- FM-2 de 70°C a 85°C
- FM-3 de 80°C a 95°C
- FM-4 de 90°C a 100°C

c) Asfaltos rebajados de fraguado rápido:

- FR-0 de 20°C a 40°C
- FR-1 de 30°C a 50°C
- FR-2 de 40°C a 60°C
- FR-3 de 60°C a 80°C
- FR-4 de 80°C a 100°C

d) Emulsiones asfálticas:

Por lo general no requieren calentamiento de 5°C a 40°C.

No deberán aplicarse riegos de materiales asfálticos cuando la temperatura sea menor de 5°C, cuando haya amenaza de lluvia o cuando la velocidad del viento impida que la aplicación sea uniforme.

2.- CARPETAS ASFÁLTICAS DE RIEGOS.

Estas carpetas se usan para tránsitos ligeros (menores de 250 vehículos por día) y se pueden definir como lo hace la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas:

Las que se construyen mediante uno (1), dos (2), o tres (3) riegos de materiales asfálticos, cubiertos sucesivamente con capas de materiales pétreos de diferentes tamaños, triturados y/o cribados.

CARPETAS DE 1 RIEGO:- Después que la imprimación haya curado durante 24 horas por lo menos, se aplica el material asfáltico (según la dosificación prescrita) directamente sobre la capa de base que ha recibido la imprimación.

El traslape de las aplicaciones de material asfáltico en la unión de dos aplicaciones produce un exceso de asfalto que fluye a la superficie y origina una situación de inestabilidad y un aspecto desagradable del riego terminado. Las lagunas o aplicaciones escasas en las uniones dan lugar a la retención de poca o ninguna gravilla, y el retoque es necesario inmediatamente.

Para eliminar estos defectos al final de una aplicación y comienzo de otra, las aplicaciones de material asfáltico deben empezar y terminar todas sobre una o más tiras de papel de construcción o de envolver, colocadas a través del camino antes de iniciar el trabajo. El borde anterior del papel se coloca de tal forma que coincida exactamente con el borde del material asfáltico aplicado en último lugar, para mantener este en su sitio se coloca sobre él una pequeña cantidad de áridos. A continuación, la petrolizadora inicia su movimiento hacia adelante, a suficiente distancia detrás del borde anterior de las tiras de papel, para alcanzar la velocidad predeterminada en el momento en que la barra regadora alcanza el papel, de manera que el paso de material asfáltico a través de la barra distribuidora se abre cuando ésta pasa sobre el papel, y el primer material se riega sobre este antes de alcanzar su borde anterior. Después se retira el papel y se destruye. Así se obtiene un borde bien definido de la capa de ligante asfáltico aplicado a la base sobre la imprimación.

Como las aplicaciones de material asfáltico se terminan sobre una o más tiras de papel, situadas a través del camino o de la zona en la que se está

aplicando el material, es necesario que el papel se coloque antes del comienzo de la operación. La posición de este para terminar una aplicación se determina calculando la distancia que debería cubrirse por la capa de material asfáltico que lleva la petrolizadora y situando el papel a suficiente distancia por delante de este punto teórico para que al alcanzarlo queden en el tanque de 200 a 300 litros de material. El paso del asfalto se corta cuando la barra llega al papel, al mismo tiempo que se detiene el avance del camión, de forma que todo el material que gotee de la barra caiga sobre aquel. Después de quitar el papel queda otro borde bien definido de material asfáltico, que permite obtener un buen enlace con la aplicación siguiente. No debe intentarse aplicar toda la carga del distribuidor, porque cuando el material baja demasiado en el tanque, la bomba empieza a aspirar material mezclado con aire y el caudal deja de ser uniforme.

Para asegurar una alineación adecuada de la aplicación del material asfáltico se atiranta una cuerda a lo largo del paseo o cerca del borde de la aplicación, de modo que sirva de guía al conductor de la petrolizadora.

Inmediatamente después de la aplicación del material asfáltico se extienden los materiales pétreos por medio de un esparcidor mecánico, con el fin de aprovechar la fluidez del asfalto y obtener la adherencia de la máxima cantidad de pétreos. En determinadas condiciones puede ser necesario reducir la longitud de la aplicación del asfalto para que pueda ser cubierto con los áridos en un tiempo máximo especificado.

Tan pronto como se han extendido los áridos sobre el material asfáltico recién aplicado, debe apisonarse toda la superficie con una sola pasada de un rodillo de llanta metálica; seguidamente puede barrerse la superficie con una barredora arrastrada o pasar una hoja ligera para obtener una distribución más uniforme de los áridos. A continuación debe procederse al apisonado con rodillo de llanta rígida o de neumáticos, o con una combinación de ambos tipos, hasta conseguir una perfecta adherencia de los materiales pétreos con el material asfáltico.

Transcurrido un tiempo no menor de tres días se recolectará mediante barrido y se removerá el material pétreo excedente que no se adhiera al material asfáltico.

El resultado final se muestra en la siguiente figura:



SUPERFICIE ORIGINAL

Proporción adecuada entre material pétreo y asfalto, con la gravilla hundida en un 60% aproximadamente.

La idea general es que las llantas rueden sobre el material pétreo, ya - que como el asfalto y el agua no son miscibles, si la llanta rueda directamente sobre el asfalto con el agua se produce una superficie resbalosa.

#### CARPETAS DE DOS Y TRES RIEGOS.

En estas carpetas las operaciones a ejecutar son las siguientes:

Para la carpeta de 2 riegos:

- A) Se barrerá la base impregnada.
- B) Sobre la base superficialmente seca se dará un riego de material asfáltico, (generalmente FR-3, o emulsiones de rompimiento rápido).
- C) Se cubrirá el riego de material asfáltico con una capa de material pétreo número 2.
- D) Se rastreará y planchará el material pétreo.
- E) Se dará sobre el material pétreo un segundo riego de material asfáltico.
- F) Se cubrirá el segundo riego de material asfáltico con una capa de material pétreo 3-B.
- G) Se rastreará y planchará el material pétreo.
- H) Transcurrido un tiempo no menor de tres días se recolectará y removerá el material pétreo 3-B excedente que no se adhiera al material asfáltico del segundo riego.

Para carpeta de 3 riegos:

- A) Se barrerá la base impregnada.
- B) Sobre la base superficialmente seca se dará un riego de material asfáltico, (generalmente FR-3, o emulsiones de rompimiento rápido).
- C) Se cubrirá el riego de material asfáltico con una capa de material pétreo número 1.
- D) Se rastreará y planchará el material pétreo.
- E) Se dará sobre el material pétreo un segundo riego de material asfáltico.

|   |                                |              |
|---|--------------------------------|--------------|
| K | REMOCION DE MATERIAL EXCEDENTE | -----        |
| J | RASTREO Y PLANCHADO            | -----        |
| I | MATERIAL PETREO 3-8            | oooooooooooo |
| H | RIEGO DE MATERIAL ASFALTICO    | =====        |
| G | RASTREO Y PLANCHADO            | -----        |
| F | MATERIAL PETREO No. 2          | oooooooooooo |
| E | RIEGO DE MATERIAL ASFALTICO    | =====        |
| D | RASTREO Y PLANCHADO            | -----        |
| C | MATERIAL PETREO No. 1          | oooooooooooo |
| B | RIEGO DE MATERIAL ASFALTICO    | =====        |
| A | BARRER LA BASE IMPREGNADA      | -----        |

CARPETA DE TRES RIEGOS

|   |                                |                      |
|---|--------------------------------|----------------------|
| H | REMOCION DE MATERIAL EXCEDENTE | -----                |
| G | RASTREO Y PLANCHADO            | -----                |
| F | MATERIAL PETREO 3-B.           | oooooooooooooooooooo |
| E | RIEGO DE MATERIAL ASFALTICO    | =====                |
| D | RASTREO Y PLANCHADO            | -----                |
| C | MATERIAL PETREO No. 2          | oooooooooooooooooooo |
| B | RIEGO DE MATERIAL ASFALTICO    | =====                |
| A | BARRER LA BASE IMPREGNADA      | -----                |

CARPETA DE DOS RIEGOS

- F) Se cubrirá el segundo riego de material asfáltico con una capa de material pétreo número 2.
- G) Se rastreará y planchará el material pétreo.
- H) Se dará sobre el material pétreo un tercer riego de material asfáltico.
- I) Se cubrirá el tercer riego de material asfáltico con una capa de material pétreo 3-8.
- J) Se rastreará y planchará el material pétreo.
- K) Transcurrido un tiempo no menor de tres (3) días se recolectará y removerá el material pétreo excedente que no se adhiere al material asfáltico del tercer riego.

En el proceso de trabajo las carpetas por el sistema de riegos, la aplicación del material pétreo deberá hacerse inmediatamente después de aplicado el material asfáltico. Entre la terminación de la capa correspondiente al material pétreo y el siguiente riego de material asfáltico deberá transcurrir un lapso que, en general, no será menor de cuatro días.

Inmediatamente después de tendido el material pétreo, para tener una mejor distribución del mismo, se le pasará una rastra ligera con cepillos de fibra o de raíz, dejando así la superficie exenta de ondulaciones, bordos y depresiones.

Los material pétreos, tendidos y rastreados se plancharán inmediatamente con rodillo liso ligero, únicamente para acomodar las partículas del material, teniendo especial cuidado en el planchado de los materiales pétreos 3, para no fracturar las partículas del material pétreo por exceso de planchado.

Los materiales pétreos 3, acomodados con rodillo liso, se plancharán inmediatamente con compactador de llantas neumáticas, pasando una rastra con cepillos de fibra o de raíz las veces que se considere necesario, para mantener uniformemente distribuido el material y evitar que se formen bordos y ondulaciones. Los compactadores de llantas neumáticas deberán tener un peso máximo de cuatro mil quinientos (4,500) kilogramos y se pasarán alternativamente con la rastra el número de veces que sea necesario para asegurar que el máximo del material pétreo se ha adherido al material asfáltico; cuando se abra al tránsito el tramo, se continuará rastreando para evitar que se formen ondulaciones con el material pétreo excedente. Cuando se observe que ya no se adhiere más material pétreo y no antes de tres días, se recolectará todo el sobrante con cepillos de fibra o raíz.

Todos los planchados, cualquiera que sea el tipo de rodillo o compactador usado, se harán: en las tangentes, de las orillas de la carpeta hacia el

centro; y en las curvas, del lado interior hacia el lado exterior.

Durante la construcción de estas carpetas no deberá permitirse el tránsito de vehículos sobre ellas. Asimismo, esta suspensión deberá continuar por un período no menor de veinticuatro horas, después del tendido y planchado del material 3.

Las cantidades de cemento asfáltico y materiales pétreos en lts/m<sup>2</sup>, para estas carpetas se ven en la siguiente tabla:

| Materiales                                  | Tipo de Carpeta      |                     |                     |
|---|----------------------|---------------------|---------------------|
|   | Tres riegos          | Dos riegos          | Un riego            |
| Cemento asfáltico<br>Material pétreo<br>1   | 0.6 - 1.1<br>20 - 25 |                     |                     |
| Cemento asfáltico<br>Material pétreo<br>2   | 1.0 - 1.4<br>8 - 12  | 0.6 - 1.1<br>8 - 12 |                     |
| Cemento asfáltico<br>Material pétreo<br>3-A |                      |                     | 0.7 - 1.0<br>8 - 10 |
| Cemento asfáltico<br>Material pétreo<br>3-B | 0.7 - 1.0<br>6 - 8   | 0.8 - 1.1<br>6 - 8  |                     |
| Cemento asfáltico<br>Material pétreo<br>3-E |                      |                     | 0.8 - 1.0<br>9 - 11 |

1) El cemento asfáltico considerado en esta tabla se refiere al que existe en los material asfálticos que se empleen.

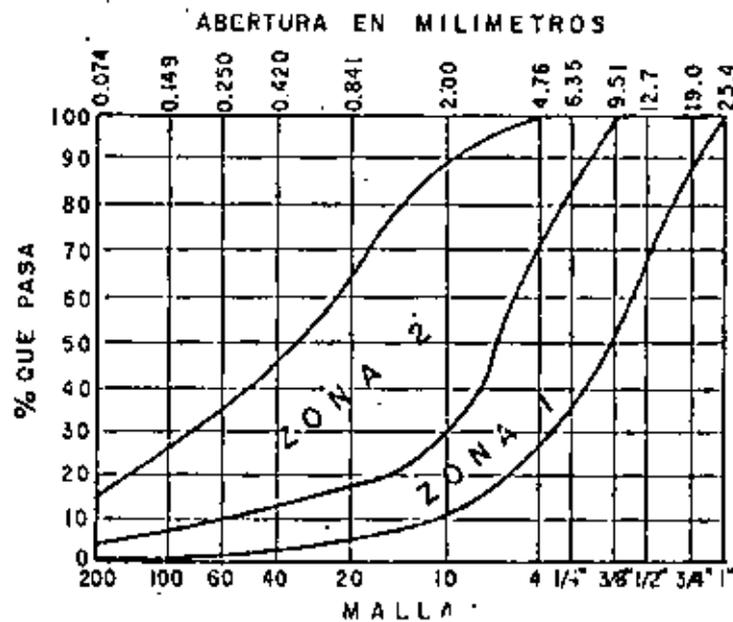
3.- CARPETAS DE MEZCLA EN FRIO CON PLANTA ESTACIONARIA Y CARPETAS DE MEZCLA EN EL LUGAR.

3.1) MATERIALES PETREOS. (se han tomado especificaciones S.A.H.O.P.).

La curva granulométrica del material pétreo para mezclas en el lugar, deberá quedar comprendida entre el límite inferior de la zona 1 y el límite superior de la zona 2, de la figura. La zona 1, co-

responde a materiales pétreos de granulometría gruesa y la zona 2, a los materiales pétreos de granulometría fina. La curva granulométrica del material pétreo deberá afectar una forma semejante a la de las curvas que limitan las zonas, por lo menos en las dos terceras (2/3) partes de su longitud, sin presentar cambios bruscos de pendiente.

MATERIALES PÉTREOS QUE SE EMPLEEN EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN EL LUGAR.



y además deberán cumplir los siguientes requisitos:

- a) De contracción lineal.
  - a.1) Cuando la curva granulométrica del material pétreo quede ubicada en la zona 1, de la Figura No. 3% máximo.
  - a.2) Cuando la curva granulométrica del material pétreo quede ubicada en la zona 2, de la Figura No. 2% máximo.
- b) De desgaste Los Angeles, para cualquier tipo de material pétreo ...40% máximo.
- c) De forma de las partículas. Partículas alargadas y/o en forma de laja... 35% máximo.

d) De afinidad con los asfaltos:

Debe cumplir cuando menos con dos de las siguientes pruebas:

d.1) Desprendimiento por fricción:.....25% máximo.

d.2) Cubrimiento con asfalto:.....90% mínimo.

d.3) Pérdida de estabilidad por inmersión  
en agua:.....25% máximo.

e) Equivalente de arena.....55% mínimo.

3.2) CONSTRUCCION.- Las mezclas en planta en frío se asemejan en muchos aspectos a las mezclas en planta en caliente, salvo en el empleo de asfaltos rebajados o de emulsiones asfálticas, y de su mezcla a la temperatura ambiente. Las mezclas de este tipo pueden emplearse inmediatamente o transportarse y almacenarse para uso futuro. El tipo y grado de material asfáltico más adecuado viene determinado por la granulometría de los áridos y el uso al que se destina la mezcla.

Las mezclas para capas de superficie densas que contienen del 35% al 45% de áridos que pasan por el tamiz No. 10, obtenidas para su utilización inmediata, pueden fabricarse empleando asfaltos de tipo FR1, FR2 ó FR3, o emulsiones asfálticas de rompimiento medio RM-2 solo es necesario el secado de los áridos para mezclas con asfaltos cuando los materiales pétreos están saturados o tienen alguna humedad superficial. Las mezclas con emulsión asfáltica pueden fabricarse con materiales pétreos húmedos; de hecho, es necesario incluso añadir agua, especialmente cuando el material pétreo contiene alta proporción de material que pasa por la malla No. 10.

Las mezclas fabricadas con asfaltos rebajados deben ventilarse perfectamente antes de la compactación, debido al contenido de productos volátiles. La ventilación de la mezcla se suele realizar removiéndola con motoniveladoras sobre el camino hasta que se ha evaporado una gran proporción de los disolventes. La evaporación de los disolventes se observa por la disminución de la docilidad de la mezcla durante su manipulación. Cuando se han ventilado suficientemente, estas mezclas parecen ser muy difíciles de manejar, pero aún conservan la necesaria docilidad para ser extendidas fácilmente con motoniveladora.

Las mezclas en planta en frío fabricadas con emulsión asfáltica de rotura media (RM-2) se ponen en obra y se compactan sin necesidad de ventilación. Las temperaturas atmosféricas elevadas y el ambiente seco hacen que las mezclas en frío con emulsión asfáltica curen rápidamente; las --

condiciones atmosféricas opuestas retardan el tiempo de curado.

La cantidad de material que pasa por el tamiz No. 10 en un material de pavimentación mezclado en frío, tiene considerable influencia sobre la densidad de la mezcla.

El concreto asfáltico mezclado en caliente y colocado en frío es un tipo intermedio del concreto asfáltico mezclado y colocado en caliente y los que acabamos de describir.

Las mezclas de este tipo pueden ser transportadas y colocadas inmediatamente después del mezclado o bien almacenarse para uso futuro durante un período de seis a ocho meses. Resultan muy adecuadas para obras de pequeño volumen, cuando no es posible instalar una planta de mezcla en caliente o donde no está justificado económicamente el transporte de esta instalación. Además, las mezclas en caliente colocadas en frío proporcionan un tipo excelente de material para bacheos.

La granulometría de los áridos y el proyecto de la mezcla son esencialmente los mismos que para las mezclas fabricadas y tendidos en caliente.

Las capas superficiales de asfalto y áridos mezcladas sobre el camino se construyen haciendo pasar los materiales por una planta mezcladora móvil o empleando motoconformadoras. Las mezclas para capas de superficie fabricadas de este modo resultan más económicas y de peor calidad que las obtenidas en planta, porque no hay un control seguro de la granulometría.

Para mezclar los materiales pétreos y el material asfáltico se suelen emplear plantas móviles de diversos tipos. El más común es la mezcladora mecánica, que recoge los áridos de un camellón y los hace pasar a través de un mezclador de tipo continuo. El material asfáltico se pulveriza sobre los áridos en proporciones determinadas cuando estos entran en la cámara de mezcla.

Para obtener un control adecuado de la cantidad necesaria de material asfáltico es necesario que los áridos estén tendidos en un camellón de tamaño uniforme, de forma que pueda relacionarse la velocidad de la bomba de asfalto con la velocidad de la planta y el tamaño del camellón.

El mezclado con motoconformadoras constituye uno de los métodos más antiguos de construcción de capas asfálticas superficiales. Las técnicas constructivas son muy sencillas y solo emplean los elementos más comunes de maquinaria de construcción de carreteras y alguna maquinaria agrícola.

Los áridos se colocan sobre el camino en un camellón aplanado, de espesor y anchura uniformes, y se riegan abundantemente con material asfáltico. Para la aplicación de asfalto se emplean petrolozadoras. La cantidad necesaria de asfalto se reparte en varias aplicaciones iguales; des-

pués de cada aplicación de asfalto, los materiales pétreos y este se mezclan, removiendo los materiales con la motoconformadora sobre el camino o sobre la zona de mezclado, hasta que el asfalto se ha dispersado uniformemente. Se continúa aplicando asfalto y removiendo la mezcla hasta conseguir el contenido total de asfalto necesario en un estado de dispersión.

El mezclado con motoniveladora y rastras de discos no produce la misma acción de masado que los mezcladores de paletas, por lo que se precisa un período de tiempo más largo para obtener una mezcla equivalente.

Los materiales asfálticos más adecuados para el mezclado con motoconformadora son los de los tipos FR-2 y FR-3, y la emulsión asfáltica de tipo RM-2. Cuando se emplea emulsión asfáltica suele ser necesario añadir agua a la mezcla para obtener la dispersión y envoltura adecuadas.

Es esencial la ventilación apropiada antes de la compactación de las mezclas en planta móvil y con motoconformadora. Un contenido insignificante de humedad de la mayor parte de los áridos constituye una ayuda para la mezcla, aunque a veces resulta perjudicial si esta se compacta con más del 2% de humedad. Por ello es necesario que se remuevan lo suficiente estas mezclas después de efectuadas, con el fin de eliminar por evaporación la mayor parte del contenido de disolvente y de humedad. La extensión y compactación de la mezcla no debe realizarse hasta que el contenido de volátiles se haya reducido a menos del 25% de la cifra original; el contenido de humedad no debe exceder del 2%.

El tendido de la mezcla en el lugar generalmente se realiza con la misma motoconformadora, como este tendido es muy preciso la máquina debe estar en muy buenas condiciones y el operador debe ser altamente calificado (operador de mezcla negra).

El tendido de las mezclas en planta se realiza generalmente con una extendedora igual a las que tienden la carpeta de mezcla en caliente, y el procedimiento es el mismo.

La compactación de estas mezclas se realiza inmediatamente después del tendido y se pueden usar planchas tandem de 2 ruedas o rodillos vibratorios auto-propulsados vibrando a alta frecuencia y baja amplitud. Posteriormente se dan unas pasadas con rodillo neumático con objeto de "cerrar" la carpeta, es decir: darle una textura fina y disminuir la permeabilidad de la carpeta.



centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



## DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS

CARPETAS DE MEZCLAS

ING. EMILIO GIL VALDIVIA

JULIO, 1979.



TEMARIO.

OBJETIVOS.

INTRODUCCION

PARTE PRIMERA.

PLANTA DE PRODUCCION DISCONTINUA

PARTE SEGUNDA.

PLANTA DE PRODUCCION CONTINUA

PARTE TERCERA.

CONTROL DE CALIDAD

ESPECIFICACIONES

PROBLEMAS

BIBLIOGRAFIA.



**O B J E T I V O S :**

Se pretende que al término de esta plática, el alumno sea capaz de - describir los diferentes tipos de - plantas para elaboración de concreto asfáltico y su funcionamiento.

Con los datos que se le proporcionarán deberán efectuar la calibración teórica de una planta para elaboración de concreto asfáltico. Un buen trabajo será aquél que se apegue al proyecto, cumpla con las tolerancias especificadas y logre la mayor eficiencia de la planta.

## INTRODUCCION.

En la construcción de pavimentos, se puede decir, que la calidad de las diferentes capas que lo forman, es mayor a medida que están más cerca de la rasante. Esto trae como consecuencia que las capas superiores sean construídas con procedimientos tales que garanticen la calidad esperada.

Por lo tanto, la calidad de las mezclas asfálticas, esta en función directa del procedimiento y equipo de elaboración de estas.

Las mezclas asfálticas elaboradas en planta, son de una calidad superior a las construídas por otros procedimientos.

Es por esto que tiene una especial importancia, para el constructor de pavimentos, el conocimiento detallado del funcionamiento de las plantas para elaboración de mezclas asfálticas.

Estas plantas pueden ser, desde simples mezcladoras hasta dosificadoras que son accionadas por una computadora.

Los elementos básicos de una planta para elaboración de mezclas asfálticas son:

- a). - Sistema para alimentación de áridos fríos.
- b). - Sistema de secado y calentamiento de materiales.
- c). - Sistema de dosificación y mezclado.

Existen otros accesorios que no son indispensables para la elaboración de la mezcla, como son:

- a). - Sistemas especiales para colección de polvos,
- b). - Sistemas para almacenamiento de mezclas (Silos)
- c). - Sistemas de control automático de dosificación por medios electrónicos.

Estos accesorios no son indispensables, pero existe una marcada tendencia a su utilización, por las ventajas que presentan, en los países donde se utilizan.

Haciendo una breve descripción de cada una de las secciones de una planta, podemos decir lo siguiente:

#### A. - Sección de dosificación de áridos fríos.

Está formada por varias tolvas (3 ó 4), que en su parte inferior tienen compuertas que sirven para regular el caudal del material contenido en ellas. Tiene además alimentadores de banda o de valvén que sirven para transportar los materiales al elevador de fríos que comúnmente es del tipo de cangilones.

B.- Sección del secador y colector de polvos.

Está formado por un horno rotatorio o secador, cuya función es la de secar el material y calentarlo a una temperatura que facilite el mezclado con el asfalto. Tiene además un ciclón o colector de polvos que como su nombre lo indica, sirve para recoger las partículas finas que por efecto de la combustión y de la corriente de aire, tiende a salirse por el tiro del secador.

C.- Sección de dosificación y mezclado de materiales calientes.

Esta parte está formada por un sistema de cribas vibratorias, cuya función es separar los materiales calientes en los diferentes tamaños que se requieran de acuerdo con el número de tolvas que en esta parte se tienen para almacenamiento de material pétreo. El sistema de básculas (en las plantas de producción discontinua) y las compuertas de las tolvas de material caliente (en las de producción continua), sirven para dosificar adecuadamente los materiales pétreos. El sistema de incorporación de asfalto es la parte de esta sección que regula la cantidad necesaria de asfalto para la mezcla. Por último está el mezclador que como es obvio, efectúa la mezcla de los materiales pétreo-asfalto.

P A R T E   P R I M E R A



### PLANTA DE TIPO DISCONTINUO.

Este tipo de planta es el más común en la actualidad en nuestro país. También se le llama Planta de "Bachas". Puede ser de muy variadas capacidades, pero las más usuales son las de 2,000 y 4,000 lbs. por "bacha".

La planta de tipo discontinuo, está compuesta de varios elementos principales, como se puede ver en el esquema.

El funcionamiento de la planta y sus distintos elementos es el siguiente (numerados conforma el esquema).

El material procedente del almacén se alimenta a la planta por medio de tractor o cargador, depositándose en las tolvas para material frío (1), por lo general son cuatro tolvas, dispuestas para alimentar material pétreo de distintos tamaños. Estas tolvas están equipadas, en su descarga, con compuertas ajustables para regular la caída del material al alimentador de fríos (2) (el cual puede ser de banda o de vaivén), por lo que es posible dosificar el material pétreo frío, para que caiga al depósito (3) con una primera graduación granulométrica. De este depósito es llevado por el elevador de --cangilones (4), hasta la tolva de entrada del secador (5), en esta parte se encuentra una rejilla para impedir la entrada de objetos mayores al tamaño fijado. Al entrar el material al secador (7), el polvo (6), puede ser reincorporado, en caso necesario, en el recipiente (8), en donde se une al material que sale del secador. De allí es llevado por un segundo elevador de

**UNIDAD DE CONTROL Y SA OPERACIONES 10**  
 Se trata de una unidad de control y operaciones que permite el control y la operación de la planta.

**INSTALACION MEZCLADORA DISCONTINUA**

**1 ALMACEN Y ALIMENTACION DE ACIDOS FRIOS**

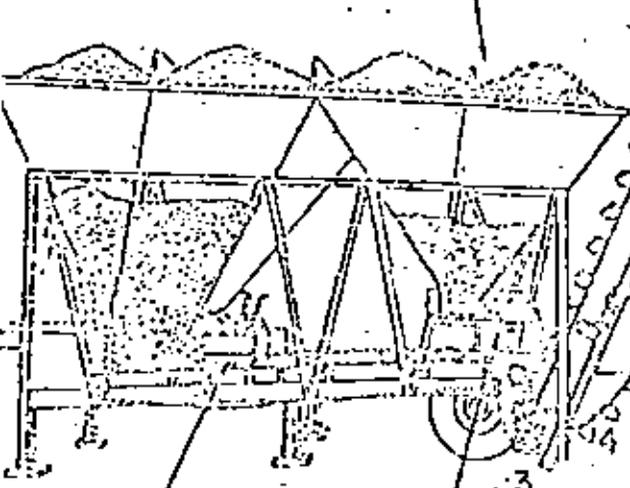
Almacén de los ácidos fríos y su alimentación a la planta de mezcla. Los ácidos fríos se almacenan en los silos 1 y se alimentan a la planta de mezcla.

**7 SECADOR**

Se trata de un secador que permite el secado de los materiales. Los materiales se alimentan al secador 7 y se secan en él.

**8 COLECCION DE POLVO**

Se trata de una unidad de colección de polvo que permite la recolección del polvo que se genera en la planta.



**5** Se trata de una unidad de alimentación que permite la alimentación de los materiales a la planta de mezcla.

Se trata de una unidad de alimentación que permite la alimentación de los materiales a la planta de mezcla.

Se trata de una unidad de alimentación que permite la alimentación de los materiales a la planta de mezcla.

Se trata de una unidad de alimentación que permite la alimentación de los materiales a la planta de mezcla.

Se trata de una unidad de alimentación que permite la alimentación de los materiales a la planta de mezcla.

Se trata de una unidad de alimentación que permite la alimentación de los materiales a la planta de mezcla.

**9**

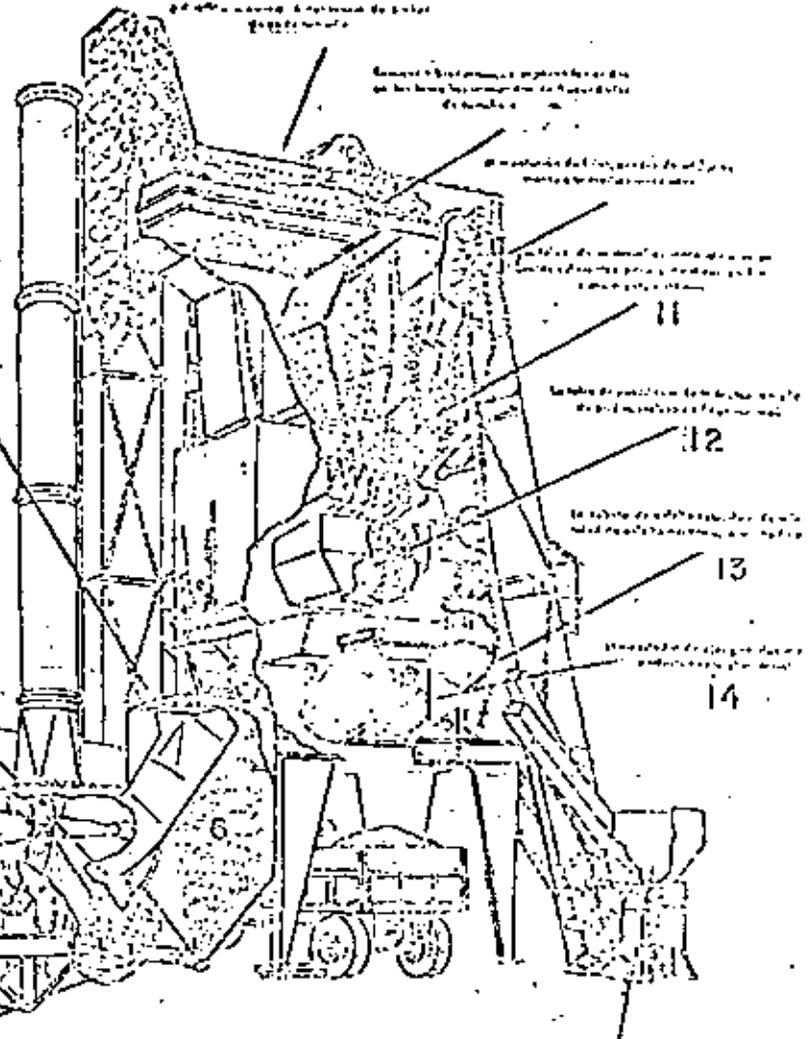


Figura VI-5—Instalación mezcladora discontinua

cangilones (9), hasta las cribas vibratorias (10), para ser separado por tamaños depositándose en las tolvas de material caliente (11), por las compuertas de estas tolvas se extrae de cada una, la cantidad en peso que fija la granulometría de proyecto, valiéndose del recipiente pesador (12), y adicionando por la válvula (13), el cemento asfáltico caliente. Los materiales ya dosificados, así como el cemento asfáltico pasan al mezclador (14), en donde se homogeniza la mezcla y se descarga el camión que la ha de transportar.

Esto es en una muy breve síntesis, el funcionamiento de una planta de tipo discontinuo.

Ahora bien, para lograr que la producción de una planta sea realmente la requerida por el proyecto, es absolutamente necesario que se cumplan los siguientes requisitos:

- a) Que el funcionamiento mecánico de la planta sea correcto.
- b) Que el material pétreo que se alimenta al secador sea uniforme en su granulometría y contenga los tamaños básicos necesarios para formar la curva granulométrica de proyecto.
- c) Conocer y corregir la contaminación en las tolvas de material caliente.

Para que el primero de los requisitos se cumpla, es necesario efectuar primero una revisión general de la instalación haciendo hincapié en todos los elementos de la planta que fácilmente pueden fallar, y hacer fallar la producción, para ella, lo mejor es hacer un recorrido, primero siguiendo todos -

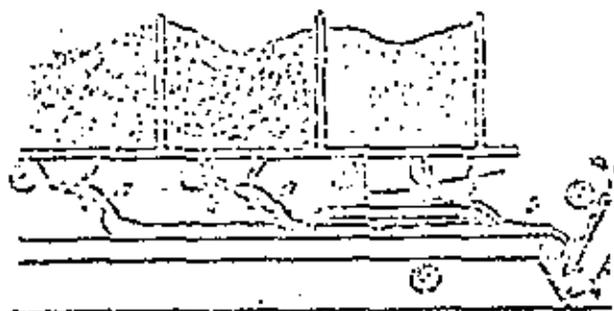


Figura No. 12

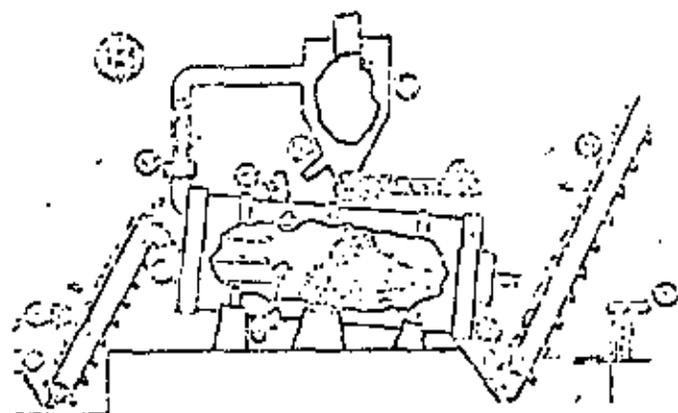


Figura No. 13

- 4.- Almacenamiento de los Agregados y Sección del Alimentador Frío.
- 1.- Almacenamiento de los Agregados en tolvas o depósitos de abastecimiento sobre el túnel.
- 2.- Alimentador de los Agregados Gruesos (tipo de gravedad).
- 3.- Alimentador de los Agregados Medianos (tipo de gravedad).
- 4.- Alimentador de los Agregados Finos (tipo de correa de transmisión).
- 5.- Principal Colector de Agregados (tipo de correa de transmisión).
- 6.- Elevador de Fríos.

- 3.- Sección del Secador y del Colector de Polvo.
- A6.- Elevador de Fríos.
- 1.- Extremo del Cargador del Secador.
- 2.- Secador Rotativo.
- 3.- Abanico que Desarrolla la Succión.
- 4.- Colector de Polvo (ciclón).
- 5.- Compuerta Ajustable del Control del Vertedor de Polvo.
- 6.- Vertedor del Exceso de Polvo.
- 7.- Retorno Uniforme del Polvo al Elevador de Calientes.
- 8.- Quemador y Extremo de Descarga del Secador.
- 9.- Aparato Indicador de Temperaturas.
- 10.- Elevador de Calientes.

los pasos del material pétreo, desde la alimentación de las tolvas de material frío, hasta la descarga final, y enseguida siguiendo todos los pasos del cemento asfáltico, desde su descarga en el almacenamiento de la instalación hasta la descarga final de mezcla.

Los principales puntos de falla probable son los siguientes:

Las compuertas ajustables de las tolvas de materiales fríos.

El alimentador de fríos (de banda o valvén)

El secador (inclinación y carburación adecuadas).

Las cribas vibratorias (comprobar si no hay fugas por rotura, si el vibrador tiene los contrapesos adecuados, si la inclinación es correcta y si son de las dimensiones requeridas).

Compuertas de las tolvas de material caliente- (Deben cerrar perfectamente, sin fugas, sobre todo las de materiales finos).

Básculas (debe comprobarse por medio de pesos conocidos, si las lecturas son correctas).

Depósitos y tuberías de calentamiento de cemento asfáltico (si el calentamiento es por vapor o aceite, no debe haber fugas que contaminen el cemento asfáltico).

Válvula de descarga del cemento asfáltico (debe cerrar perfectamente, sin derrames).

Mezclador (debe cerrar la compuerta sin derramar, y tener las paletas en buen estado).

Los puntos fijados sólo son una guía de lo que debe comprobarse, sin embar

go, puede haber fallas en otras partes como entradas de grasa de lubricación en el mezclador, fallas en los cangilones de los elevadores, fallas en los pirómetros, etc. Por lo tanto, debe hacerse una inspección detallada.

Para que se cumplan los otros dos requisitos, que se refieren al material pétreo, es necesario llevar a cabo la Calibración de la Planta, la cual puede separarse en dos fases:

Calibración primaria o de aproximación.

Ajuste definitivo.

Para que una planta funcione correctamente, debe producir el volumen de mezcla que se le solicite conforme a la capacidad de tendido y acarreo, sin demoras ocasionadas por falta de material en una o varias tolvas de material caliente, y sin desperdicios excesivos por derrames en otras tolvas. Además de los requisitos de eficiencia mencionados, su producción debe ser tal y como fué proyectada en cuanto a granulometría y contenido de cemento asfáltico.

Los dos problemas principales que se presentan para lograr que la planta funcione como se menciona antes son:

1o.- Una alimentación variable en cuanto a granulometría y no controlada en cuanto a cantidad.

2o.- Una contaminación de material en las tolvas de material caliente (Material correspondiente a una tolva, contaminando a otra).

El primero de estos problemas tiene consecuencias en el segundo, ya que aún cuando se logran controlar las contaminaciones entre las tolvas, si la alimentación de la planta es irregular y variable, ésto destruirá todo lo hecho. Por lo tanto, es muy importante que estos problemas se ataquen en el orden señalado, a fin de evitar trabajos inútiles.

La solución del primero de los problemas se logra por medio de la calibración primaria, que consiste en ajustar las compuertas de las tolvas de fríos con objeto de que alimenten un material pétreo dosificado con una granulometría lo más aproximada posible a la de proyecto, y sobre todo una granulometría uniforme. Además de que la alimentación debe ser la adecuada para satisfacer la demanda de producción, en cuanto a volúmen. Para lograr lo anterior, hay que proceder como sigue:

Primero deberá determinarse el volúmen de mezcla que se requiere de la planta, lo cual depende del equipo de tendido y compactación, así como del equipo de acarreo disponible ya que estos factores determinan el volúmen de producción que se requiera de la planta (dado en Kg/mín.) Por lo general, una planta trabajada correctamente, es capaz de elaborar dos batchas por minuto, obteniéndose un mezclado satisfactorio, sin embargo debe comprobarse en cada caso, el tiempo necesario para obtener una batcha bien mezclada, y tomar en cuenta los tiempos necesarios para cargar los camiones.

Una vez conocida la cantidad de mezcla por minuto que se vá a producir, deberá calcularse la cantidad de material pétreo necesario por minuto, Así por ejemplo, si se van a producir 1,800 Kg/min. de mezcla, y el proyecto señaló un 5% de cemento asfáltico, el material pétreo necesario por minuto será:

$$\frac{1,800}{1.05} = 1,715 \text{ Kg/min.}$$

Por lo tanto, la alimentación a la salida de las tolvas de fríos deberá ser de 1,715 Kg/min. a fin de que la planta trabaje eficientemente. Pero hay que tomar en cuenta que además de la cantidad de material pétreo, éste debe alimentarse con una cierta granulometría (la de proyecto) y mantenerse ésta uniforme durante toda la producción, para ello, se separan los materiales de alimentación en distintos tamaños (todas las plantas tienen tres o cuatro tolvas de fríos), debiendo ser en un mínimo de dos, pero debe tenerse en cuenta que mientras mayor sea el número de tamaños en que se haga la separación, mejores resultados se obtendrán. Como se decía antes, el mínimo de tamaños en que se separe el material de alimentación serán dos:

Materia retenido en malla 1/4" y material que pasa malla de 1/4", al separarse los materiales y ser almacenados en tolvas distintas, permiten efectuar la dosificación primaria conforme a la curva de proyecto, regulando la compuerta de cada tolva, de tal modo que alimenten los distintos tamaños en la proporción debida. El ajuste de las aberturas de las compuertas, se lleva a cabo inicialmente en forma teórica, calculándose aritméticamente: pero como para esto es necesario suponer una eficiencia determinada, por

lo general se procede a hacer una corrección a la abertura obtenida por la fórmula, en forma práctica comprobando la granulometría y ajustando hasta obtener lo deseado, ya que el ajuste definitivo se hará posteriormente en las tolvas de material caliente. El cálculo de la abertura de una tolva se efectúa por medio de las fórmulas:

Para alimentador de banda:

$$H = \frac{G}{B \cdot V \cdot P_v \cdot E}$$

Para alimentador tipo válvén o alternativo:

$$H = \frac{G}{B \cdot N \cdot C \cdot P_v \cdot E}$$

en donde:

G = Gasto de la tolva en Kg/min.

B = Ancho de la compuerta en Mts.

H = Altura de la compuerta en Mts.

V = Velocidad de la banda en Mts/min.

Pv = Peso volumétrico del material en Kg/M<sup>3</sup>.

E = Eficiencia

N = Número de carreras por minuto del alimentador.

C = Carrera del alimentador en metros.

El gasto se determina conforme a la curva granulométrica de proyecto y la cantidad de material pétreo por minuto necesario. Por ejemplo, suponiendo que la cantidad necesaria de material pétreo por minuto sea 1715 Kg/min.

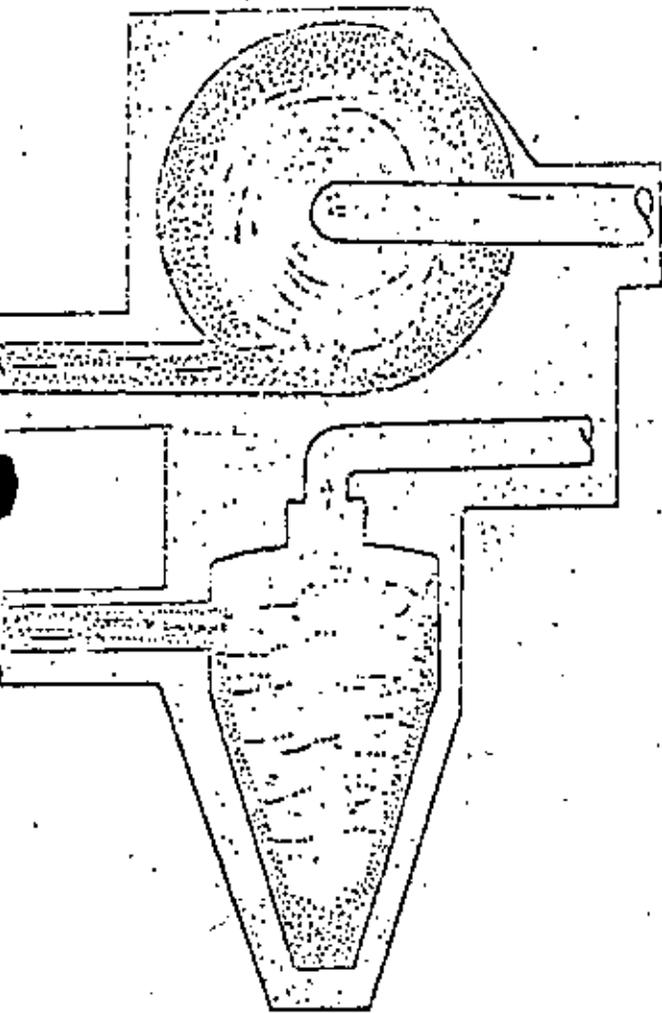
y que la curva granulométrica exige un 45% de material que pasa la malla de 1/4" entonces, para calcular la apertura de la compuerta de la tolva que contiene dicho material, primero se calculará el gasto:

$$G = 1,715 \times 0.45 = 771.75 \text{ Kg/min.}$$

Esto será el Gasto para la tolva que se trata. Los otros datos son medidos directamente en la planta y el Pv se determina con el material usado.

Una vez calculado la apertura para cada tolva, se hace funcionar la máquina y se muestrea la descarga del alimentador de fríos, comprobándose la granulometría, cerrando o abriendo la compuerta según el caso, y repitiendo la operación y muestreo, hasta que se obtenga una curva granulométrica lo más cercana posible a la de proyecto, en lo que se refiere a los porcentajes en los tamaños en que se hizo la separación de material. La operación de muestreo para granulometría, pueda aprovecharse para comprobar el gasto del alimentador de fríos, recogiendo el material descargado en un tiempo medido y calculando la cantidad de material alimentado por minuto.

Con esto queda terminada la calibración primaria, o de aproximación, por lo que el siguiente paso consistirá en efectuar el Ajuste Definitivo, que consiste en lograr que la granulometría de la mezcla producida sea igual a la proyectada para lo cual, es necesario neutralizar el efecto desfavorable ocasionado por la contaminación.



Corriente de aire y polvo a través del colector de polvo. Las partículas gruesas con descargas por el fondo y las finas por la parte superior del colector.

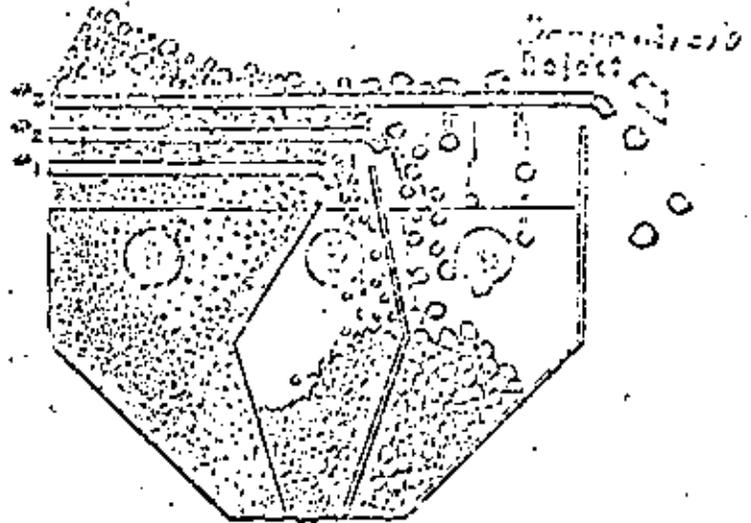


Figura No. 17

Arreglo típico de cribas y tolvas de agregados.

La Tolva No. 1 contiene el material fino, el que está sujeto a considerable segregación a causa de la rapidez de su cribado, mientras que los tamaños grandes recorren la cama de las cribas antes de caer en las tolvas. Por la criba No. 1, se retiene el material de la tolva No. 2 y dicha criba está sujeta a una sobrecarga pudiendo ser este un factor que pueda afectar la producción de la planta; en aquellos casos, en que sea muy pequeña o se obstruya.

La Tolva No. 2 contiene el tamaño siguiente más grande de material que será usado.

La Tolva No. 3 contiene el tamaño más grande de material que va a usarse.

Como es sabido, el sistema vibratorio de cribado en las plantas no tiene un 100% de eficiencia, ocasionándose que en una tolva destinada a almacenar exclusivamente determinados tamaños, se encuentre material correspondiente a las otras. Este, como es natural ocasiona una variación en la curva granulométrica cuando el operador dosifica el material, extrayendo la cantidad que sería necesaria de una determinada tolva, sin tomar en cuenta que de esa cantidad extraída sólo un determinado porcentaje corresponde al tamaño correcto y el resto está formado por tamaños que deberían estar en otras tolvas. Para remediar esto, es necesario conocer qué porcentaje de material de una tolva se encuentra contaminando a las otras, y esto se determina comprobando la granulometría del material que se encuentra en cada una de las tolvas de material caliente.

El muestreo de las tolvas de material caliente, no siempre es sencillo, ya que no todas las plantas tienen fácil acceso a ellas. En algunos casos, es necesario usar un muestreador de tipo especial y en otros introducir un hombre al mezclador para obtener una muestra, debiendo tenerse en cuenta que dentro de una misma tolva el material tiende a clasificarse, separándose los tamaños mayores a un lado de la tolva.

Una vez conocida la granulometría real del material contenido en cada una de las tolvas, se calculan los porcentajes de contaminación. Para mayor claridad sobre como proceder, se verá un ejemplo: Tenemos que la separación por tolvas será como sigue:

| Tolva No. | Material que pasa malla | Material Retenido en malla. |
|-----------|-------------------------|-----------------------------|
| 1         | No. 8                   | - . -                       |
| 2         | 1/4"                    | No. 8                       |
| 3         | 1/2"                    | 1/4"                        |
| 4         | 3/4"                    | 1/2"                        |

Supondremos que la granulometría de proyecto exige los siguientes porcentajes:

| Material | % de Proyecto |             |
|----------|---------------|-------------|
| 1        | 43            | 0 - No. 8   |
| 2        | 22            | No. 8 - 1/4 |
| 3        | 25            | 1/4 - 1/2   |
| 4        | 10            | 1/2 - 3/4   |

Al efectuar la granulometría del material en cada tolva, se obtuvo la siguiente contaminación:

| Material No. | T O L V A S N o. |     |     |     |
|--------------|------------------|-----|-----|-----|
|              | 1                | 2   | 3   | 4   |
| 1            | 100%             | 9%  |     |     |
| 2            |                  | 78% | 24% | 0%  |
| 3            |                  | 13% | 76% | 43% |
| 4            |                  |     |     | 57% |

Es decir, que en tolva No. 2 ( para material de 1/4" a No. 8), se encuentra un 9% de material Número 1 (pasa malla No. 8) y un 13% de material No. 3 (de 1/2" a 1/4", y sólo un 78% del material que contiene es el correspon-

diente a esa tolva (en este ejemplo se supone que la eficiencia del cribado es muy baja, pues las tolvas Nos. 2, 3 y 4 sólo contienen 78%, 76% y 57% del material que les corresponde. Esto es con el fin de hacer más claro el ejemplo, pero lo que se impondría en un caso como ese, sería hacer una revisión del sistema de cribado para mejorar la eficiencia, comprobando por ejemplo, si los contrapesos del sistema de vibración son los adecuados, ya que un vibrado más enérgico obliga a pasar a las partículas incrustadas en las mallas, sobre todo cuando tienen forma de laja, pero también hace al material desplazarse más rápido sobre la criba en el sentido de la inclinación de ésta).

Habrá que modificar los porcentajes de proyecto conforme a la contaminación de tal manera que la suma de todo el material No. 1, por ejemplo, extraído tanto de la tolva 1 como de la tolva 2, nos dé precisamente la cantidad requerida por el proyecto.

El procedimiento de cálculo para corrección de la contaminación, que se expone a continuación, aún cuando no es matemáticamente preciso, el error que se obtiene no afecta grandemente para fines prácticos, y es un método bastante rápido:

| Material<br>No. | T O L V A S No. |    |    |    | Proyecto |    |
|-----------------|-----------------|----|----|----|----------|----|
|                 | 1               | 2  | 3  | 4  |          |    |
| 1               | 100             | 9  |    |    | 109      | 43 |
| 2               |                 | 78 | 24 | 0  | 102      | 22 |
| 3               |                 | 13 | 76 | 43 | 132      | 25 |
| 4               |                 |    |    | 57 | 57       | 10 |

Material No. 1:

$$\frac{100 \times 43}{109} = 39.5$$

$$\frac{9 \times 43}{109} = 3.5$$

Material No. 2:

$$\frac{28 \times 22}{102} = 16.8$$

$$\frac{24 \times 22}{102} = 5.2$$

Material No. 3:

$$\frac{13 \times 25}{132} = 2.5$$

$$\frac{26 \times 25}{132} = 14.4$$

$$\frac{43 \times 25}{132} = 8.1$$

Material No. 4:

$$\frac{57 \times 10}{57} = 10$$

| Material No. | Tolvas No. |      |      |      | Material No. | o/o Corregidos. |
|--------------|------------|------|------|------|--------------|-----------------|
|              | 1          | 2    | 3    | 4    |              |                 |
| 1            | 39.5       | 3.5  |      |      | 1            | 39.5            |
| 2            |            | 16.8 | 5.2  | 0.0  | 2            | 22.8            |
| 3            |            | 2.5  | 14.4 | 8.1  | 3            | 19.6            |
| 4            |            |      |      | 10.0 | 4            | 18.1            |
|              | 39.5       | 22.8 | 19.6 | 18.1 |              | 100.0           |

Los porcentajes así obtenidos serán los que, debido a la contaminación, deberán extraerse de cada tolva para obtener la curva granulométrica de proyecto, pero aún así estos valores deben comprobarse y ajustarse en caso necesario, lo cual ya puede hacerse disminuyendo o aumentando un poco conforme a las granulometrías obtenidas.

Como es lógico suponer si la alimentación de la planta es variable, y en ese caso el cálculo hecho con cierta granulometría, unas horas después

no servirá, por lo que no será posible obtener una granulometría previamente fijada. De lo anterior se desprende la importancia de la calibración -- primaria o de las tolvas de material frío, tratando de reducir las variaciones de alimentación al mínimo.

Hasta aquí ya es posible producir la mezcla de prueba y tener, si no con la seguridad de que se mantenga exactamente dentro de la granulometría de proyecto, si la de que podemos mantenerla dentro de aproximadamente un 1% de variación y con la posibilidad de localizar en caso dado, la causa de anomalía en la producción.

Al iniciarse la producción de la planta, y antes de que sea transportada la mezcla para ser tendida, es conveniente tomar una muestra y someterla a pruebas completas, para determinar si reúne las características de proyecto, y esta comprobación debe comenzar por asegurarse si las temperaturas a que están siendo calentados los materiales pétreos y el cemento asfáltico son adecuados (el cemento asfáltico se calienta del orden de los 130°C y los materiales pétreos aproximadamente a 160°C). así como la temperatura de salida de la mezcla, la cual debe, corresponder al clima del lugar de trabajo y la distancia a que deberá acarreararse debiendo procurarse que su temperatura de tendido sea proxímadamente 120°C y pudiendo tomarse 10°C como un valor medio para la temperatura que se pierde en el acarreo la cual debe ajustarse conforme a lo obtenido en los primeros viajes, para las condiciones particulares de cada obra.

Se decía arriba que debe someterse a todos los ensayos pertinentes la mezcla primeramente elaborada, esto incluye, además de la granulometría y contenido de cemento asfáltico, la prueba Marshall y adherencia, esta última prueba aún en el caso de que haya sido satisfactoria en anteriores ensayos y muy especialmente si el quemador del secador de la planta funciona con un combustible derivado del petróleo, ya que una mala mezcla de aire y combustible puede hacer que se forme una película de carbón, envolviendo el material pétreo, lo cual dificulta la adherencia y disminuye la estabilidad, facilitando la disgregación de la mezcla.

Cuando los materiales pétreos con que está siendo alimentada la planta, contienen humedad, no debe descuidarse la comprobación de la humedad a la salida del secador, para lo cual puede muestrearse deteniendo el funcionamiento de la planta, en la base del elevador de calientes. Esto nos indica la eficiencia del secador.



P A R T E   S E G U N D A .



El tipo de planta llamado de producción continua, es en nuestro país menos empleada que la llamada de producción discontinua (Bachas).

#### DESCRIPCION Y FUNCIONAMIENTO.

La descripción de una planta continua, se puede hacer dividiéndola en tres secciones:

A. - Dosificación de áridos fríos (Fig. 1)

B. - Secador y colector de polvo (Fig. 2)

C. - Dosificación y mezclado de materiales calientes (Fig. 3)

El funcionamiento de una planta de este tipo es el siguiente (Fig. 4)

El material procedente del almacén se alimenta a la planta por medio de tractor o cargador, depositándose en las tolvas para material frío (1), por lo general son cuatro tolvas, dispuestas para alimentar material pétreo de distintos tamaños. Estas tolvas están equipadas, en su descarga, con compuertas ajustables para regular la caída del material al alimentador de fríos (2), (el cual puede ser de banda o de válvón), por lo que es posible dosificar el material pétreo frío, para que caiga al depósito (3) con una primera graduación granulométrica. De este depósito es llevado por el elevador de cangilones (4), hasta la tolva de entrada del secador (5), en esta parte se encuentra una rejilla para impedir la entrada de objetos mayores al tamaño fijado. Al entrar el material al secador (7), el polvo (6), puede ser reincorporado, en caso necesario, en el recipiente (8), en donde se une al material que sale del secador.

De allí es llevado por un segundo elevador de cangilones (9), hasta las cribas vibratorias (10), para ser separado por tamaños depositándose en las tolvas de material caliente (11), por las compuertas (12) de estas tolvas se extrae de cada una, la cantidad que fija la granulometría de proyecto, y adicionando por la válvula (13), el cemento asfáltico caliente. Los materiales ya dosificados, así como el cemento asfáltico pasan al mezclador (14) en donde se homogeniza la mezcla y se descarga el camión que la ha de transportar.

Esto es una muy breve síntesis del funcionamiento de una planta de tipo continuo.

En este tipo de plantas continuas, el material procedente de las tolvas de almacenaje en caliente se dosifica por medio de compuertas regulables que descargan sobre los alimentadores de material caliente. Todos los materiales son transportados al mezclador en forma continua.

El asfalto también afluye en forma continua, y se regula con un sistema de bombeo conectado con el mecanismo de dosificación (Fig. 5), de tal manera que se obtiene una relación constante entre la cantidad total de los agregados pétreos y el producto asfáltico empleado, esto en forma independiente de la velocidad de producción.

#### CALIBRACION DE LA PLANTA.

Los principales pasos para iniciar la producción de mezcla con este equipo son los siguientes:

- 1.- Ajuste de las compuertas de las tolvas de almacenamiento de agregados pétreos fríos, a fin de que estos pasen al secador en las proporcio-

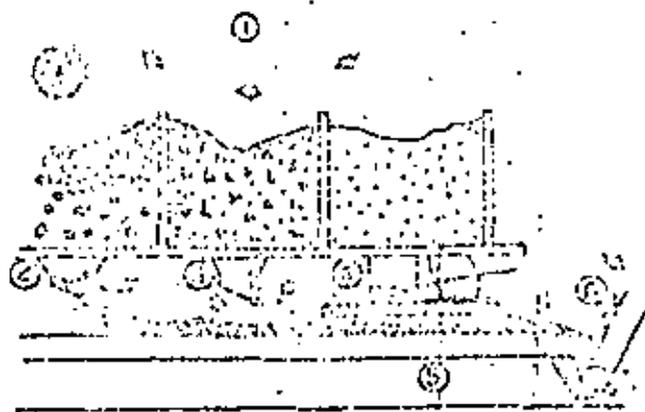


Fig. No. 1

A. - Sección de Dorificación de Fríos

1. - Almacenamiento de los agregados en tolvas o depósitos de abastecimiento sobre el túnel.
2. - Alimentador de los Agregados Gruesos (tipo de gravedad)
3. - Alimentador de los Agregados Medianos (tipo de gravedad)
4. - Alimentador de los agregados finos (tipo de correa de transmisión)
5. - Principal Colector de Agregados (tipo de correa de transmisión).
6. - Elevador de Fríos.

Fig. No. 1

- A. - Sección de dosificación de áridos finos.
  - 1. - Almacenamiento de los agregados en tolvas o depósitos de abastecimiento sobre el túnel.
  - 2. - Alimentador de los agregados gruesos (tipo de gravedad)
  - 3. - Alimentador de los agregados medianos (tipo de gravedad)
  - 4. - Alimentador de los agregados finos (tipo de correa de transmisión)
  - 5. - Principal colector de agregados (tipo de correa de transmisión)
  - 6. - Elevador de finos.

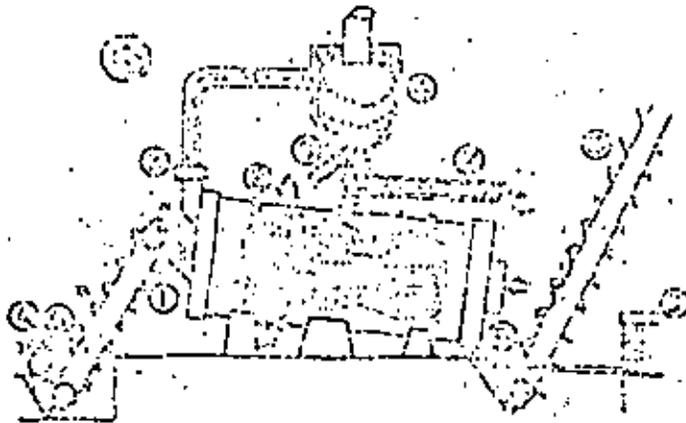


Fig. No. 2

- E. - Sección del Secador y del Colector de Polvo.
- 10. - Elevador de calientes.
- 1. - Extremo del Cargador del Secador.
- 2. - Secador Rotativo
- 3. - Abanico que desarrolla la succión.
- 4. - Colector de Polvo (ciclón)
- 5. - Comparta Ajustable del Control del vertedor de polvo.
- 6. - Vertedor del exceso de polvo.
- 7. - Retorno uniforme del polvo al Elevador de calientes.
- 8. - Quemador y extremo de descarga del Secador.
- 9. - Aparato Indicador de temperaturas.
- 10. - Elevador de calientes.

Fig. No. 2

- B. - Sección del secador y del colector de polvo.
- A6. - Elevador de fríos
- 1. - Extremo del cargador del secador
- 2. - Secador rotativo
- 3. - Abanico que desarrolla la succión
- 4. - Colector de polvo (ciclón)
- 5. - Compuerta ajustable del control del vertedor de polvo
- 6. - Vertedor del exceso de polvo
- 7. - Retorno uniforme del polvo al elevador de calientes.
- 8. - Quemador y extremo de descarga del secador.
- 9. - Aparato indicador de temperaturas
- 10. - Elevador de calientes.

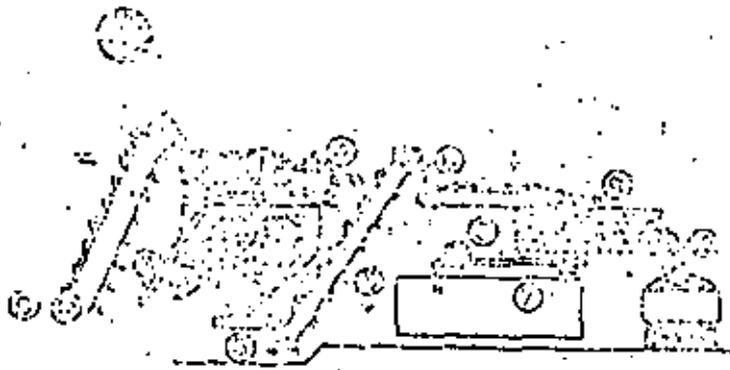


Fig. No. 3

C. - Sección de Dosificación y mezclado de materiales calientes.

B-10. - Continuación del elevador de calientes.

1. - Cama de cribas.

2. - Tolva para los agregados calientes.

3. - Tubos vertedores de sobrenates.

4. - Rechazo de tamaños mayores.

5. - Alimentador de agregados proporcionados (tipo de correa de transmisión)

6. - Colector elevador de agregados al sistema de mezclado.

7. - Tanque de almacenamiento de asfalto.

8. - Bomba para el asfalto, motor y sistema de alimentación.

9. - Mezclador amasador.

10. - Mezcla completa que se descarga en los camiones.

Fig. No. 3

- C. - Sección de dosificación y mezclado de materiales calientes.
- B-10. - Continuación del elevador de calientes.
  - 1. - Cama de cribas.
  - 2. - Tolva para los agregados calientes.
  - 3. - Tubos, vertedores de sobrantes.
  - 4. - Rechazo de tamaños mayores.
  - 5. - Alimentador de agregados proporcionados (tipo de correa de transmisión).
  - 6. - Colector elevador de agregados al sistema de mezclado.
  - 7. - Tanque de almacenamiento de asfalto.
  - 8. - Bomba para el asfalto, motor y sistema de alimentación.
  - 9. - Mezclador amasador.
  - 10. - Mezcla completa que se descarga en los camiones.

# INSTALACION MEZCLADORA CONTINUA

## ALMACENAJE Y ALIMENTACION DE ARIDOS SECOS

El material seco se almacena en grandes silos de almacenamiento y se alimenta al sistema de transporte por medio de una cinta transportadora que conduce al sistema de secado.

## SECADOR

El material seco se somete a un proceso de secado por rotación. Durante este proceso se genera una gran cantidad de polvo que es recogido por un sistema de recolección de polvo.

## COLECCION DE POLVO

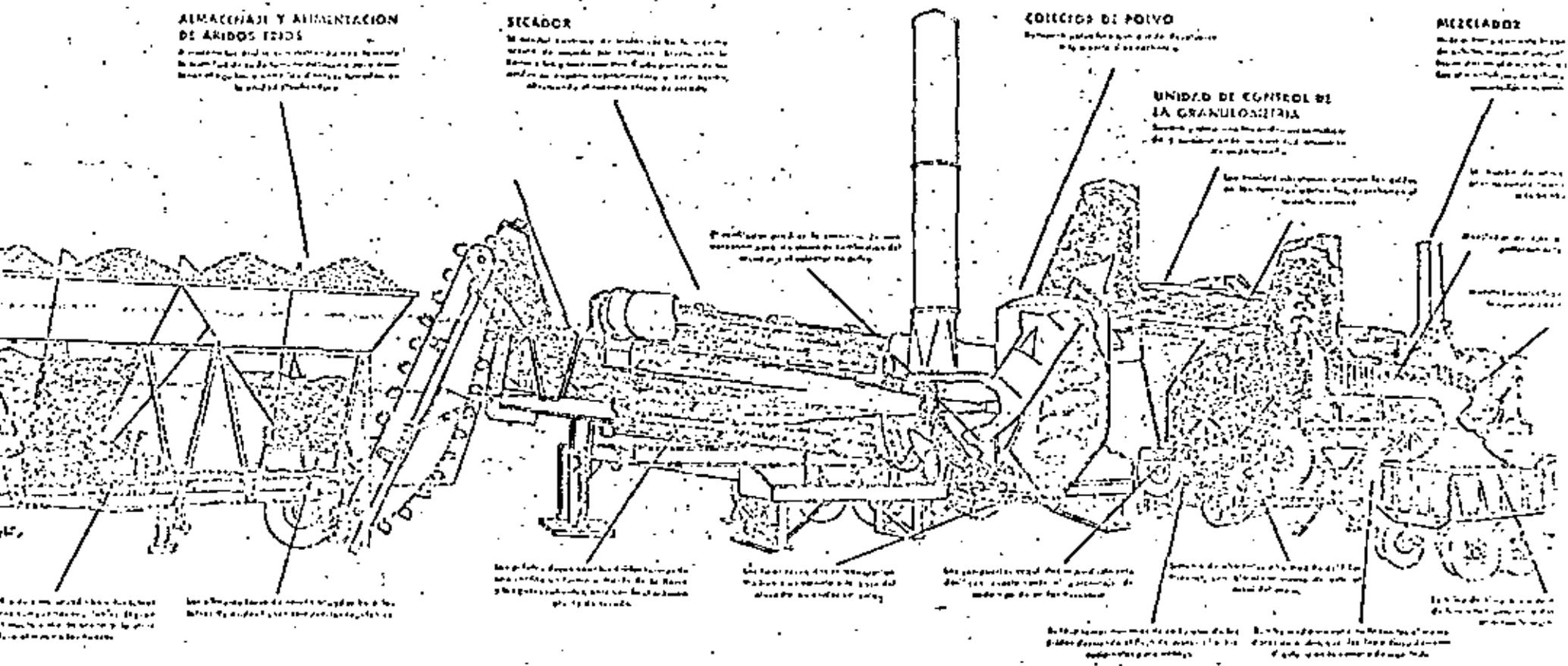
El polvo que se genera durante el proceso de secado es recogido por un sistema de recolección de polvo.

## UNIDAD DE CONTROL DE LA GRANULOMETRIA

Esta unidad controla el tamaño de las partículas de polvo que se generan durante el proceso de secado.

## MEZCLADOR

El material seco y el polvo recogido se mezclan en un mezclador para obtener un producto final de alta calidad.



nes requeridas.

2.- Determinación de la cantidad de material que debe pasar al mezclador desde cada una de las tolvas de agregados calientes, y de la cantidad de producto asfáltico.

Ajuste de las compuertas de agregados en frío.

Generalmente hay dos tipos de alimentadores para agregados en frío:

1).- Alimentadores Alternativos (Cangilones) y

2).- Alimentadores de Correa (Bandas transportadoras)

La cantidad que suministra un alimentador alternativo, en kilogramos por minuto, puede calcularse por la ecuación.

$$C_t = WHRLUE$$

En donde:

W = Anchura de la compuerta, en metros

H = Altura de la compuerta, en metros

L = Carrera de alimentador, en metros

R = Carreras por minuto

C<sub>t</sub> = Capacidad teórica, en kilogramos por minuto

U = Peso de los agregados, en kilogramos por M<sup>3</sup>.

E = Rendimiento

Los kilogramos por minuto que se suministran por un alimentador de correa se determinan por la siguiente ecuación:

$$C_t = WHSUE$$

En donde:

S = Velocidad de la correa, en metros por minuto

En la práctica es factible determinar la abertura de las compuertas de las tolvas por tanteos, no siendo indispensable las ecuaciones citadas; de tal manera que las áreas correspondientes a los distintos agregados sean proporcionables a los porcentajes requeridos.

Es muy importante la calibración de los alimentadores en frío, y es una maniobra fácil de realizar. Cuando el material se lleva al secador por medio de transportadores de banda, sólo es necesario ajustar la compuerta de una tolva en la posición en que se espera suministre la cantidad correcta de material, se cierran las otras tolvas y se pone en marcha la planta. Cuando ha funcionado durante un minuto, aproximadamente, se separa y pasa el material contenido en el transportador de banda en una distancia media por ejemplo 3 m., y se convierte la cifra a Kg/m. Esta, multiplicada por la velocidad de la cinta en M. por minuto, da Kg. por minuto entregados por la tolva con esa abertura particular de la compuerta. Se convierte a Tons. p/h y por centímetro de abertura de compuerta y se calcula la proporción a número exacto de centímetros a que debe abrirse la compuerta para suministrar la cantidad deseada de tons./h.

Ya efectuado lo anterior, se pone nuevamente la planta en marcha durante un minuto aproximado, después que los agregados han empezado a caer en las tolvas de materiales calientes, se vacían las tolvas y se continúa con la planta en marcha unos minutos más para volverlos a llenar hasta la mitad cuando menos, procediéndose al muestreo de los distintos agregados en caliente para el análisis granulométrico.

## M U E S T R E O .

Previo al muestreo de las tolvas deben de verterse aproximadamente 500 Kgs. de cada una de ellas, ello con el fin de establecer un flujo de pétreos regulado, una vez efectuado lo anterior, se suelta la palanca de una de las tolvas y se toma una muestra de 20 Kg., por lo menos del material que cae. Se repite esta operación con las otras tolvas, este tipo de plantas tienen - por lo general dispositivo bastante accesible para efectuar los muestreos, es muy conveniente dejar siempre la planta en funcionamiento durante algunos minutos antes de llevar a cabo el muestreo.

## ANALISIS DE LAS MUESTRAS.

Cada una de las muestras debe de cuartearse cuidadosamente hasta obtener las cantidades mínimas de material adecuadas para los estudios de laboratorio.

Como regla general, la muestra procedente de la tolva de finos, después - del cuateo debe ser de 500 gr., las muestras de tolvas de un tamaño aproximado de 1/4" de 1,000 gr., y las muestras de las tolvas conteniendo agregados mayores, de 2,000 gr. Una vez hecho lo anterior, se procede al análisis granulométrico de cada una de estas, se anotan los resultados y con estos se calcula la granulometría combinada, la que una vez determinada se presenta gráficamente.

En cada tolva existe siempre algún material menor que el tamiz de menor -- abertura representado por ella, esto se debe a que cierta cantidad de los -- materiales más finos es siempre arrastrada a la tolva siguiente por los agre

## PRIMER AJUSTE

| Malla No.                         | PORCENTAJE QUE PASA.       |      |                              |      |                             |      | Granulo-<br>metría<br>Combinada | Granulo-<br>metría<br>de Tra-<br>bajo. | Pro-<br>yec-<br>to | Toleran-<br>cias.<br>Especifi-<br>cadas. |
|-----------------------------------|----------------------------|------|------------------------------|------|-----------------------------|------|---------------------------------|--|--------------------|--|
|                                   | Tolva No. 3<br>3/4" a 3/8" |      | Tolva No. 2<br>3/8" a No. 10 |      | Tolva No. 1<br>Menor No. 10 |      |                                 |  |                    |  |
|                                   | Total                      | 30%  | Total                        | 40%  | Total                       | 30%  |                                 |  |                    |  |
| 3/4"                              | 100.0                      | 30.0 | 100.0                        | 40.0 | 100.0                       | 30.0 | 100.0                           | 100                                    | 100                | ± 5                                      |
| 1/2"                              | 58.2                       | 17.5 | 100.0                        | 40.0 | 100.0                       | 30.0 | 87.5                            | 88                                     | 94                 | ± 5                                      |
| 3/8"                              | 10.1                       | 3.0  | 100.0                        | 40.0 | 100.0                       | 30.0 | 73.0                            | 73                                     | 85                 | ± 5                                      |
| 1/4"                              | 0.1                        | 1.8  | 84.2                         | 33.7 | 100.0                       | 30.0 | 65.5                            | 65                                     | 76                 | ± 5                                      |
| No. 4                             | 2.0                        | 0.6  | 68.5                         | 27.4 | 100.0                       | 30.0 | 58.0                            | 58                                     | 68                 | ± 4                                      |
| No. 10                            | 0.5                        | 0.2  | 21.0                         | 8.4  | 100.0                       | 30.0 | 38.5                            | 39                                     | 44                 | ± 3                                      |
| No. 20                            | 0.4                        | 0.1  | 16.0                         | 6.4  | 77.5                        | 23.2 | 29.7                            | 30                                     | 35                 | ± 3                                      |
| No. 40                            | 0.3                        | 0.1  | 11.0                         | 4.4  | 55.1                        | 16.5 | 21.0                            | 21                                     | 24                 | ± 1                                      |
| No. 60                            | 0.2                        | 0.1  | 8.6                          | 3.4  | 42.9                        | 12.9 | 16.4                            | 16                                     | 19                 | ± 1                                      |
| No. 100                           | 0.1                        | -    | 4.8                          | 1.9  | 19.8                        | 5.9  | 7.8                             | 8                                      | 10                 | ± 1                                      |
| No. 200                           | 0.0                        | -    | 3.2                          | 1.3  | 9.1                         | 2.7  | 4.0                             | 4                                      | 6                  | ± 1                                      |
| Contenido<br>de Cemento asfáltico |                            |      |                              |      |                             |      |                                 |  | 5.2                | ± 0.26<br>(0.06CA)                       |

SECRETARIA DE OBRAS PUBLICAS  
DIRECCION GENERAL DE SERVICIOS TECNICOS  
DEPARTAMENTO DE LABORATORIOS

REPORTE DE CONCRETO ASFALTICO

MATERIAL Grav. 20% - 40% - 30% EXPEDIENTE 2-13  
 ENSAYE INV. 1-7-37 MUESTRA INV. 1-7-37 FECHA RECIBO 2-1-37  
 ENTREGADA POR ... FECHA PROMESA 2-1-37  
 PROCEDENCIA ...

PRUEBAS SOBRE MATERIAL PETREO

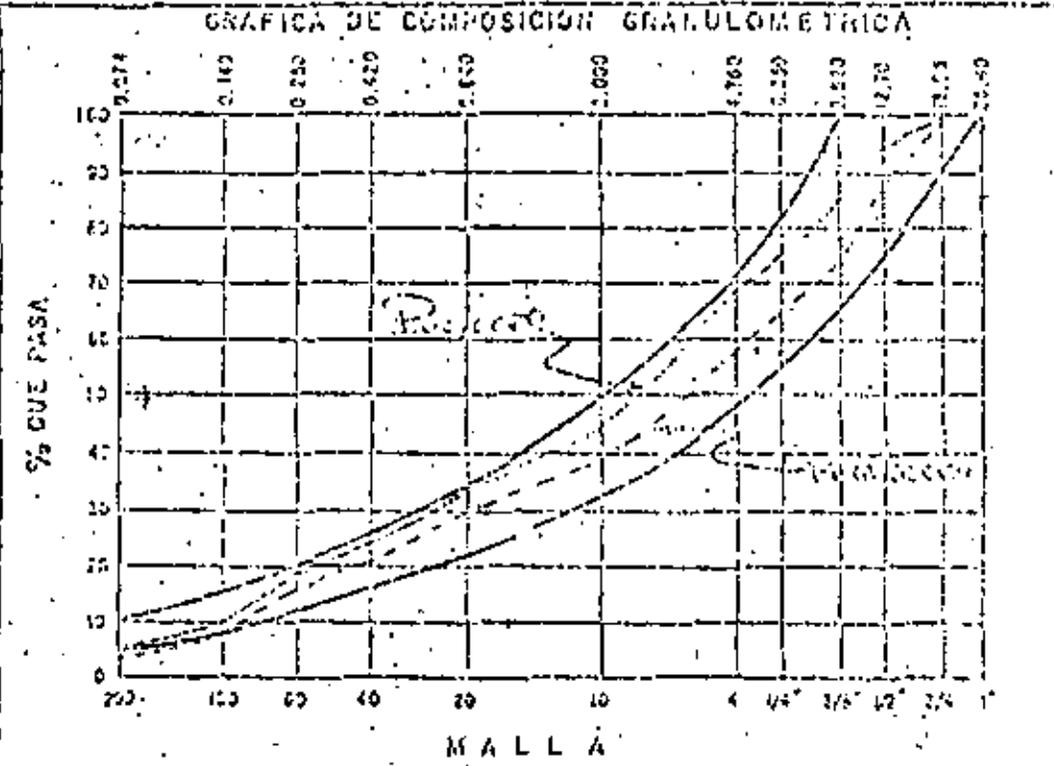
CLASIFICACION PETROGRAFICA \_\_\_\_\_

PESO VOL. SUJETO, Kg/m<sup>3</sup> \_\_\_\_\_

QUE PASA MALLA, %

|       |     |     |
|-------|-----|-----|
| 75"   | 100 | 100 |
| 100"  | 85  | 90  |
| 150"  | 75  | 85  |
| 200"  | 65  | 75  |
| 300"  | 55  | 65  |
| 400"  | 45  | 55  |
| 500"  | 35  | 45  |
| 600"  | 25  | 35  |
| 750"  | 15  | 25  |
| 1000" | 5   | 15  |

DETALE: \_\_\_\_\_  
 ASERACION, % \_\_\_\_\_  
 DEBILIDAD, % \_\_\_\_\_  
 PARTICULAS PLANAS, % \_\_\_\_\_  
 PARTICULAS LINEALES DE LAJA, % \_\_\_\_\_  
 EQUIVALENTE DE ARENA \_\_\_\_\_



CARACTERISTICAS DEL ASFALTO

TIPO \_\_\_\_\_  
 TEMPERATURA RECOMENDABLE DE APLICACION \_\_\_\_\_  
 PENETRACION \_\_\_\_\_

PRUEBAS EN LA MEZCLA ASFALTICA

CONT. OPT. DE ASFALTO EN 5.4%  
 PESO VOL. MAX. EN MEZCLA COMPACTA (Kg/m<sup>3</sup>) \_\_\_\_\_  
 AFINIDAD CON EL ASFALTO \_\_\_\_\_

GRADO DE COMPACTACION EN CARPETA ...  
 CONT. ASFALTO EN MEZCLA ...  
 PERMEABILIDAD DE LA CARPETA \_\_\_\_\_

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

|                  |                         |                                  |
|------------------|-------------------------|----------------------------------|
| EL LABORATORISTA | EL JEFE DEL LABORATORIO | EL JEFE DEL LABORATORIO REGIONAL |
|------------------|-------------------------|----------------------------------|

SECRETARIA DE OBRAS PUBLICAS  
 DIRECCION GENERAL DE SERVICIOS TECNICOS  
 DEPARTAMENTO DE LABORATORIOS

REPORTE DE CONCRETO ASFALTICO

|                             |                                   |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| MATERIAL <u>197-197-327</u> | EXPEDIENTE <u>15-35</u>           |
| ENCRYE N.º <u>2</u>         | FECHA RECIBO <u>24/11/73</u>      |
| MUESTRA NUM. <u>A-5-6</u>   | FECHA INFORME <u>24/11/73</u>     |
| ENVIADA POR _____           | PROCEDENCIA <u>ANEXO P. 11/50</u> |

PRUEBAS SOBRE MATERIAL PETREO

CLASIFICACION PETROGRAFICA \_\_\_\_\_

PESO VOL. SUELTO, Kg./m<sup>3</sup> \_\_\_\_\_

QUE PASA MALLA, %

1" \_\_\_\_\_

3/4" \_\_\_\_\_

1/2" \_\_\_\_\_

3/8" \_\_\_\_\_

1/4" \_\_\_\_\_

Nº 4 \_\_\_\_\_

" 10 \_\_\_\_\_

" 20 \_\_\_\_\_

" 40 \_\_\_\_\_

" 60 \_\_\_\_\_

" 100 \_\_\_\_\_

" 200 \_\_\_\_\_

DENSIDAD \_\_\_\_\_

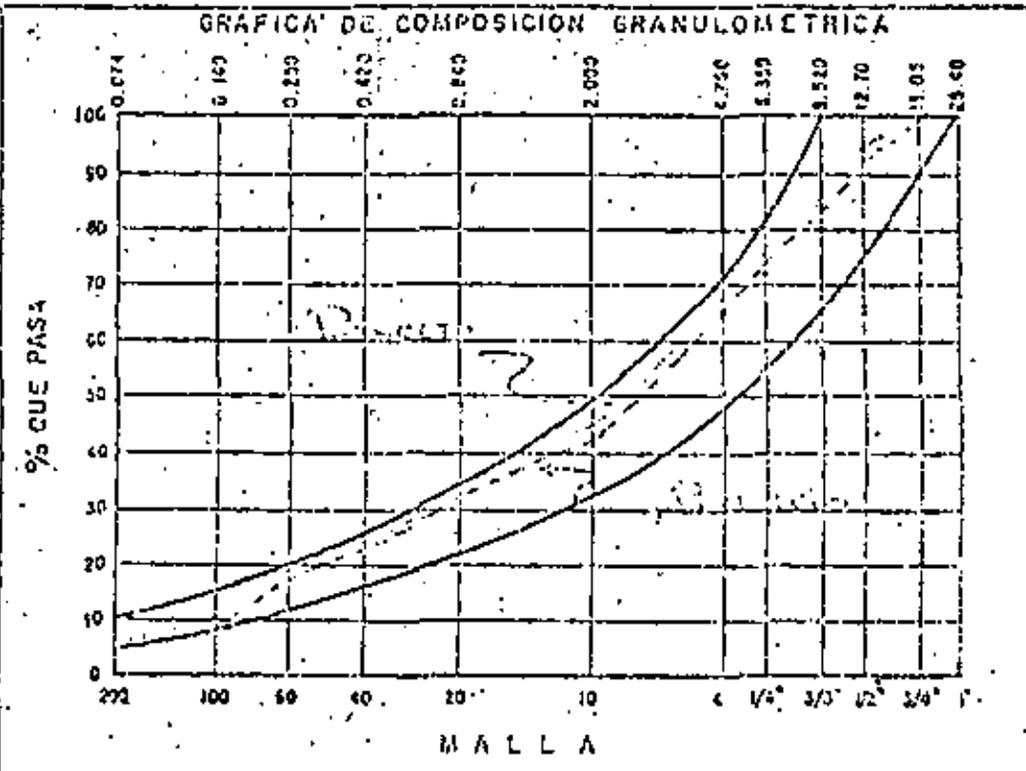
ABSORCION, % \_\_\_\_\_

ELONGATE, % \_\_\_\_\_

PARTICULAS ALARABONS, % \_\_\_\_\_

PARTICULAS EN FORMA DE LAJA, % \_\_\_\_\_

EQUIVALENTE DE ARENA \_\_\_\_\_



CARACTERISTICAS DEL ASFALTO

TIPO \_\_\_\_\_

TEMPERATURA RECOMENDABLE DE APLICACION \_\_\_\_\_

PERETRACION \_\_\_\_\_

PRUEBAS EN LA MEZCLA ASFALTICA

CONT. OPT. DE ASFALTO (%) 5.5

PESO VOL. MAX. EN MEZCLA COMPACTA (Kg./m<sup>3</sup>) \_\_\_\_\_

AFINIDAD CON EL ASFALTO \_\_\_\_\_

GRADO DE COMPACTACION EN CARPETA % \_\_\_\_\_

CONT. ASFALTO EN MEZCLA \_\_\_\_\_

PERMEABILIDAD DE LA CARPETA \_\_\_\_\_

OBSERVACIONES:

[Empty space for observations]

|                 |                         |                                  |
|-----------------|-------------------------|----------------------------------|
| EL LABORANTISTA | EL JEFE DEL LABORATORIO | EL JEFE DEL LABORATORIO REGIONAL |
|-----------------|-------------------------|----------------------------------|

| P O R C E N T A J E Q U E P A S A  |                            |      |                             |      |                             |      |                                |  |     |                                      |
|------------------------------------|----------------------------|------|-----------------------------|------|-----------------------------|------|--------------------------------|--|-----|--------------------------------------|
| Malla No.                          | Tolva No. 3<br>3/4" a 3/8" |      | Tolva No. 2<br>3/8" a No.10 |      | Tolva No. 1<br>Menor No. 10 |      | Grande<br>metría<br>Combinada. | Granulo<br>metría de Pro-<br>Trabajo yec-<br>to. |     | Tolera-<br>cias<br>Especi-<br>cadas. |
|                                    | Total                      | 30%  | Total                       | 40%  | Total                       | 30%  |                                |  |     |                                      |
| 3/4"                               | 100.0                      | 19.0 | 100.0                       | 40.0 | 100.0                       | 32.0 | 100.0                          | 100  | 100 | + 5                                  |
| 1/2"                               | 58.2                       | 11.0 | 100.0                       | 49.0 | 100.0                       | 32.0 | 92.0                           | 92   | 94  | + 5                                  |
| 3/8"                               | 10.1                       | 1.9  | 100.0                       | 49.0 | 100.0                       | 32.0 | 82.9                           | 83   | 85  | + 5                                  |
| 1/4"                               | 0.1                        | 1.1  | 84.2                        | 41.2 | 100.0                       | 32.0 | 74.3                           | 74   | 76  | + 5                                  |
| No. 4                              | 2.0                        | 0.4  | 68.5                        | 33.6 | 100.0                       | 32.0 | 66.0                           | 66   | 68  | + 4                                  |
| No. 10                             | 0.5                        | 0.1  | 21.0                        | 10.3 | 100.0                       | 32.0 | 42.4                           | 42   | 44  | + 3                                  |
| No. 20                             | 0.4                        | 0.1  | 16.0                        | 8.0  | 77.5                        | 24.8 | 32.9                           | 33   | 35  | + 3                                  |
| No. 40                             | 0.3                        | 0.1  | 11.0                        | 5.4  | 55.1                        | 17.6 | 23.1                           | 23   | 24  | + 1                                  |
| No. 60                             | 0.2                        | --   | 8.6                         | 4.2  | 42.9                        | 13.9 | 217.9                          | 18   | 19  | + 1                                  |
| No. 100                            | 0.1                        | --   | 4.8                         | 2.3  | 19.8                        | 6.3  | 8.6                            | 9  | 10  | + 1                                  |
| No. 200                            | 0.0                        | --   | 3.2                         | 1.6  | 9.1                         | 2.9  | 4.5                            | 5  | 6   | + 1                                  |
| Contenido de<br>Cement o asfáltico |                            |      |                             |      |                             |      |                                |  | 5.2 | + 0.<br>(+ 0.                        |

gados mayores. Este efecto aumenta cuando disminuye el tamaño del tamiz. Por esta razón no deben o no se emplean en una planta de elaboración de mezcla en caliente, tamices menores del No. 10.

En la tabla ejemplo, puede observarse que el material, salvo en lo que se refiere al de los tamices 100 y 200, puede combinarse ajustándose muy estrechamente a la fórmula de dosificación en planta. Como regla general, los análisis combinados de las tolvas en caliente, darán en estos, porcentajes correspondientes a mezclas de agregados más gruesos que los que se obtendrían de la granulometría de extracción. Esto se debe, a que es imposible separar los agregados de tamaños correspondientes a las mallas 100 y 200, que están adheridas a la piedra, esto en un análisis por vía seca y que si se separan cuando el análisis se efectúa por lavado, bien con agua, cuando el material aún no se mezcla con el producto asfáltico o con algún disolvente cuando el análisis se efectúa ya a la mezcla producida.

Ejemplo de Ajuste de la producción de planta continua.

Datos:

Producción requerida 100 Ton. por hora

Porcentaje de cemento asfáltico con respecto al peso de la mezcla.

CA = 5.2%

Peso específico del cemento asfáltico = 0.93 Kg/lt.

(a la temperatura de empleo)

De la calibración de las tolvas se tienen los siguientes porcentajes:

|             |     |
|-------------|-----|
| Tolva No. 3 | 19% |
| Tolva No. 2 | 49% |
| Tolva No. 1 | 32% |

Solución:

1o. - Se determina la cantidad de asfalto necesaria por minuto.

Producción de mezcla :  $100 \text{ Ton/hora} = 100 \frac{\text{Ton.}}{\text{hora}} \times \frac{(1,000\text{Kg}) \text{ hora}}{60 \text{ min.}}$

P. mezcla = 1666 Kg/min.

% de cemento asfáltico = 5.2% = 0.052 (expresado en forma decimal).

Cantidad de cemento asfáltico =  $1666 \times 0.052$

C. de cemento asfáltico = 86.6 Kg/min.

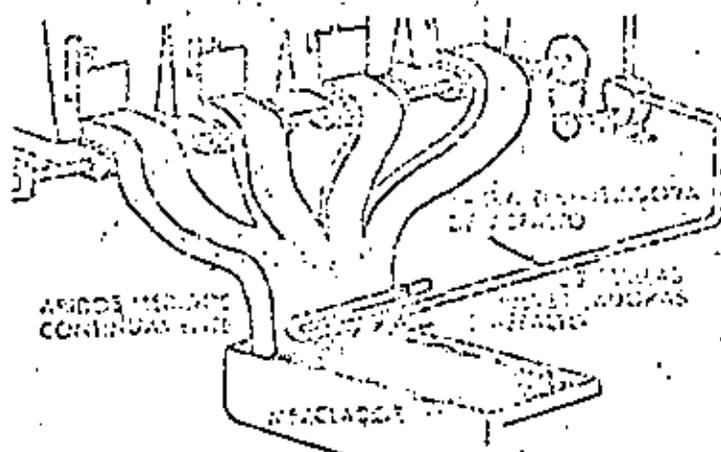
Haciendo la transformación a Lts/min.

$86.6 \text{ Kg/min.} = 86.6 \frac{\text{Kg.}}{\text{min.}} \times \frac{1 \text{ Lt.}}{0.93 \text{ Kg.}}$

C. de C Asfáltico = 93 lts./min.

2.- Selección de la combinación de engranajes.

Dado que el gasto de la bomba para asfalto, en este tipo de plantas, se regula mediante engranajes intercambiables, se debe encontrar en la información que proporciona el fabricante, (catálogo o manual de operación de la planta), cuál es la combinación de engranajes de la que se pueda obtener la cantidad de asfalto que más se aproxime a la requerida.



De los datos de fabricante, se pueden obtener las siguientes cantidades de asfalto por minuto.

90 Lts./min. para combinación de engranajes A

94 Lts./min. para combinación de engranajes B

98 Lts./min. para combinación de engranajes C

Para este caso escogeremos la combinación de engranajes "B" que nos da 94 Lts./min.

Lo anterior producirá una ligera alteración en la dosificación calculada, ya que solo necesitamos 93 Lts./min. por lo que es indispensable hacer una corrección a los cálculos originales..

3.- Corrección.

a).- Convertimos 94 Lts/min. a Kg/min.

$$\frac{94 \text{ Lts.}}{\text{min.}} = \frac{94 \text{ Lts.}}{\text{min.}} \times \frac{0.93 \text{ Kg.}}{\text{Lt.}}$$

$$\frac{94 \text{ Lts.}}{\text{min.}} = \frac{87.5 \text{ Kg.}}{\text{min.}}$$

b).- Calculamos la cantidad de material pétreo por minuto que será necesario para conservar el mismo porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla.

Para 1666 Kg/min., (100 ton./hora) de mezcla y 5.2% de cemento asfáltico, necesitamos 86.6 Kg/min. de cemento asfáltico. Qué cantidad de mezcla necesitamos producir para tener 5.2% de cemento asfáltico y 87.5 Kg/min. de cemento asfáltico.

$$\frac{X \text{ Kg/min. de mezcla}}{100\% \text{ de mezcla}} = \frac{87.5 \text{ Kg/min. de C. Asf.}}{5.2\% \text{ de C. Asf.}}$$

$$X \text{ Kg/min. de mezcla} = \frac{87.5 \text{ Kg/min.}}{5.2\%} \times 100\%$$

$$\text{Mezcla} = 1682 \text{ Kg/min.}$$

$$100\% \text{ de mezcla} - 5.2\% \text{ de C. Asf.} = 94.8\% \text{ de material pétreo.}$$

$$\text{Mat. pétreo} = 1682 \text{ Kg/min.} \times 94.8\%$$

$$\text{Mat. pétreo} = 1682 \times 0.948 \text{ Kg/min.}$$

$$\text{Mat. pétreo} = 1594.5 \text{ Kg/min.}$$

Resultado;

$$\text{Cemento asfáltico} = 5.2\% \text{ del peso total de la mezcla} \quad 87.5 \text{ Kg/min.}$$

$$\text{Mat. pétreo} = 94.8\% \text{ del peso total de la mezcla} \quad 1594.5 \text{ Kg/min.}$$

$$\text{Mezcla} \quad 1682 \text{ Kg/min.}$$

$$\text{Mezcla} = \frac{1682 \text{ Kg.}}{\text{min.}} \times \frac{60 \text{ min.}}{1 \text{ hora}} \times \frac{1 \text{ ton.}}{1000 \text{ Kg.}}$$

$$\text{Mezcla} = 101 \text{ ton/hora.} \quad \text{Comparación de la producción.}$$

La producción práctica resultó un poco mayor que la requerida originalmente de 100 ton/hora.

4.- Determinación de las cantidades en Kg/min, que es necesario dosificar de cada tolva, para producir la cantidad de mezcla calculada.

De los datos que proporciona el fabricante se puede obtener el número de vueltas del alimentador de áridos calientes (vuelta/minuto); si en este caso dicho valor es de 15.28, los kilogramos de material pétreo por vuelta se calcula así:

$$\text{Mat. Pétreo} = 1594.5 \text{ Kg/min.}$$

$$\text{Por cada vuelta} = 1594.5 \frac{\text{Kg.}}{\text{min.}} \times \frac{1 \text{ min.}}{15.28 \text{ vueltas}}$$

$$\text{Por cada vuelta} = 104 \frac{\text{Kg.}}{\text{vuelta}}$$

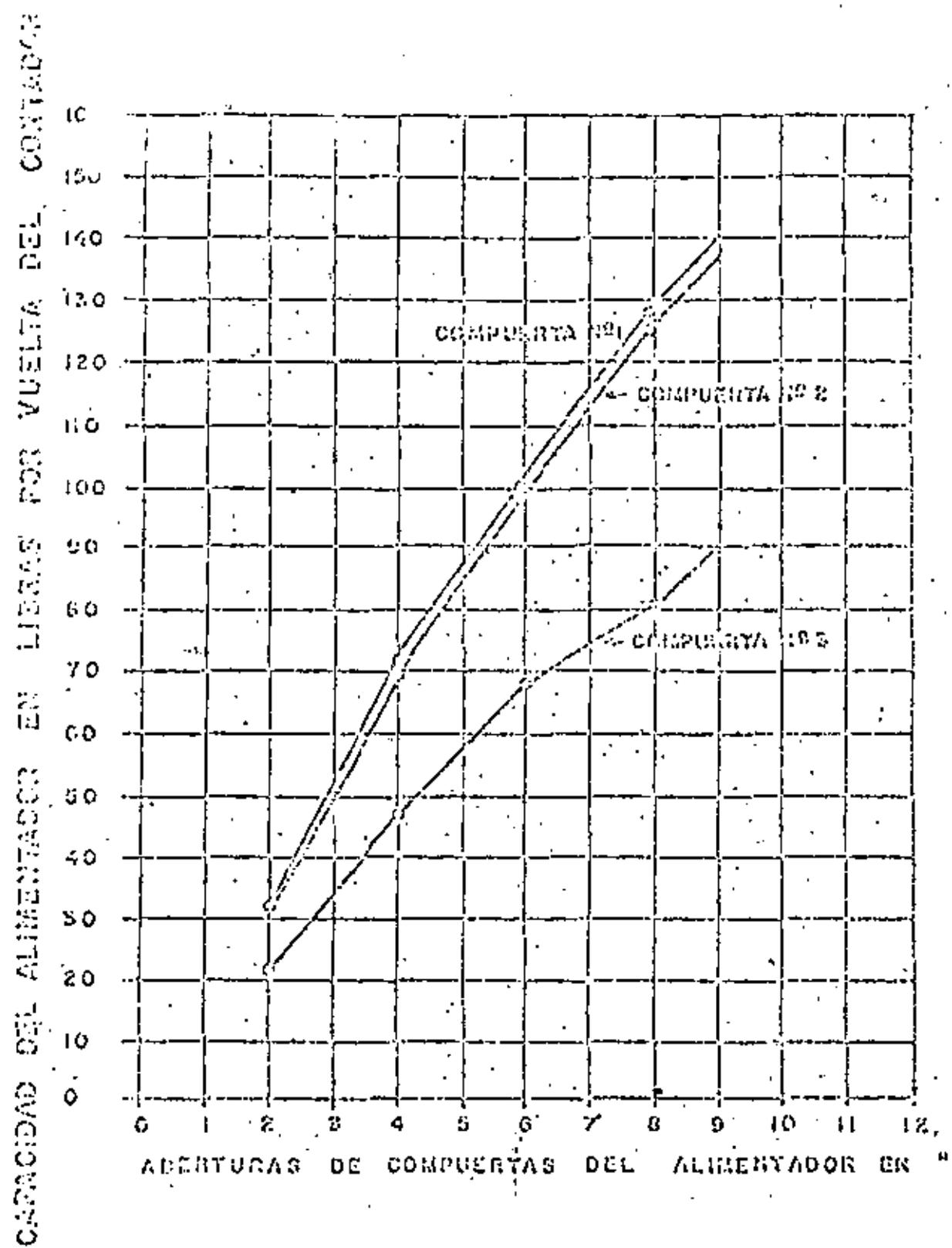
A continuación se calibra cada tolva de material pétreo caliente, por separado, haciendo variar la abertura de la compuerta y midiendo la cantidad de material que se obtiene en Kg/vuelta, para cada abertura en cm. La calibración de las tolvas de material caliente, se puede representar gráficamente (ver ejemplo de gráfica) a escala aritmética, teniendo en el eje horizontal la abertura de la compuerta en cm. (o pulgadas) y en el eje vertical la cantidad en Kg/vuelta (o lbs./vuelta) que sale de dicha compuerta.

En este ejemplo la gráfica de calibración tiene como unidades libras por vuelta y pulgadas.

Para poder utilizar esta gráfica, hacemos la transformación de Kg/vuelta a libras/vuelta.

$$104 \text{ Kg/vuelta} = 104 \frac{\text{Kg.}}{\text{vuelta}} \times \frac{1 \text{ libra}}{0.454 \text{ Kg.}} \quad 104 \text{ Kg/vuelta} = 229 \text{ libras/vuelta}$$

# CURVAS DE CALIBRACION DEL SUMINISTRO DE ACREGADOS EN PLANTAS DE TIPO CONTINUO



Los porcentajes de material de cada tolva son los siguientes:

| Tolva No. | Porcentaje | Libras/Vuelta             |
|-----------|------------|---------------------------|
| 1         | 32%        | $0.32 \times 229 = 73.3$  |
| 2         | 49%        | $0.49 \times 229 = 112.2$ |
| 3         | 19%        | $0.19 \times 229 = 43.5$  |
|           |            | <u>229.0 Libs/vuelta.</u> |

La abertura de cada tolva se obtendrá de la gráfica de calibración.

| Tolva No. | Lbs/Vuelta | Abertura en pulgadas |
|-----------|------------|----------------------|
| 1         | 73.3       | 4.0                  |
| 2         | 112.2      | 7.0                  |
| 3         | 43.5       | 3.8                  |

Ya a partir de este punto pueden hacerse cambios diferenciales, los cálculos se efectúan sobre los Kg. de agregados por vuelta, y se modifican las aberturas de las tolvas por medio de la curva de la gráfica de calibración de suministro.

Es muy frecuente que al comenzar el funcionamiento normal de una planta, la granulometría de la mezcla tome un aspecto algo distinto del obtenido en las mezclas de prueba. Con el objeto de mantener el producto dentro de los lineamientos del diseño, es conveniente efectuar pequeños cambios en las aberturas de las tolvas. Estos cambios deben de llevarse a cabo con extrema cuidado y por pequeños incrementos; antes de cualquier modificación, se requiere la seguridad de que se hace en la dirección adecuada. No es correcto efectuar ningún cambio basándose en un único ensayo, conviene efectuar

tuar un mínimo de tres, a fin de estar seguro de que la variación no está basada en una muestra no representativa.

Por lo anterior, es muy importante que la toma de muestras sea en extremo cuidadosa, en especial en mezclas con agregados con tamaños máximos de  $3/4"$  ó más, ya que unas piedras suplementarias del tamaño mayor, pueden hacer que el resultado del ensaye caiga fuera de los límites de la fórmula de dosificación en planta por exceso de gruesos, o inversamente, la falta de unas de estas piedras puede hacer que el ensaye indique que los agregados se salen de la fórmula de dosificación en planta por defecto de agregados gruesos.

Es muy común no obtener resultados satisfactorios en la prueba inicial, por ello después de haber empezado la producción normal, es frecuente que una de las tolvas de agregados fríos empiece a rebozar, mientras que es necesario esperar para que una ó más de las otras se llenen. Para corregir lo anterior, deben hacerse gradualmente pequeños cambios en las tolvas en frío, hasta obtener un funcionamiento adecuado de la planta.

La naturaleza de variación de resultados, puede deducirse de la naturaleza del exceso o deficiencia en la capacidad de las tolvas, por ejemplo;

Si la tolva de agregados que pasan por la malla No. 10, reboza, mientras que es necesario esperar a que se llene la tolva de agregados de  $3/8"$ , disminuirémos ligeramente la abertura de la tolva C de agregados fríos, aumentando proporcionalmente la abertura de la tova A.

Como otro ejemplo, podría citarse el siguiente.

Suponiendo que la tolva de agregados gruesos reboza, pero que las otras dos funcionan correctamente, en este caso se está suministrando en conjunto un exceso de material, de manera que será necesario reducir ligeramente la dosificación de la tolva A de agregados finos y no será necesario modificar la de las otras. Cuando deba de aumentarse o disminuirse la alimentación en conjunto por exigencias del funcionamiento, se modifica la abertura inicial de cada tolva en la misma proporción hasta que se obtiene el volumen total necesario. No es recomendable hacer dos correcciones a la vez; por ejemplo: Si se sabe que la alimentación total es escasa y que la dosificación de agregados en una tolva es ligeramente excesiva, es preferible corregir primero el volumen total y hacer después una nueva corrección en las proporciones de agregados de las diversas tolvas.

Es relativamente frecuente no poder producir una mezcla en planta con los materiales de alimentación en frío que se usan, especialmente cuando las tolerancias son relativamente estrechas, como en nuestro ejemplo. En tal caso deben tomarse muestras de los almacenamientos, determinar su granulometría y obtener una nueva fórmula de dosificar en planta, si esta fórmula produce una granulometría que cumple con las especificaciones generales y tiene características satisfactorias, no hay motivo para cambiar la fórmula de dosificación de modo que el productor pueda mantenerse dentro de los límites de aquella con los agregados de que dispone. Es común que incidentes como el que acabamos de indicar, procedan de un mal sustrato de los agregados en frío.

Es indiscutible la importancia del estricto control de la alimentación en todo de cada tipo de agregados, la alimentación de estos al secador, debe regularse de tal manera que el caudal de cada tipo de ellas sea uniforme y lo más próxima posible a la cantidad exacta necesaria para mantener las tolvas de agregados calientes bien llenas, pero sin rebozar.

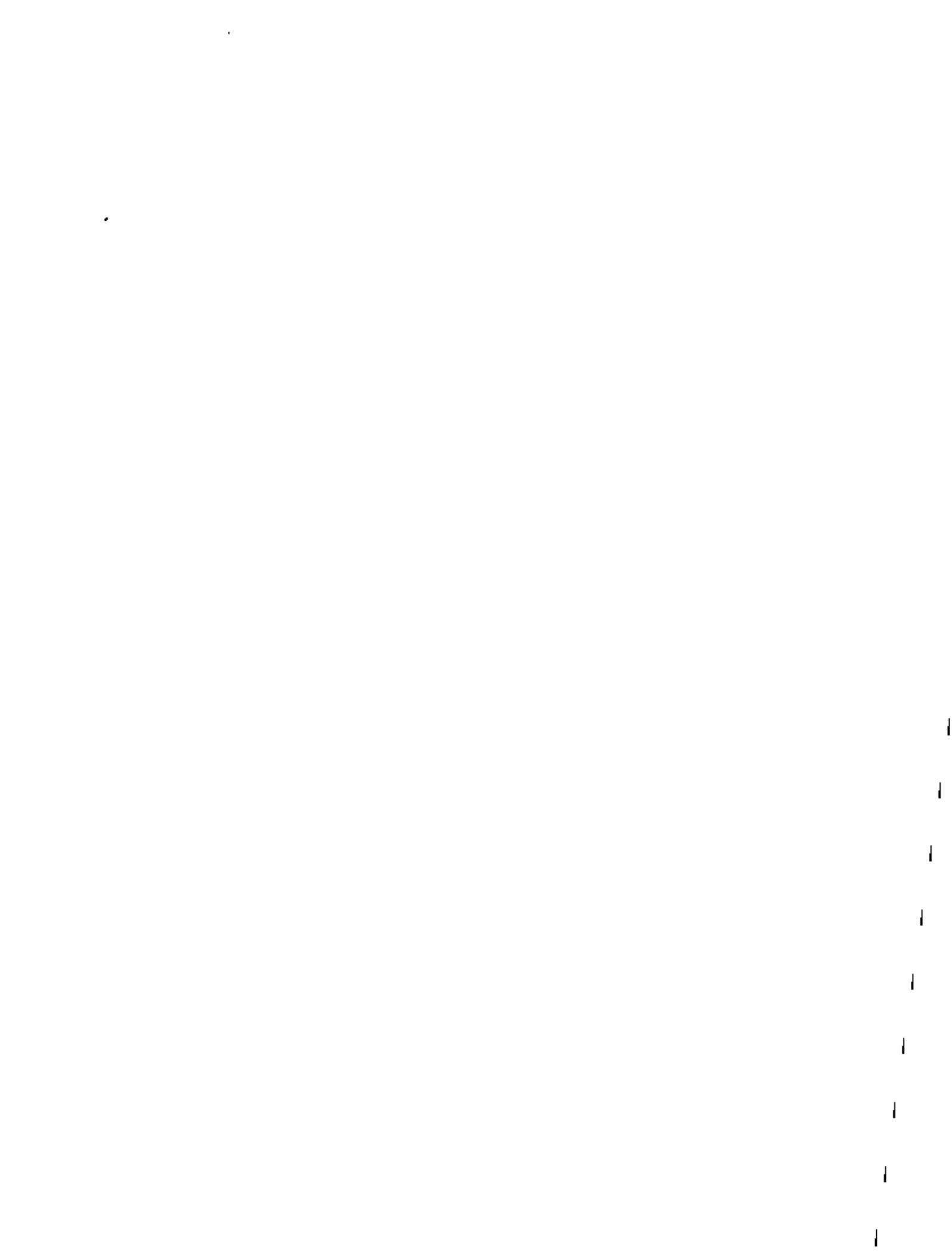
La irregularidad del caudal de cualquiera de los materiales fríos, es perjudicial de dos maneras distintas para el buen funcionamiento de la planta. Si se sobrecargan las mallas de uno de los tamaños, disminuye el rendimiento del cribado y se produce generalmente un exceso de arrastra de unos agregados por otros.

El exceso o defecto de uno de los materiales fríos puede dar lugar a que una de las tolvas de agregados en caliente, reboze o se vacíe, una tolva rebozante significa pérdida de calor y vacía, disminuye la capacidad de la planta. En ambos casos, los gastos de funcionamiento de la planta aumentan.

En el caso relativamente frecuente de agregados húmedos o inclusive saturados a consecuencia de lluvias o por su extracción de lechos de ríos, puede eliminarse gran parte de la humedad superficial removiendo las capas superiores y empleando la parte que se ha ventilado en mayor proporción. En el caso de usar continuamente agregados mojados, uno de los mejores métodos para asegurarse del empleo de material estrictamente seco, es utilizar dos secadores en serie, de esta forma puede lograrse el máximo de rendimiento de la planta, sin duda alguna sobre el perfecto secado de los agregados.



P A R T E T E R C E R A .



Control de Calidad. - La supervisión y control deben comenzar al momento de iniciarse la producción, sin embargo, es conveniente que se observe la maniobra de instalación y armado de la planta (en caso de que no esté instalada), con objeto de obtener, desde un principio los datos necesarios sobre las condiciones del equipo, como bandas, elevadores, quemadores, cribas, compuertas, etc., y poder prever las causas de futuros problemas de producción.

Actualmente las reglamentaciones de la S. O. P. dejan a juicio y criterio del contratista los ajustes y calibración de las plantas, por lo que la mayoría de las veces, no se efectúa ninguna calibración, culpándose a los bancos de material cuando no se logra producir la granulometría de proyecto. Debido a lo anterior, en la mayor parte de los casos en que se ha trabajado concreto asfáltico, ha sido necesario elaborar ciertos de bachas fuera de lo especificado, para lograr producir la mezcla con una granulometría y contenido de cemento asfáltico aceptables, y como para determinar si son aceptables las bachas producidas, es necesario conocer su granulometría y contenido de cemento asfáltico, por lo general cuando se obtienen estos datos, la mezcla analizada ya fue tendida. Para evitar esto es necesario que no se inicie el tendido de la mezcla asfáltica mientras no se haya elaborado una mezcla de prueba que demuestre que ya se han logrado las condiciones exigidas por el proyecto.

Hay que tener en cuenta, al trabajar el concreto asfáltico, que:

Una buena mezcla, mal tendida y mal compactada, nos dá una mala carpeta.

Una mala mezcla bien tendida y bien compactada, nos dá una mala carpeta.

Es decir, que en el concreto asfáltico no puede descuidarse ni la elaboración, ni el tendido ni la compactación, pues de estos tres factores depende el que se obtenga una buena o mala carpeta.

Uno de los principales requisitos para que una carpeta se comporte satisfactoriamente y tenga una larga vida útil, es el grado de compactación que se le dá. Este puede determinarse por medio de corazones extraídos con una máquina perforadora o con cincel, determinándoles su densidad por medio del método descrito en el inciso 108-7.4 de las especificaciones usadas por la S.O.P., conocido como "Método de la Parafina". Otra forma de determinar la densidad es con el uso de equipo conocido por AP-425 fabricado por la Soiltest, y con el cual no se causa ningún daño a la carpeta, además de ser un procedimiento mucho más rápido.

Respecto al grado de compactación que debe tener la carpeta, las especificaciones usadas por la S.O.P. establecen:

"...hasta alcanzar un grado mínimo de noventa y cinco por ciento (95%0 del peso volumétrico máximo que fije -

el proyecto y lo ordena la Secretaría....."

-- (Parte Cuarta.- Inciso 57-04.13 Pag. 124)  
Edic. 1971:

Con respecto a este punto es conveniente aclarar que: Cuando se utiliza el peso volúmetrico máximo del proyecto se está haciendo una comparación en la que existen variables no controlables en la producción- por lo que no siempre resulta conveniente usar el peso volúmetrico máximo de proyecto.

Las variables no controlables a que se refiere el párrafo anterior, son - las variaciones, que pueden ser aceptables dentro de ciertos rangos especificados, en cuanto a granulometría y contenido de cemento asfáltico - en la mezcla.

Por otra parte, se puede utilizar el peso volúmetrico máximo de la mezcla producida, el cual es determinado de las pastillas que se elaboran para el control de la planta. Al utilizar este peso volúmetrico se efectúa una comparación más racional ya que se hace la determinación de la compactación con los pesos volúmetricos del mismo material tendido y - de la muestra tomada de dicho material.

Las características que debe reunir una mezcla asfáltica elaborada en caliente, están fijadas en el siguiente cuadro.

| Características   | Uso de la mezcla<br>asfáltica elabora-<br>da con cemento as-<br>fáltico.  | Para Carreteras                     |                                       | Para Aeropla-<br>tas,            |
|---|---|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
|   |   | Hasta<br>2,000<br>Veh. -<br>pesados | Más de<br>2,000<br>Veh: pa-<br>sados. |                                  |
| No. de golpes por<br>cara   |   | 50                                  | 75                                    | 75                               |
| Estabilidad mínima<br>Kgs.  | Para carpetas, capas<br>de renivelación, ba-<br>ses asfálticas y bacheo.  | 450                                 | 700                                   | 700                              |
| Flujo, en milíme-<br>tros.  | Para carpetas, capas<br>de renivelación, ba-<br>ses asfálticas y ba-<br>cheo.   | 2-4.5                               | 2-4                                   | 2-4                              |
| Por ciento de va-<br>cíos en la mezcla<br>respecto al volú-<br>men del especímen  | Para carpetas y mezclas<br>de renivelación.<br>Para bases asfálticas.   | 3-5<br>3-8                          | 3-5<br>3-8                            | 3-5<br>3-8                       |
| Por ciento de va-<br>cíos en el agrega-<br>do mineral (VAM)<br>respecto al volú-<br>men del especímen<br>de mezcla, de --<br>acuerdo con el ta-<br>maño máximo del<br>pétreo. | Para carpetas, capas<br>de renivelación, ba-<br>ses asfálticas y ba-<br>cheo.<br><br>Tamaño Máx.<br>4.76 mm. (No. 4)<br>6.35 mm. (1/4")<br>9.51 mm. (3/8")<br>12.7 mm. (1/2")<br>19.0 mm. (3/4")<br>25.4 mm. (1") | 18<br>17<br>16<br>15<br>14<br>13    | 18<br>17<br>16<br>15<br>14<br>13      | 18<br>17<br>16<br>15<br>14<br>13 |

Se consideran como vehículos pesados los camiones en todos sus tipos y los autobuses.

Los porcentos de vacíos de la mezcla y del material pétreo, respecto al volumen del especímen, deberán determinarse de acuerdo con el procedimiento descrito en el Capítulo CXII de la Parte Novena.

TRABAJO COMPLEMENTARIO.

- CONOCIDAS LAS GRANULOMETRIAS DE TRES MATERIALES, QUE SEGUN ESTUDIOS PREVIOS, REUNEN CARACTERISTICAS ACEPTABLES PARA SU EMPLEO EN LA ELABORACION DE CONCRETO ASFALTICO, DETERMINE LAS PROPORCIONES EN QUE SE DEBERAN USAR PARA OBTENER LA CURVA GRANULOMETRICA DE PROYECTO.

| MALLA<br>No. | PORCENTAJE QUE PASA. |          |          | PROYECTO |
|--------------|----------------------|----------|----------|----------|
|              | MAT. "A"             | MAT. "B" | MAT. "C" |          |
| 3/4          | 100                  | 100      |          | 100      |
| 1/2          | 72                   | 96       |          | 88       |
| 3/8          | 50                   | 91       |          | 75       |
| 1/4          | 32                   | 80       |          | 60       |
| No. 4        | 23                   | 66       |          | 51       |
| No. 10       | 11                   | 42       | 100      | 35       |
| No. 20       | 6                    | 26       | 99       | 24       |
| No. 40       | 4                    | 20       | 77       | 18       |
| No. 60       | 3                    | 16       | 22       | 10       |
| No. 100      | 2                    | 11       | 4        | 7        |
| No. 200      | 1                    | 7        | 2        | 5        |

## PROBLEMA:

- 1.- Determinar los desperdicios que se tendrán al usar una curva granulométrica de proyecto y conocida la del material original. . Dibujar las curvas con los datos anexos.
- 2.- Hacer el ajuste o calibración teórica de una planta de producción discontinua, con los siguientes datos:

| Tolva No. | Material que pasa malla | Material retenido en malla. |
|-----------|-------------------------|-----------------------------|
| 1         | 1/4"                    |                             |
| 2         | 1/2"                    | 1/4"                        |
| 3         | 3/4"                    | 1/2"                        |

Supondremos que la granulometría de proyecto exige los siguientes porcentajes:

| Material | % de Proyecto |
|----------|---------------|
| 1        | 68            |
| 2        | 17            |
| 3        | 15            |

Al efectuarse la granulometría en cada tolva, se obtuvo la siguiente contaminación:

| Material | T o l v a s N o . |     |     |
|----------|-------------------|-----|-----|
|          | 1                 | 2   | 3   |
| 1        | 100%              | 13% |     |
| 2        |                   | 67% | 8%  |
| 3        |                   |     | 92% |

- a. - Calcular los porcentajes que será necesario extraer de cada tolva, de manera que se aproveche al máximo el material que se encuentre en cada tolva.
- b. - Calcular los desperdicios que habría de cada material si la capacidad de las tolvas para cada una de estas, es la misma.

B I B L I O G R A F I A

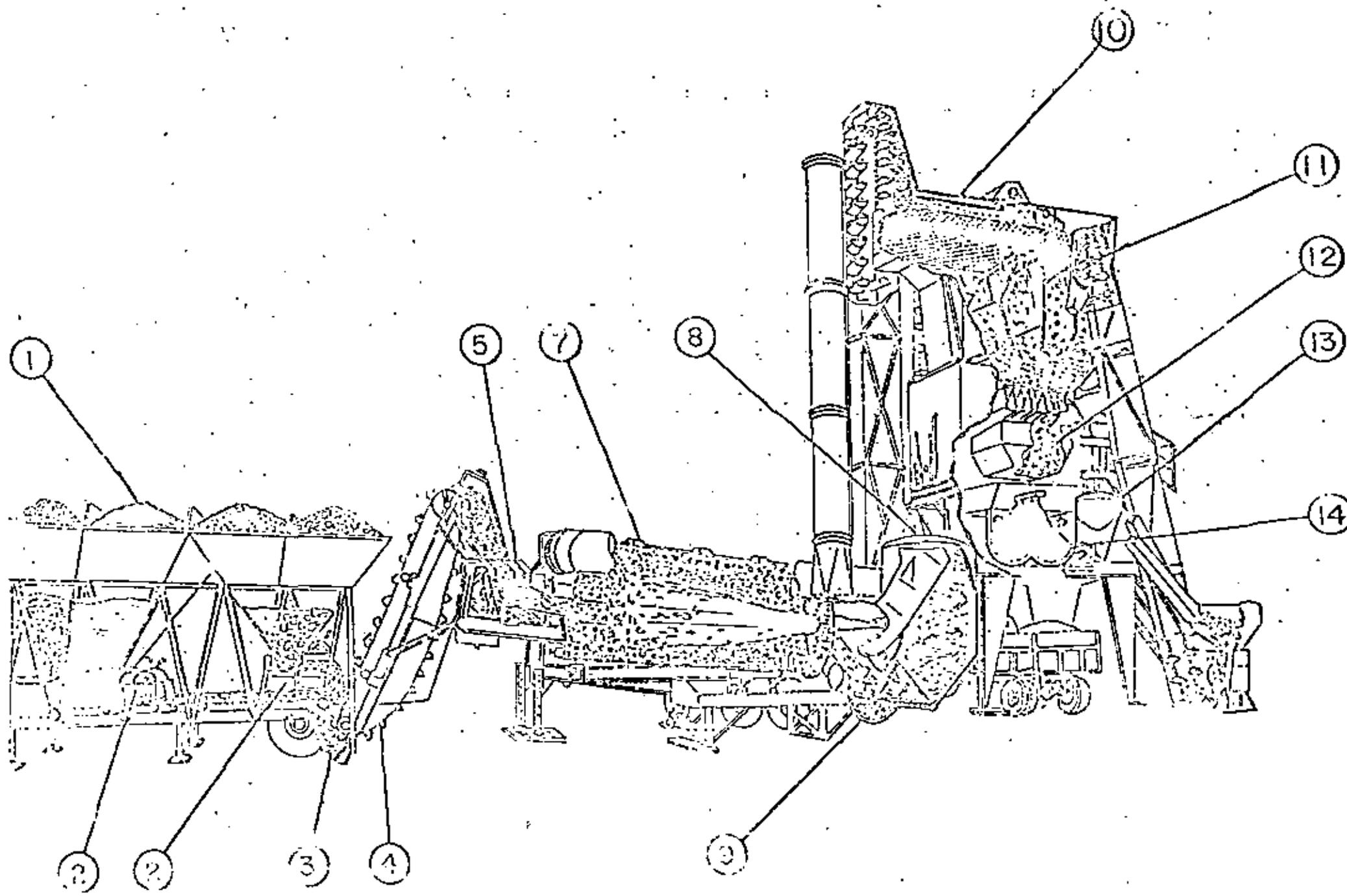
ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCION S. O. P.  
PARTES IV, VIII Y IX.

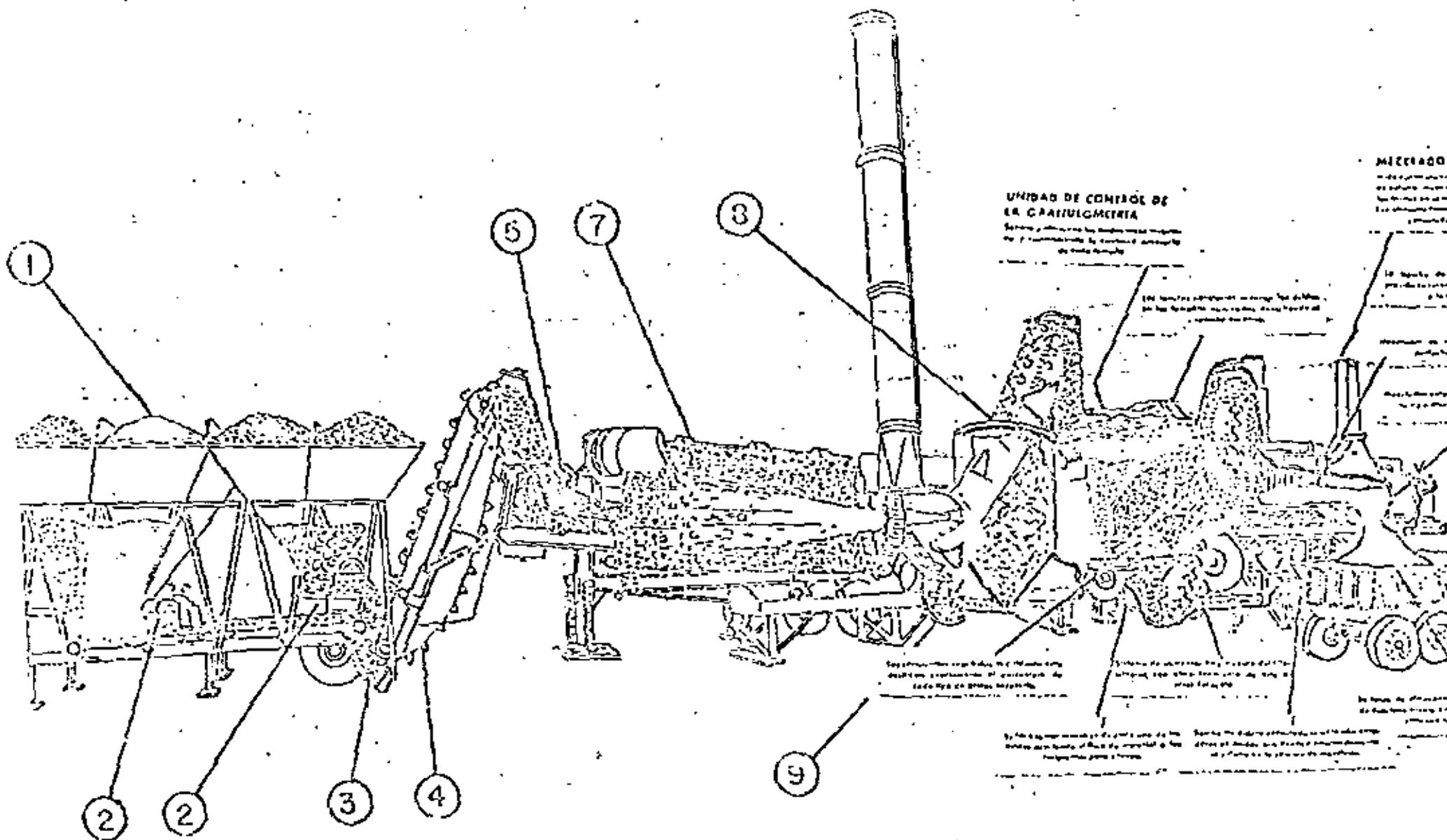
PAVIMENTOS ASFALTICOS.  
MARTIN Y WALLACE.  
EDITORIAL AGUILAR

ELABORACION DEL CONCRETO ASFALTICO (APUNTES).  
ING. ALFONSO GRACIA SAENZ RICO.

EL CONCRETO ASFALTICO (APUNTES).  
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCION DE LA DIVISION  
DE CAMINOS DEL ESTADO DE CALIFORNIA, E. U. DE N. A.

MANUAL DEL ASFALTO.  
THE ASPHALT INSTITUTE  
COLLEGE PARK  
MARYLAND, U. S. A.





**UNIDAD DE CONTROL DE LA CEMENTERÍA**  
 Sistema y sistema de control para el control de la producción de cemento.

**MICRADO**  
 Sistema de control para el control de la producción de cemento.

Este sistema controla el flujo de los materiales en el proceso de producción de cemento.

Este sistema controla el flujo de los materiales en el proceso de producción de cemento.

Este sistema controla el flujo de los materiales en el proceso de producción de cemento.

Este sistema controla el flujo de los materiales en el proceso de producción de cemento.

Este sistema controla el flujo de los materiales en el proceso de producción de cemento.

Este sistema controla el flujo de los materiales en el proceso de producción de cemento.



centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



CURSO: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS

TEMA: SELECCION DEL EQUIPO DE COMPACTACION

ING. ROBERTO PASQUEL LUJAN



## SELECCION DEL EQUIPO DE COMPACTACION.

La finalidad de esta plática es comentar algunas ideas sobre los métodos que hemos empleado en la selección del tipo de máquina compactadora de terracerías, que creemos más conveniente, para conjugar factores de inversión, producción, movilidad, eficiencia, disponibilidad de refacciones y servicios.

Debemos tener en mente que, en la construcción pesada, la inversión en equipo es cuantiosa y que éste se adquiere usualmente fuera del país, por lo que es muy importante pesar cuidadosamente todas las posibilidades para poder escoger la máquina más eficiente; esto es, el menor número posible de unidades para un trabajo determinado.

La vida útil de los pavimentos depende, primordialmente, de un drenaje bien proyectado, y de la estabilidad de las terracerías, ya que en ésta interviene, de manera importante, el grado de compactación a que fueron sometidos.

Compactación es la densificación artificial de los suelos mediante la aplicación de presiones que expulsan el aire y el agua de la masa del suelo. En términos de nuestra plática, debemos agregar que la compactación debe lograrse al menor costo posible. Para llegar a esto, necesitamos conocer ampliamente las especificaciones, los materiales de que se trate, los métodos que pensamos emplear, el equipo disponible, etc.

Las especificaciones de compactación las fija el proyectista de la obra, solicitando el grado de compactación, expresado como un porcentaje del peso volumétrico seco máximo, obtenido en el laboratorio de muestras representativas de los materiales que se van a emplear.

El grado de compactación es afectado por:

- 1.- El contenido de humedad en el material.
- 2.- La naturaleza del material, esto es, sus propiedades físicas, granulometría, etc.
- 3.- El tipo e intensidad de la fuerza compactiva.

La humedad en el material es un factor que siempre debe ser bien controlado.

Para esto contamos con la determinación, en el laboratorio, del contenido óptimo de humedad. El contenido óptimo de humedad es la cantidad de agua contenida en la muestra, con la que se obtuvo el peso volumétrico máximo, expresada como porcentaje del peso seco máximo de la muestra. Haciendo pruebas en el campo, en los bancos y cortes de donde proceden los materiales para las terracerías, podemos conocer la cantidad de agua que debemos agregarle o quitarle al material. Es conveniente, para compensar la que se pierde por evaporación, agregar agua un poco en exceso de la humedad óptima. La compactación la daremos sin dificultad, con el equipo adecuado, si el contenido de agua en los materiales es el conveniente, para que lleve a cabo su función de lubricante para el acomodo de las partículas de los suelos. Cuando la cantidad de agua por agregar es considerable, y siempre que las condiciones de espacio, pendiente adecuada, ubicación del agua, etc., lo permitan, es conveniente agregar agua necesaria para la compactación, directamente en el banco de materiales. Esto se hace después de arar o aflojar la superficie del banco a una profundidad tal que permita el tránsito de las pipas. Los bancos que, por su dureza o por razones de rendimiento en la carga, se deben aflojar, se prestan para agregar el agua. También, en caso de requerirse, se puede quitar humedad a los materiales en el banco con la simple acción aflojadora de los desgarradores. Es más usual agregar el agua directamente en el lugar donde se lleva a cabo la compactación. El personal encargado de vigilar estas operaciones debe ser muy experimentado y conocedor de los materiales, sobre todo para aquellos que exijan, para su adecuada compactación, de mucha precisión en el grado de humedad. El equipo que hemos encontrado más apropiado para agregar agua a las terracerías, ha sido el de pipas de 8 m<sup>3</sup> que riegan el agua en abanico cubriendo una buena superficie por pasada.

El tamaño y peso de estas unidades permiten bastante maniobrabilidad en la construcción de terracerías, sobre todo en caminos relativamente angostos, porque pueden también entrar y salir de la zona de tiro rápidamente después de cumplir con su cometido, sin estorbar a los compactadores ni a las unidades de acarreo y depósito de materiales.

Decíamos que también la naturaleza de los suelos afecta la compactación que debemos obtener, no solamente por su peso, sino también por su comportamiento ante los esfuerzos compactivos con humedades menores a la óptima. -- Por ejemplo: algunas arcillas pesadas pueden ser compactadas adecuadamente con algunas variaciones en más o en menos en el contenido de humedad; en cambio, suelos de tipo granular más o menos bien graduados son muy sensibles a cualquier diferencia en su contenido de agua con relación a la óptima. En general, los suelos en su estado natural son raramente homogéneos y solamente pueden ser estudiados y trabajados mediante comparaciones con otros de tipo similar de los que se tiene alguna experiencia. Los tipos de suelos con

los que comunmente nos encontramos los constructores de caminos son: gravas, que son piedras graduadas hasta la malla de 1/4", y arenas con partículas de hasta 0.002", (este es un material de tipo granular sin atracción entre sus partículas por lo que seco no tiene ninguna resistencia). Las arenas y gravas pueden ser vibradas hasta obtener buenas densidades, porque los granos se acomodan hasta que logran su acomodo, minimizando los vacíos.

Los limos son arena muy fina, pero sin parecer granulares al tacto que en estado puro, cuando son agitados en agua, se depositan en el fondo del recipiente dejando el agua clara en la parte superior. Aunque sus tamaños son menores de 0.002" se les considera de tipo granular. No se obtienen buenas compactaciones con el limo puro; casi no tiene resistencia estando seco, pues no hay cohesión entre sus granos. Los materiales granulares permiten el paso del agua; esto es, son permeables. Los materiales hasta ahora mencionados, se han usado en terraplenes, claro que en alguna medida mezclados entre sí, con bastante buen éxito, con altas capacidades de resistencia y larga vida, requiriendo para ésto que los taludes se cubran inmediatamente con alguna especie vegetal que los confine y la superficie del terraplén se impermeabilice.

La arcilla es el suelo más fino; consiste de partículas microscópicas coloidales que le dan su propiedad plástica. En agua, los coloides se mantienen en suspensión; tienen atracción entre sí que los convierte en un material cohesivo. Seca, la arcilla tiene alta resistencia; no se erosiona fácilmente, se trabaja bien y se compacta fácilmente cuando las condiciones de humedad son favorables. Las terracerías de material arcilloso deben también protegerse inmediatamente del intemperismo, porque son susceptibles de hinchamiento y enjutamiento cuando absorben o pierden humedad.

La materia orgánica es otro materiales que halla el constructor en cantidad abundante. Lo menciono porque debe evitarse que forme parte de las terracerías, por sus efectos dañinos, pues al continuar su descomposición en el cuerpo del terraplén, producen vacíos y reducen la plasticidad y la resistencia.

Estos son los tipos de suelos que, mezclados entre sí en menor o mayor grado, encontramos disponibles para construir un camino. A diferencia de terracerías para aeropuertos o presas en que, por lo general, se fijan uno o pocos bancos de materiales, casi siempre semejantes para toda la obra; en caminos, según avanza la obra, los bancos de materiales usualmente van cambiando de naturaleza en los suelos que los componen y es en este caso donde, creo yo, se debe escoger cuidadosamente el tipo de compactadores que permitan la máxima aplicación en su capacidad de compactar diversos suelos económicamente. La configuración del terreno influye notablemente en la selección del tipo de compactador; en caminos de terracerías compensadas en que el área de los terraplenes es reducida, sobre todo en su desplante, conviene pensar en equipo de compactación autopropulsado con transmisiones que permitan avances y retrocesos muy rápidos y con dirección hidráulica.

## COMPACTADOR DE PRESION PLANCHA RIGIDA

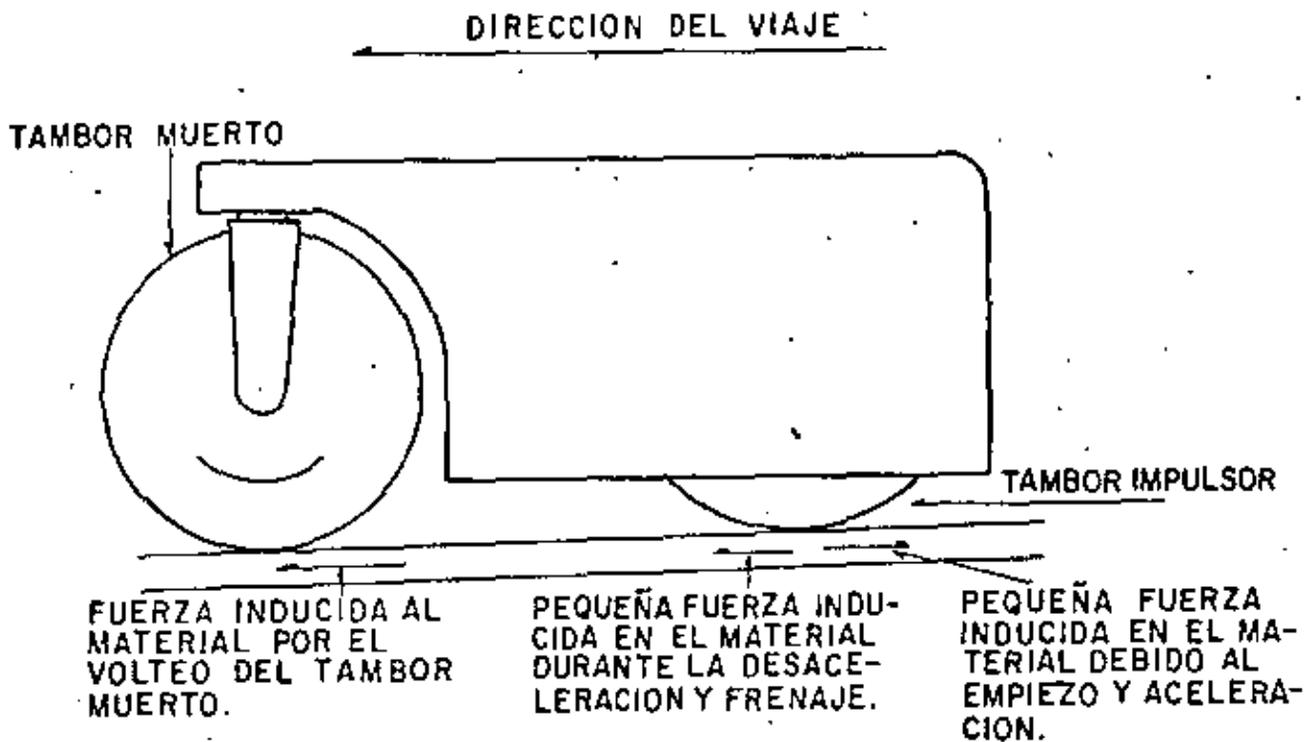


Fig. 1

La compactación se logra en el campo mediante máquinas que aplican cuatro tipos de fuerzas en los suelos: presión, impacto, vibración y manipulación. La presión es producto de una fuerza vertical aplicada por el compactador. Sujeto el material a la fuerza, es comprimido y, por lo tanto, aumenta su densidad. Mientras actúa esta fuerza, el material tiende a desplazarse. Algunos compactadores son más eficientes que otros al prevenir estos desplazamientos. Entre menor sea el desplazamiento del material, mayor será la eficiencia compactiva de la fuerza aplicada. También se nota que al aplicarse la fuerza verticalmente, según avanza el compactador, se forman grietas transversales que van desapareciendo, según se densifica el material, hasta el pun

to en que se igualan las fuerzas compactivas y la capacidad del material para soportarla. (Ver figuras 1, 2 y 3).

La compactación por impacto y vibración se logra a través de una serie de golpes. Habría que considerarlos como dos tipos de fuerzas compactivas -- que están íntimamente ligadas. Generalmente se estima que las fuerzas que se aplican por impacto, están en frecuencias de 50 a 600 golpes por minuto. Los compactadores vibratorios usualmente operan a frecuencias que pueden ir de -- 900 a 2400 vibraciones por minuto. Las fuerzas empleadas son, también, de impacto, aunque a velocidades mucho más altas.

Las vibraciones son producidas por pesos fuera de centro (excéntricas) - en una flecha en rotación. La velocidad de giro de la flecha determina la -- frecuencia (número de impactos o vibraciones por minuto). El peso de los excéntricos, su distancia de la flecha y el peso del tambor determina la amplitud (el desplazamiento máximo en una dirección desde la posición de reposo).

Para cada tipo de material se debe estudiar, mediante pruebas en el campo, cual es la mejor relación-velocidad de translación/frecuencia/amplitud para que la compactación se logre económicamente y con la calidad exigida. -- (Ver figuras 4, 5, 6, 7 y 8).

Las fuerzas de manipulación o amasado son muy importantes en el arreglo o acomodo de las partículas de los suelos para lograr altas densidades. Esta acción de amasado se logra, principalmente, en rodillos tipo pata de cabra o de almohadillas que aplican las fuerzas alternadamente a baja o alta presión.

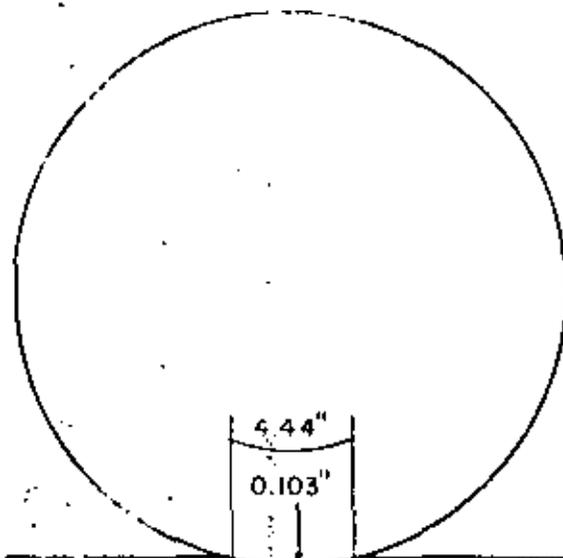
Actualmente, el mercado de equipo para compactación de terracerías ofrece planchas de llantas metálicas, aplanadoras de neumáticos de diversos tamaños, tambores pata de cabra, tractores con llantas metálicas segmentadas o de almohadillas, vibradores, etc.

Aunque se pueden emplear en terracerías, vamos a dejar fuera de esta plática a las planchas de llanta rígida y a las aplanadoras de neumáticos, debido a que en general su rendimiento es muy bajo para trabajos de alguna importancia. Las planchas metálicas de llantas en tandem o en triciclo, afectan un espesor muy pequeño y, en algunos materiales plásticos, tienden a encarpetar la superficie. Las aplanadoras de neumáticos, principalmente por la baja velocidad a que deben operarse, no son aplicables en trabajos de gran producción, como ya dijimos.

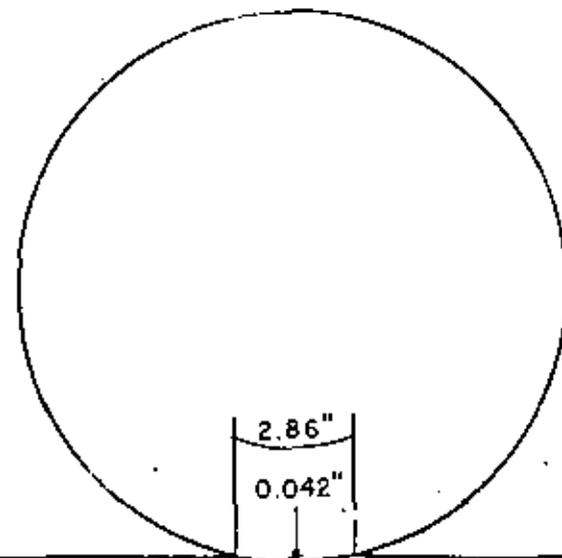
Esto nos deja, para escoger el equipo adecuado, un campo más reducido, -- como es el de los compactadores de impacto-amasado y los de vibración.

En la figura 9 se muestra la opinión de un fabricante de maquinaria pesada acerca de los campos de aplicación de los diversos tipos de compactadores en el mercado. Mi opinión al respecto es que en general están bien delimitados salvo en el caso de los vibradores y las rejillas a los que creo capaces

TAMBOR DE 48" Ø x 54" DE  
ANCHO CARGADO CON  
12,000 lbs.



TAMBOR DE 48" Ø x 84" DE  
ANCHO CARGADO CON  
12,000 lbs.



CAPACIDAD DE SOPORTE DE LA MEZCLA = 50 PSI.

ÁREA DEL TAMBOR EN CONTACTO  
CON EL MATERIAL.

$$12,000 \text{ lbs.} \div 50 \text{ PSI} = 240 \text{ pulg}^2$$

CIRCUNFERENCIA DEL TAMBOR EN CONTACTO

$$240 \text{ pulg}^2 \div 54 \text{ pulg.} = 4.44 \text{ pulg.}$$

EL TAMBOR DEBE INTRODUCIRSE EN EL  
MATERIAL 0.103 pulg. PARA OBTENER  
4.44 pulg. EN CONTACTO

ÁREA DEL TAMBOR EN CONTACTO  
CON EL MATERIAL.

$$12,000 \text{ lbs.} \div 50 \text{ PSI} = 240 \text{ pulg}^2$$

CIRCUNFERENCIA DEL TAMBOR EN CONTACTO

$$240 \text{ pulg}^2 \div 84 \text{ pulg.} = 2.86 \text{ pulg.}$$

EL TAMBOR DEBE INTRODUCIRSE EN EL  
MATERIAL 0.042 pulg. PARA OBTENER  
2.86 pulg. EN CONTACTO

Fig. 2.

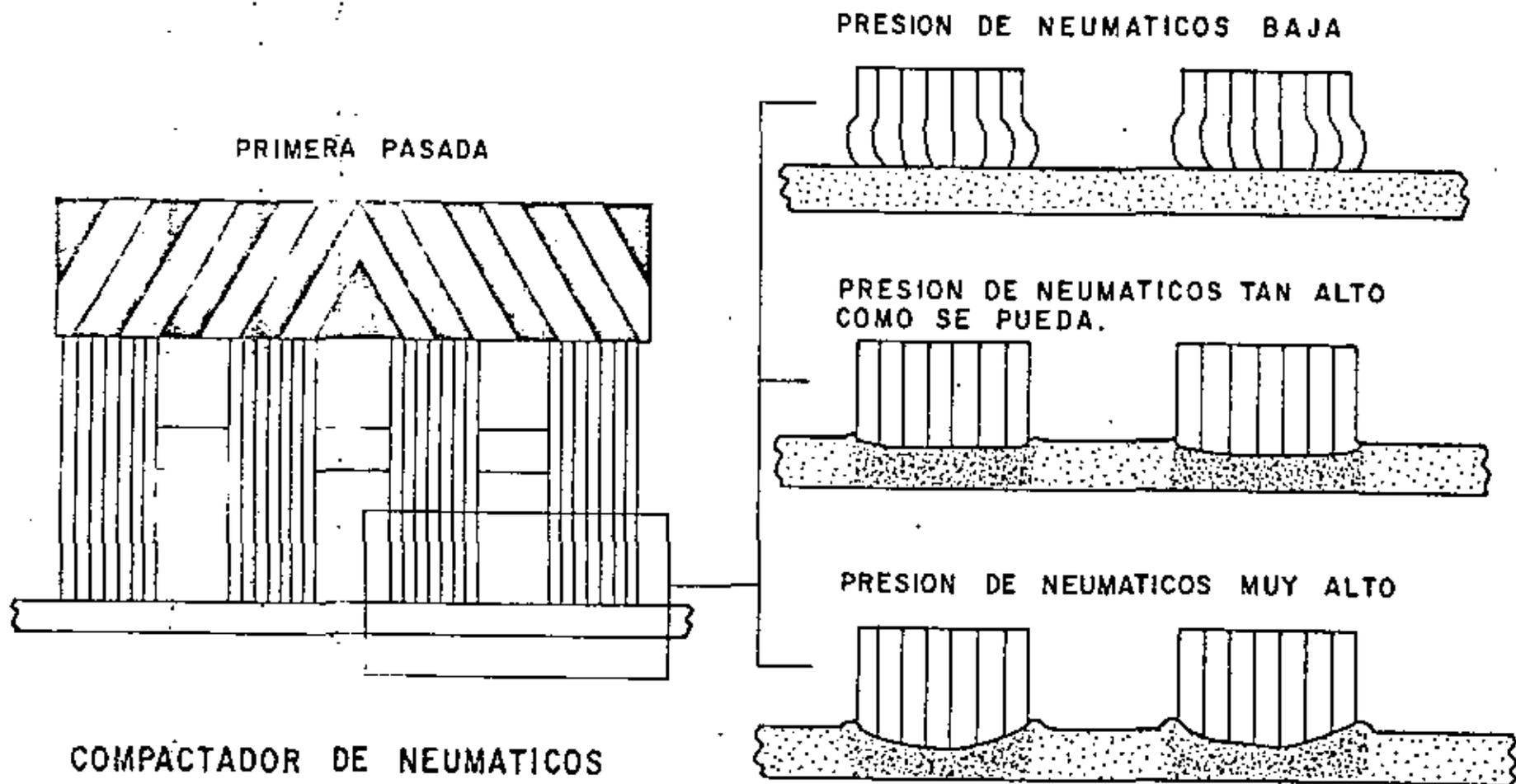


Fig. 3

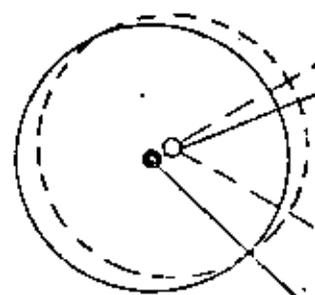
FRECUENCIA  
CICLOS x SEGUNDO

ALTURA

BAJA

ALTA

TIEMPO ( Y DISTANCIA SI EL RODILLO ESTA EN MOV.)



AMPLITUD  
FRACCION DE PULGADA o DE MILIMETRO

ALTURA

BAJA

ALTA

TIEMPO ( Y DISTANCIA SI EL RODILLO ESTA EN MOV.)

NOTA : EL MOVIMIENTO VERTICAL  
DEL TAMBOR ES EXAGERADA

Fig. 4.

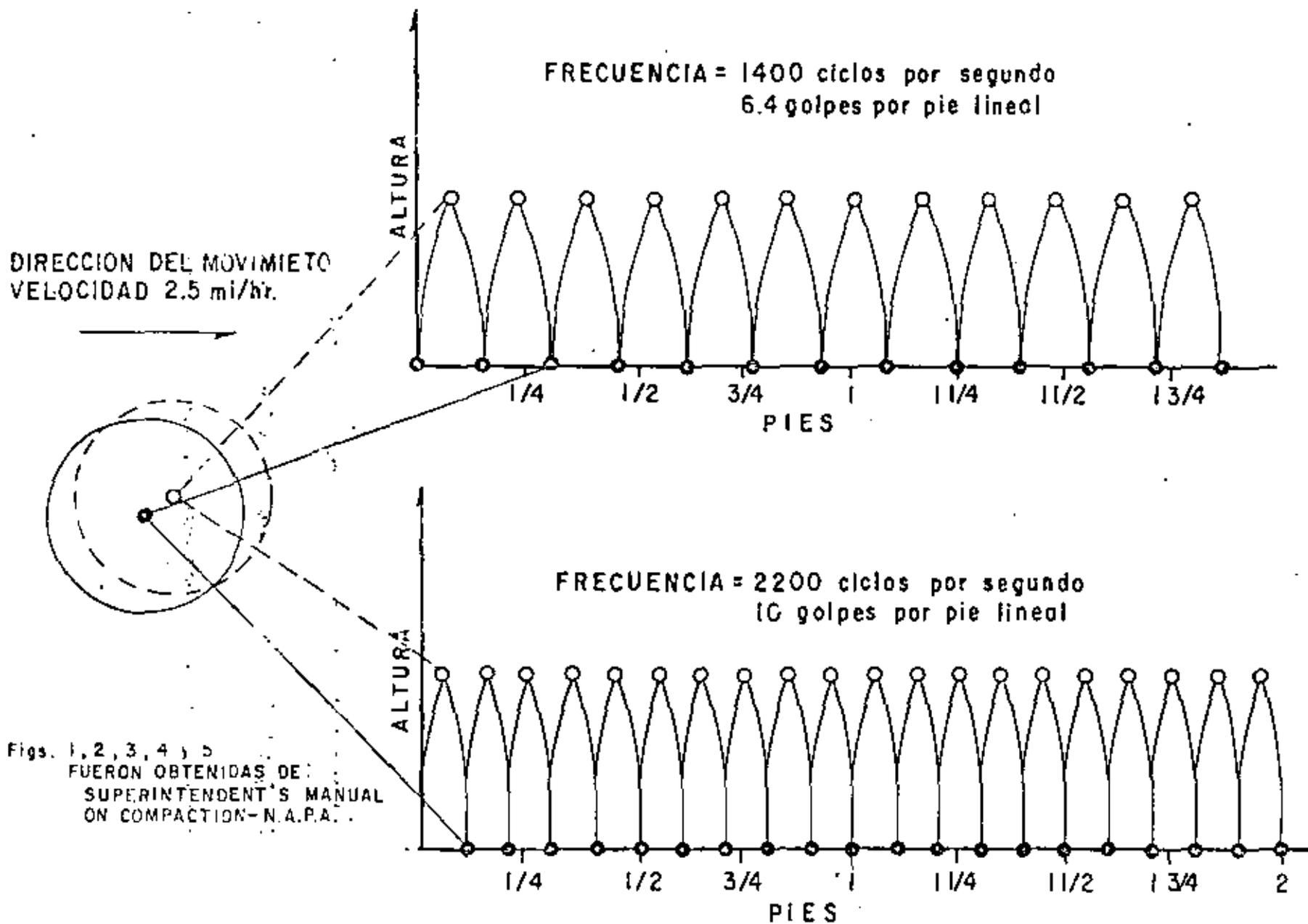
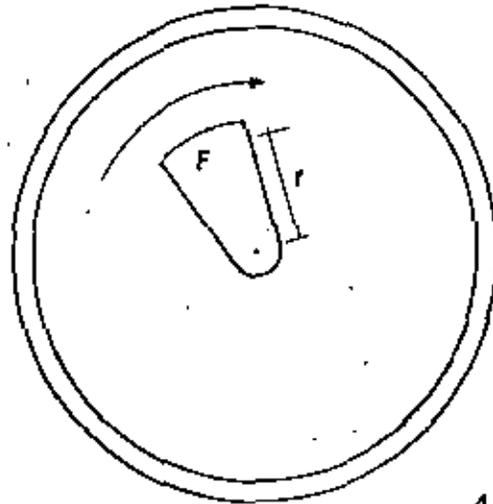


Fig. 5

## FUERZA CENTRIFUGA



FUERZA CENTRIFUGA,  $N(lb) = \frac{4\pi^2 f^2 Fr}{g}$

DONDE:

F = PESO DEL EXCENTRICO, N(lb)

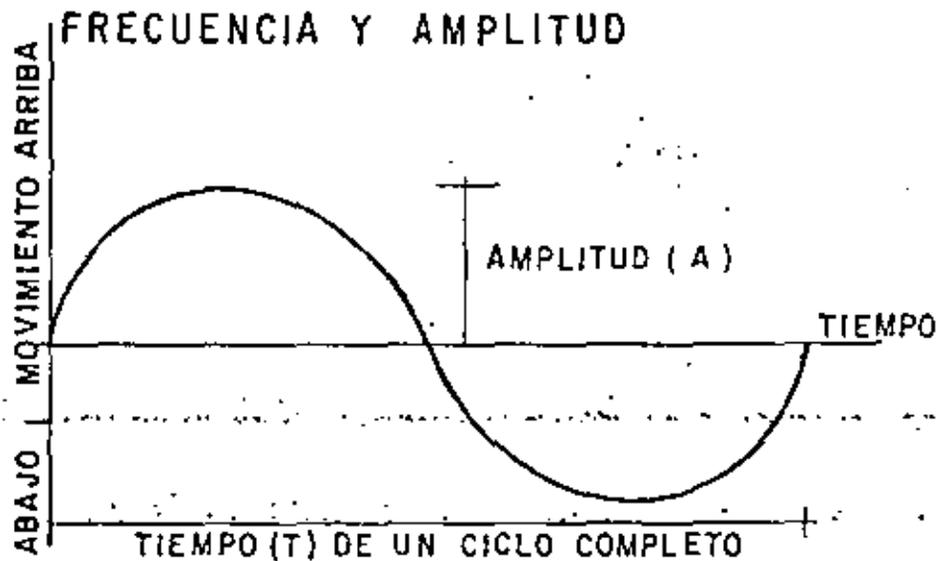
r = EXCENTRICIDAD, m(ft)

Fr = MOMENTO EXCENTRICO, Nm(lb-ft)

f = FRECUENCIA, Hz (ciclos/s)

g = ACELERACION DEBIDO A LA GRAVEDAD

9.81 m/s<sup>2</sup> (32.17 ft/s<sup>2</sup>)



FRECUENCIA = UN CICLO ES UNA SOLA ROTACION COMPLETA DEL PESO EXCENTRICO.

(f)

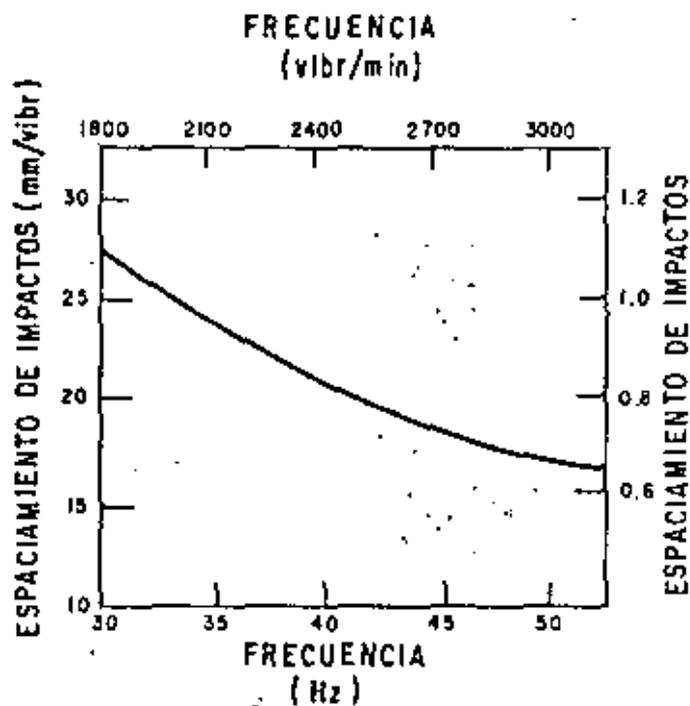
FRECUENCIA = + FRECUENCIA ES EL NUMERO DE HERTS (ciclos/s)

AMPLITUD = LA DESVIACION MAXIMA DESDE SU POSICION EN REPOSO, ES LA MITA DEL MOVIMIENTO TOTAL.

(A)

Fig. 6

EL ESPACIAMIENTO DE LOS IMPACTOS DECRECE CON EL INCREMENTO DE LA FRECUENCIA.  
(velocidad constante del rodillo)



EL ESPACIAMIENTO DE LOS IMPACTOS SE INCREMENTA CON EL INCREMENTO DE LA VELOCIDAD DEL RODILLO.  
(frecuencia de vibracion ctte)

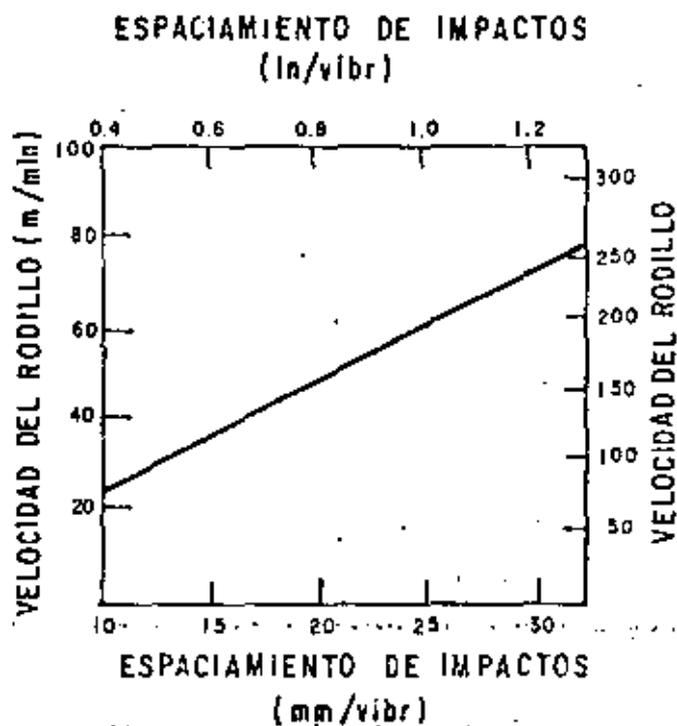
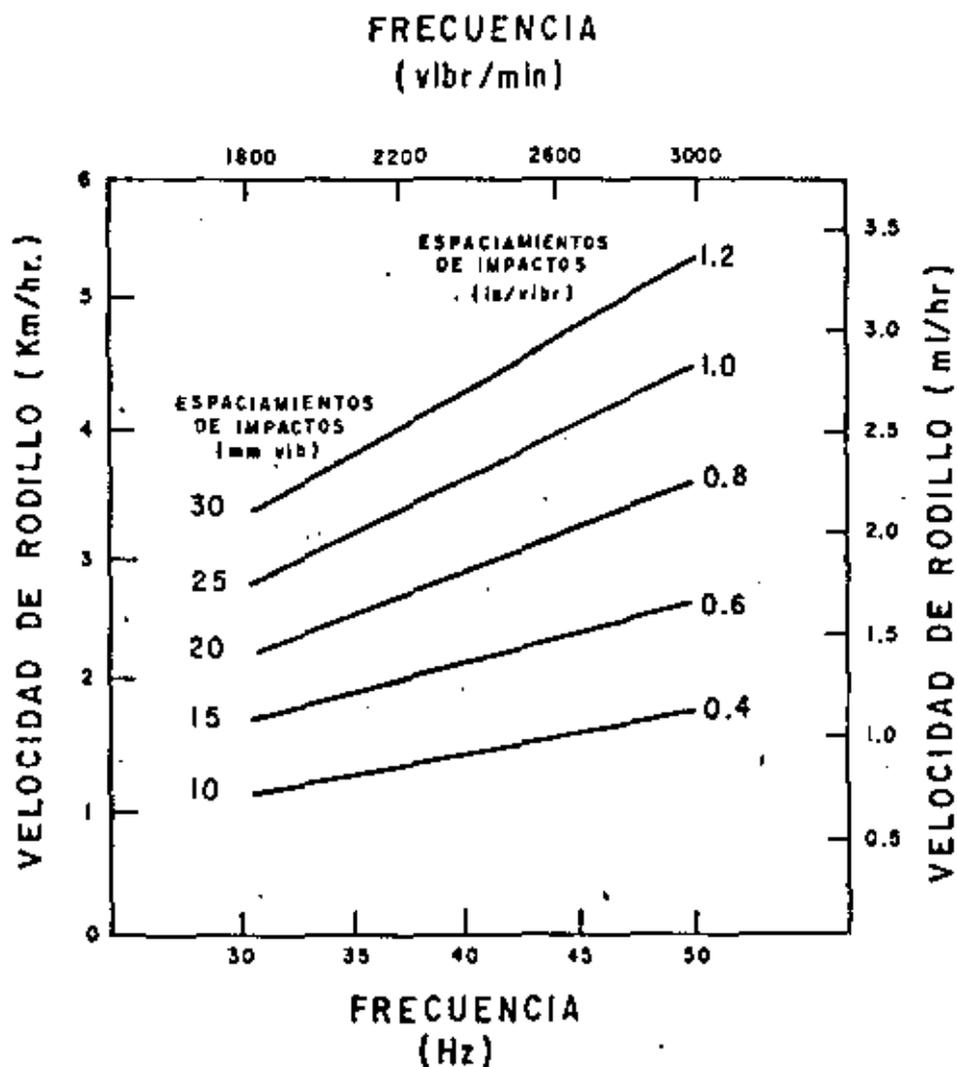


Fig. 7.



**VELOCIDADES DE RODILLO PARA VARIAS  
FRECUENCIAS Y ESPACIAMIENTOS DE  
IMPACTOS**

**Fig.8**

Figs. 6, 7 y 8 fueron ob-  
tenidas de:  
Asphalt Pavin Manual-The  
Asphalt Institute, Edition 3

de compactar materiales que están muy cerca de la zona arcillosa. En estos casos se debe pensar cuidadosamente en los factores producción/número de compactadores.

-Los compactadores de impacto-amasado dependen para efectuar un buen trabajo de su velocidad de translación. Entre más aprisa trabajen aplicarán sus patas o almohadillas, sean del dibujo que sean, amyor número de veces por minuto.

Estas máquinas son generalmente autopropulsadas logrando velocidades de 30 km/hr a 35 km/hr. Hemos logrado altas producciones en la compactación de materiales del tipo de arenas cementadas con el uso de compactador de rejillas con peso de 16 Ton, jalado por tractor sobre neumáticos de 250 a 300 HP a velocidades de 25 km/hr a 30 km/hr. Así, también, con el compactador de pisonos jalado con equipo similar en materiales más plásticos. Este tipo de equipo tiene la limitación de que necesita, para desarrollar esas velocidades una zona de tiro del equipo de acarreo muy extendida y de suficiente amplitud para darse vuelta sin perder demasiado su velocidad. Las llantas de los tractores pierden tracción y por lo tanto capacidad para desarrollar la velocidad convenientes, compactando materiales plásticos, se excede la cantidad de agua, por lo que los riegos deben aplicarse, como ya dije, por personas experimentadas.

Cuando la zona de tiro está muy confinada, digamos en el tipo de campos angostos de terracerías compensadas, hemos encontrado muy conveniente por su alta producción, los compactadores de pisonos autopropulsados, pues la alta velocidad que desarrollan junto con la habilidad para retroceder también a alta velocidad, gracias a su transmisión, le permiten trabajar sin estorbar al equipo de transporte de materiales y a las pipas del agua. La cuchilla de que están dotados también ayuda a eliminar en algunos casos equipo adicional de extendido.

También son muy útiles en los casos en que debemos disgregar los materiales previamente a su compactación. Cualquier tipo de equipo que desmenuce los materiales, esto es, que los disgregue completamente al compactarlos asegura una buena compactación pues la presencia de grumos en los materiales influye en el grado de compactación buscado. (Ver figura 10).

La compactación de suelos mediante vibración se ha popularizado debido a que los fabricantes están ofreciendo equipo autopropulsado muy maniobrable que además aplica una fuerza considerable. La frecuencia de vibrado de estas máquinas suele andar entre 1500 y 2400 r.p.m. La densidad del material se logra de abajo hacia arriba pudiéndose compactar capas gruesas, según el material. En suelos de tipo granular son muy eficientes los compactadores vibratorios de rodillos lisos; para materiales plásticos se emplea un rodillo pata de cabra o de pisonos, también vibratorio. Este tipo de compactador está dotado de tracción en el tambor que lo hace muy maniobrable en lugares de difícil acceso. Un fabricante Dynapac, ofrece tambores intercambiables dotando a la máquina básica de un rango muy amplio de aplicaciones.

Para tomar una decisión sobre adquisición de equipo es ineludible considerar estas máquinas, pesando cuidadosamente las ventajas que ofrecen y su aprovechamiento en un trabajo determinado.

Las consideraciones que solemos hacer para decidir que máquina compactadora conviene adquirir, se inician por la determinación de producciones espe-

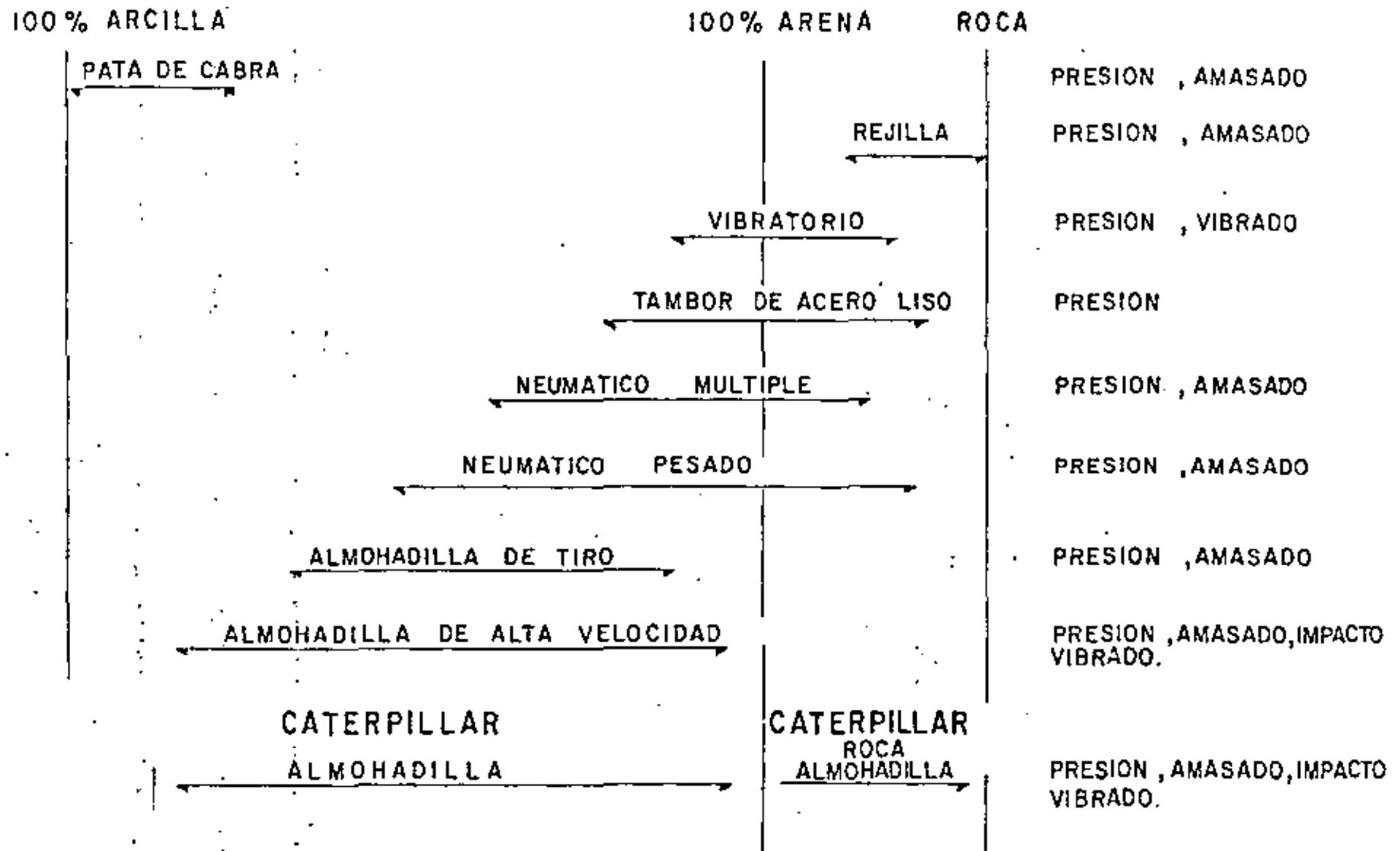


Fig. 9

radas para un trabajo determinado. Del plazo de ejecución depende el número de unidades de carga y acarreo de los materiales que debemos emplear; el número de ellas nos dará la producción diaria y horario, o sea, el volumen de terracerías que estamos obligados a compactar.

## COMPACTADOR DE IMPACTO

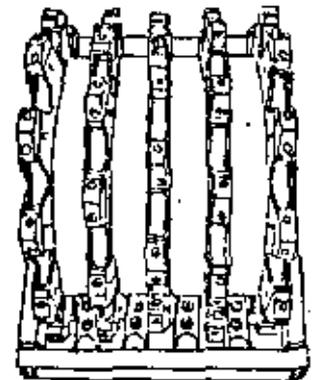
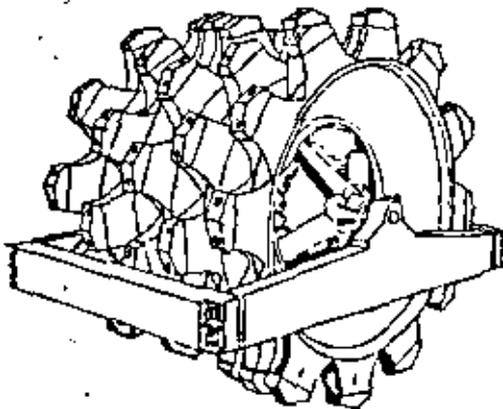


Fig. 10

Fig. 10

Catálogo Caterpillar  
del Compactador 815

Desde luego, contamos con la información de los materiales de qué se trata. Con estos datos iniciales determinamos que número de máquinas son capaces de desarrollar el trabajo y qué ayuda de equipo adicional es necesario; para esto es fundamental la experiencia y la observación detallada y prolongada del equipo en cuestión en donde éste se haya empleado. Con los precios de adquisición y otros datos de fabricante y del lugar donde se usarán, se calculan los costos horarios de cada tipo de máquina. El costo comparativo será el que nos indique la relación costo horario rendimiento esperado.

Algunos compactadores tienen, como herramienta auxiliar, una cuchilla - topadora para extender, acercar o retirar los materiales en el lugar en que se compactarán; por lo tanto, al efectuar la comparación de costo entre éste y otro que no disponga de cuchilla topadora, debemos agregarle el costo horario de otra máquina, (tractor o motoconformadora), que cumpla con la misma función.

Una de tantas formas de calcular el costo horario de una máquina es la que se muestra a continuación.

Precio de adquisición de la máquina y sus accesorios \_\_\_\_\_

Menos:

Costo total del repuesto de las llantas \_\_\_\_\_

Valor de rescate \_\_\_\_\_

Valor neto de depreciación \_\_\_\_\_

**VALOR DE TENENCIA**

1.- Depreciación:  $\frac{\text{Valor neto de depreciación}}{\text{Período de depreciación en horas}}$  = \_\_\_\_\_

2.- Intereses y seguro

Tasa anual: Intereses \_\_\_\_\_ %

Seguro \_\_\_\_\_ %

Uso anual supuesto \_\_\_\_\_ hr

$\frac{\text{Factor x precio de adquisición}}{\text{horas/año}}$  = \_\_\_\_\_

Costo de tenencia 1 + 2 = \_\_\_\_\_

**COSTO DE OPERACION**

3.- Combustible:

Consumo horario \_\_\_\_\_ lt x costo unitario \$ \_\_\_\_\_ = \_\_\_\_\_

4.- Lubricantes, grasas y filtros:

Motor: consumo horario \_\_\_\_\_ lt x costo unitario \$ \_\_\_\_\_ = \_\_\_\_\_

Transmisión: " " " " = \_\_\_\_\_

Mandos: " " " " = \_\_\_\_\_

Hidráulico: " " " " = \_\_\_\_\_

Grasa: " " " " = \_\_\_\_\_

Filtros: " " " " = \_\_\_\_\_

Lubricantes, filtros y grasas (subtotal) = \_\_\_\_\_

5.- Llantas:

$\frac{\text{Costo del repuesto de llantas}}{\text{horas de vida de las llantas}}$  = \_\_\_\_\_

6.- Reparaciones:

$\frac{\text{Factor de reparación x precio de adquisición menos llantas}}{\text{Periodo de depreciación}}$  = \_\_\_\_\_

7.- Conceptos especiales = \_\_\_\_\_

8.- Salarios de operación (horario) = \_\_\_\_\_

9.- Fletes y varios (horario) = \_\_\_\_\_

Costo de operación (3 a 9) = \_\_\_\_\_

COSTO DE LA HORA MAQUINA = \_\_\_\_\_

De la comparación de los costos probables que arrojan estos cálculos, al menor de ellos debe sujetársele a otras consideraciones. Una de ellas es su\_

transportabilidad, rápida y económica pues no debemos olvidar que se cambiará continuamente de lugar de trabajo. Otra, muy importante y en algunos casos decisiva, es la capacidad del fabricante a través de su representante de proporcionar servicio y refacciones. La disponibilidad de la máquina es vital para la ejecución de los trabajos económicamente y dentro de los plazos estipulados y para esto es fundamental contar con los repuestos de las piezas que se desgasten. Se afina aún más el cuadro general tomando en cuenta factores como inversión y financiamiento.

La decisión final es el resultado de las consideraciones que se han mencionado, aunque hay otra muy importante que es el número de máquinas que se deben adquirir, esto es, una sola capaz de ejecutar el trabajo programado o bien dos o más que juntas produzcan lo mismo. Tomando en cuenta la cuantía de los trabajos que usualmente se ofrecen en la construcción de caminos, vale la pena pensar en la flexibilidad que proporciona el contar con máquinas más chicas que separadas nos pueden permitir la posibilidad de llevar a cabo en el futuro trabajos diferentes más pequeños, económicamente.



centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de Ingeniería, unam



CURSO: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS

TEMA: TRANSPORTACION, COLOCACION Y COMPACTACION  
DE MEZCLAS ASFALTICAS

ING. ROBERTO PASQUEL LUJAN



## "TRANSPORTACION, COLOCACION Y COMPACTACION DE LA MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE".

Durante esta plática analizaremos la transportación, colocación y compactación de la mezcla asfáltica producida en planta, sin perder de vista que estas etapas son parte de un todo que abarca desde la obtención de los componentes de la mezcla hasta la entrega final del trabajo, y que el funcionamiento económico de cualquiera de ellas depende de una administración general eficiente.

El ciclo de la transportación se inicia en la planta asfáltica, con la carga de la mezcla y con una duración que depende de:

1. La capacidad de la planta.
2. El grado de humedad de los materiales pétreos.
3. El tiempo de mezclado.
4. La capacidad de la unidad de transporte.

Puede haber otros factores que influyan en el tiempo de carga de los camiones, como fallas en el suministro de algún material a la planta, pero no los consideraremos en esta discusión. Por lo general, para un trabajo determinado, el tiempo de carga es constante; la única forma de disminuir ese tiempo, en tales condiciones, es mediante el uso de silos para almacenar la mezcla.

El empleo de sistemas para el almacenamiento de la mezcla asfáltica mejora la eficiencia de la transportación, puesto que, disminuyendo el tiempo de carga reduce el número de camiones necesarios para una producción determinada. También mejora la producción diaria de la planta al no estar sujeta, para su operación continua, a la disponibilidad de camiones.

El tiempo de descarga de la mezcla en la extendidora es constante, de aproximadamente dos minutos; puede abatirse este tiempo, aunque muy poco, mediante el uso de un dispositivo dentro del cual descarga el camión y, al avanzar éste, forma un camellón frente a la extendidora.

En lo que más influye el acamellonador es en abrir el tiempo de espera para descarga de los camiones, cuando se juntan dos o más, frente a la extendidora. Más adelante veremos la influencia de este dispositivo en la calidad de la carpeta terminada.

Completa el ciclo de transportación de la mezcla, el acarreo de la planta a la extendidora; esto es, el viaje del camión cargado y su retorno vacío. Este elemento del ciclo siempre es variable y depende de muchos factores, entre ellos:

1. La velocidad máxima permitida.
2. La densidad de tránsito.
3. Obstáculos, semáforos, desviaciones, etc.
4. El grado de las pendientes y el estado del camino.

Tenemos ya los tiempos que intervienen en el cálculo del ciclo y que determinan el número de camiones que vamos a emplear. La experiencia nos obliga a considerar otro factor: los tiempos de espera o demoras, pues tienen una muy significativa influencia en la eficiencia global del trabajo.

Las demoras pueden ser: internas, o sea aquellas que ocurren, dentro del sistema global de la producción, ocasionando que alguna unidad tenga que esperar a otra para completar su ciclo, y externas: aquellas que son provocadas por causas ajenas al sistema de producción.

Son las demoras, internas y externas, las responsables de que el ciclo de transportación sea tan variable, además, si no es por la experiencia de muchos trabajos, no hay forma de suponer su duración. El objetivo, por lo tanto, debe ser la minimización de las demoras internas mediante, como dijimos antes, de la administración eficiente del sistema.

Consideremos ahora la capacidad que deben tener los camiones. Se ha demostrado, mediante observaciones en diferentes trabajos (Systems Analysis of Storage, Hauling and Discharge of Hot Asphalt Paving Mixtures, NAPA-Texas A & M University), que:

1. La mayor economía se logra usando, para la transportación de la mezcla, las unidades de mayor capacidad que sea posible, desde plantas también de gran capacidad (600 Ton/hr). Aún en plantas de 200 - - Ton/hr se observaron los mayores rendimientos en los camiones grandes. Los camiones comparados fueron de 7.5 Ton, 15 Ton y 22.5 Ton. (toneladas de 2000 lb). Las distancias de los acarreos fueron de 1.0, 7.5 y 22.5 millas.

2. La relación: peso de la unidad/H.P., es determinante; al camión más eficiente, le corresponde el menor valor.
3. Se logra la mayor eficiencia y por lo tanto la máxima economía, manteniendo en equilibrio las producciones de la planta y de la extendedora con el número adecuado de camiones.

Para nuestro medio, estamos obligados a considerar algunas limitaciones en cuanto a la capacidad de los camiones. Los muy grandes necesitan también áreas grandes para efectuar las maniobras que requiere el trabajo, tales como: vueltas, retrocesos, acomodados, etc.; el ancho promedio de los caminos nacionales no permite el aprovechamiento eficiente de este tipo de unidades.

Con lo que hemos visto hasta ahora, podemos determinar tanto el número de unidades de acarreo, como decidir sobre la capacidad más conveniente de los camiones que necesitamos.

Lo anterior debemos aplicarlo aún cuando se alquilen camiones para efectuar el trabajo porque, como ya vimos, la eficiencia del sistema es muy sensible a estos factores.

Con camiones propios o alquilados, conviene que el personal que los opera obedezca algunas reglas o recomendaciones.

1. Ante todo, deben obedecer las indicaciones del personal que administra, tanto la planta como la extendedora; es en ésta, o sea en la descarga de la mezcla, donde el chofer contribuye a que se obtenga una buena calidad.
2. Para evitar fallas y demoras, deben conservar sus camiones en perfectas condiciones mecánicas, tanto por el costo de la carga como por la temperatura que debe tener la mezcla al extenderse.
3. Se acostumbra, después de limpiar la caja, embarrarle un poco de diesel para que la mezcla no se pegue y fluya mejor; después de hacerlo se levanta la caja para que escurra el excedente.

Al analizar la operación de extendido veremos otras recomendaciones, para el personal, con más detalle.

El extendido de la mezcla asfáltica se lleva a cabo con una máquina extendedora-pavimentadora. Consiste ésta de dos partes principales: una es la parte tractiva y la otra es una plancha flotante. La unidad tractiva proporciona la fuerza motriz a través de bandas de orugas o de neumáticos que ruedan sobre la base; ésta unidad incluye: la tolva receptora, los tornillos distribuidores de la mezcla al motor, transmisiones, dos centros de control y el sitio para el operador. La plancha maestra es jalada por la unidad tracti

va y consiste de: la placa maestra, vibradores o barra compactadora, controles para variar el espesor de tendido, controles para variar la pendiente transversal y los calentadores de la placa. A cada lado de la plancha maestra tiene un largo brazo que la conectan con la unidad tractiva con un centro pivote cada uno en el punto de unión. Este mecanismo le permite, a la plancha maestra, flotar sobre la mezcla mientras se tiende. La plancha, al recibir la mezcla que reparten los tornillos, la extiende y le aplica una compactación inicial mediante una barra o de vibradores. Al avanzar la unidad de tracción, jala la plancha hacia la mezcla haciendo que la superficie inferior viaje en una dirección paralela al avance de la máquina. La plancha mantendrá este nivel hasta que se cambie el ajuste de los controles correspondientes. La plancha niveladora maestra continuamente mantiene en equilibrio las fuerzas que actúan sobre ella, por lo que es importante mantener un ajuste adecuado en los mecanismos que le envían la mezcla:

1. Los transportadores de la tolva a los tornillos deben trabajar uniformemente.
2. Las compuertas que regulan el flujo de mezcla deben ajustarse convenientemente.
3. Se debe conservar un nivel de mezcla uniforme frente a la plancha para que los tornillos lleven la cantidad justa de mezcla. La regla práctica para esto es que el tornillo esté cubierto de mezcla hasta las dos terceras partes de su altura.
4. No deben moverse excesivamente los controles del espesor.

La operación de extendido propiamente se inicia con la colocación en su lugar de la extendedora sobre tacones de madera, de altura igual al espesor suelto que se va a extender; se coloca la plancha maestra y se ajustan los controles para que se mantenga ese nivel. Al avanzar la máquina se revisa el espesor mediante un escantillón. Esta revisión se hace continuamente para modificar la posición de la plancha, si acaso el espesor es mayor o menor que el deseado. Sin embargo, se debe considerar que al girar el control para corregir el espesor, el resultado se logra al haber avanzado la plancha de 20 a 30 metros. Estos controles solamente los debe mover o mandar el sobrestante o cabo del extendido, pues la uniformidad de la superficie terminada es efectuada, como ya se dijo, por el abuso del ajuste continuo de los controles.

Desde hace algunos años se emplean sistemas eléctricos o electrónicos para conservar o mantener la plancha maestra en un nivel de rasante determinado. Su empleo ofrece muchas ventajas en cuanto a la uniformidad de la superficie de rodamiento. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que este sistema, al mantener un nivel fijo, obliga a emplear mayor cantidad de mezcla, dependiendo de la uniformidad de la superficie de la base sobre la que se está extendiendo. Esto se debe a que, por lo general, se solicita un espesor mínimo y al

respetarse éste, la extendedora llena las depresiones que existan en la base. - Para la cuantificación de la cantidad de mezcla que se empleó en un trabajo, - lo mejor es llevar la cuenta del número de pesadas en el caso de plantas de pe - sadas, o pesar los camiones en el caso de plantas continuas, para que, conociendo el peso total de la mezcla empleada sea fácil su conversión a unidades de - volumen para su pago.

Usando un sistema u otro para el extendido, conviene seguir algunas recomendaciones generales:

- 1.- Observar continuamente, para su corrección inmediata, si existen segregaciones en los materiales.
- 2.- Observar también el aspecto de la mezcla para detectar posibles cambios en la cantidad de asfalto en ella. El color de la mezcla debe ser uniforme.
- 3.- Se debe llevar un registro de las temperaturas a que llega la mezcla, de cada uno de los camiones, revisando que esté dentro de los límites especificados.

La calidad de un trabajo, en que se empleó carpeta de mezcla asfáltica -- elaborada en planta, lo califica el usuario; generalmente, lo hace por la frecuencia con que se siente o escucha golpes de las llantas de su coche con cada borde transversal. Estos bordes (que pueden estar dentro de tolerancia), se pueden y deben evitar. Para hacerlo, se deben eliminar interrupciones en la llegada de los camiones, pues la espera de la extendedora enfría la mezcla que queda bajo su plancha maestra, obstruyendo la uniformidad del extendido. Además, como ya vimos, tampoco se deben poner camiones en exceso; por lo que, lo mejor es trabajar la extendedora a una velocidad ligeramente mayor que la capacidad de la planta convertida en metros/minuto. Por ejemplo, una planta de 90 toneladas/hora de capacidad establecería la velocidad de la extendedora; suponiendo 5 cm de espesor, 3.60 m de anchura de extendido y el peso de la mezcla de 2.3 Ton/m<sup>3</sup>.

El peso de un metro de carpeta es:

$$3.60 \text{ m} \times 0.05 \text{ m} \times 1.0 \text{ m} \times 2.3 \text{ Ton/m}^3 = 0.414 \text{ Ton/m.}$$

La planta produce 1.4 Ton/minuto.

La velocidad de extendido debe ser un poco mayor de:

$$\frac{1.5 \text{ Ton/min}}{0.414 \text{ Ton/min}} = 3.6 \text{ m/min}$$

Esta velocidad le permite trabajar continuamente a la extendedora, evitándose los bordillos.

La mejor forma de controlar la continuidad del extendido, es mediante el empleo de un acamellonador y de un levantador de mezcla. El acamellonador es un mecanismo que, mediante ganchos, se pega al camión de volteo. Es una caja de lámina de acero con una puerta ajustable en la que vierte su carga el camión. Al avanzar éste, la puerta (previamente ajustada para que deje pasar la cantidad de mezcla que exactamente vamos a usar), va formando un camellón frente a la extendedora. Frente a ésta se instala un levantador de espas o cangilones que coge la mezcla del camellón y la deposita en la tolva de la extendedora. Las demás operaciones se llevan a cabo de igual forma.

Cuando se emplea el sistema de descarga directa de los camiones en la tolva de la extendedora, adquiere mucha importancia la disciplina de los choferes y la experiencia del checador o acomodador, a quién siempre deben obedecer aquellos. Se evitan defectos en el extendido observando estas recomendaciones:

- 1.- El camión debe detenerse antes de tocar a la extendedora.
- 2.- Es ésta la que, al avanzar, hace contacto con las llantas del camión, (ambas rodadas a la vez).
- 3.- A una señal del acomodador, el chofer levanta la caja justamente a la altura que se señale.
- 4.- La transmisión del camión debe estar en neutral y el pie del chofer oprimiendo muy ligeramente el freno para evitar que se separen las llantas de los rodillos empujadores; la extendedora siempre empujará al camión.
- 5.- Solamente en casos de subidas en que la extendedora necesite ayuda, el camión usará tracción propia, cuidadosamente.
- 6.- Terminada la descarga, a una señal del acomodador, debe retirarse inmediatamente el camión.

El personal experimentado y la disciplina de todos los que intervienen en el manejo del sistema, son factores principales en la entrega de una carpeta de óptima calidad.

La única alternativa, para seleccionar el equipo de extendido, es entre el tipo de tracción mediante orugas o mediante neumáticos, pues como ya vimos, en cuanto a su capacidad, está determinada por el tamaño de la planta. Ambos sistemas ofrecen ventajas; la decisión, yo creo, están en la rapidez de movi-

lidad que se necesite, no para un trabajo en sí, sino para la actividad a que se vaya a dedicar el equipo en un plazo largo. En cuanto al fabricante, todos ofrecen un producto de buena calidad; en este caso es determinante la capacidad de sus representantes para resolver problemas de suministro de refacciones y servicio de mantenimiento.

La compactación de mezclas asfálticas se logra fácilmente cuando se lleve a cabo a la temperatura adecuada, ésta debe iniciarse tan pronto como sea posible después de extendida la mezcla. El espesor de la carpeta influye en el grado de dificultad que encontremos para compactarla; entre más delgado sea el espesor, más pronto pierde temperatura y por lo tanto el rodillado debe efectuarse inmediatamente después del extendido. En cambio, si el espesor es de 7 cm o más, la pérdida de temperatura es más tardada, proporcionando mayor tiempo para compactar. También en el número de máquinas que se requieren para compactar la mezcla, interviene el espesor de la carpeta pues, entre más delgado sea éste, mayor es el avance longitudinal de la extendidora. Como la velocidad de los compactadores es limitada, necesariamente hacen falta en mayor número.

El equipo que tradicionalmente se emplea para la compactación de la mezcla es:

- 1.- La plancha metálica de tres llantas lastrables, con peso de 10 a 14 toneladas.
- 2.- El compactador autopropulsado de nueve u once llantas neumáticas de peso variable. Algunos fabricantes ofrecen de hasta 30 toneladas.
- 3.- Planchas de dos y de tres ejes en tandem, su peso varía de 6 a 20 toneladas según el tamaño que se escoja.

Para cualquier trabajo, es conveniente que cuando menos se usen dos máquinas compactadoras.

La operación de compactación se puede dividir en tres fases:

- 1.- El planchado inicial. Se puede usar para esta fase la plancha de dos ejes en tandem, pero da mejores resultados la de tres llantas, manejado con las ruedas motrices hacia adelante, o sea, en el sentido del avance de la extendidora. El mayor peso en las llantas motrices y su gran diámetro incrustan la mezcla hacia abajo sin desplazarla. Durante esta fase se debe lograr casi totalmente la compactación. Se aplica el patrón de planchado más conveniente, según el ancho del equipo disponible procurando siempre cubrir la superficie extendida lo más uniformemente posible.

- 2.- El planchado intermedio. Esta segunda fase se efectúa lo más cerca-  
namente que sea posible a la primera, mientras la mezcla asfáltica -  
mantiene algo de su plasticidad y temperatura. Aquí se emplean las  
aplanadoras autopropulsadas de neumáticos, pues proporcionan la com-  
pactación muy uniformemente; tienen la tendencia a "cerrar" la super-  
ficie y, por lo tanto, contribuyen a la impermeabilidad de la carpe-  
ta y acomodan las partículas de los agregados por lo que aumentan la  
estabilidad. En realidad, esta fase no incrementa notablemente la -  
densidad lograda por la plancha metálica, pero aporta seguridad con-  
tra deformaciones bajo condiciones severas de tránsito.
- 3.- El planchado final. Su única finalidad consiste en borrar las hue-  
llas del equipo que trabajó en las fases uno y dos. En ésta se em-  
plean planchas de ejes en tandem.

Hace algunos años se empezó a aplicar, para compactar mezclas asfálticas,  
el equipo autopropulsado vibratorio, sobre todo el que está dotado de algún -  
mecanismo que disminuye la amplitud de la vibración para reducir la fuerza --  
aplicada sin variar la frecuencia. Esto proporciona la posibilidad de efec-  
tuar las tres fases de compactación en una sola. Cada mezcla es, en algo, --  
única y diferente a las demás, por lo que es necesario determinar en cada ca-  
so la forma o patrón de compactación, mediante vibradores. Estos pueden ser  
de un tambor liso metálico propulsado por llantas neumáticas o de dos tambores  
o rodillos con tracción en ambos.

Nosotros hemos empleado compactadores vibratorios Dynapac CA25A para com-  
pactar mezclas asfálticas, obteniendo resultados que consideramos satisfacto-  
rios, porque hemos logrado, en casi todos los casos, sustituir dos o más má-  
quinas con un solo vibrador. La secuela de compactación que generalmente em-  
pleamos es la siguiente:

- 1.- Una pasada, a todo lo ancho, sin vibración. Esta se efectúa inmedia-  
tamente después del extendido en carpetas delgadas de hasta 5 cm. -  
En carpetas más gruesas hay que esperar un poco, sin que se pueda es-  
tablecer una receta, tal vez 60 metros atrás de la extendidora.
- 2.- Inmediatamente después, se inicia la vibración de 2400 r.p.m. en ba-  
ja amplitud. Aquí es muy importante determinar la velocidad lineal -  
del compactador. Debe ser tal que no provoque grietas ni bordes, o -  
sea, ni tan despacio que estemos aplicando demasiados golpes muy cer-  
canos unos a otros, ni tan de prisa que espaciemos demasiado la apli-  
cación de la fuerza provocando grietas. También ésta es una determi-  
nación práctica, producto de varias pruebas que hacemos al iniciar -  
un trabajo. Por lo general, es suficiente con dos pasadas a todo lo  
ancho y otra en alta amplitud para obtener el grado de compactación -  
deseado.

- 3.- Si acaso es necesario, se retrasa el compactador para borrar alguna huella y dar el acabado final. En algunos trabajos nos hemos visto precisados a emplear, para esta fase final, un compactador de neumáticos, autopulsados de 9 llantas.

La compactación por vibración puede ser efectiva aun estando la mezcla a una temperatura tan baja que sería inoperante el equipo de tipo estático, lo que permite emplear durante más tiempo el equipo y, por lo tanto, usar menos máquinas.

En cuanto a la elección del equipo, es muy conveniente, antes de tomar una decisión, observar detenidamente los compactadores vibratorios porque, tomando en cuenta la administración eficiente del conjunto, la máxima economía se logra, generalmente, empleando el menor número posible de máquinas; naturalmente, teniendo a la vista el resultado final que es la construcción de carpetas de alta calidad.





centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



CURSO: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS

TEMA: PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCION DE  
PAVIMENTOS RIGIDOS

ING. LUDWIG LINDNER STRAUSS



## CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS, PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCION DE LOSAS DE CONCRETO HIDRAULICO.

### I COMENTARIOS.

La utilización del concreto hidráulico para pavimentos está muy extendido en todas las ramas de la construcción, ya sea caminos, aeropuertos, fábricas, obras portuarias, obras hidráulicas, urbanizaciones, etc.

Continuamente se están requiriendo mayores volúmenes de pavimentos de concreto hidráulico ante todo en áreas expuestas a excesivo desgaste por tránsito intenso y pesado o materiales corrosivos.

El pavimento de concreto hidráulico puede soportar excelentemente todas las condiciones de tráfico intenso pesado, materiales químicos corrosivos y dañinos en relación a otros tipos de pavimentos, sin afectar su calidad y durabilidad. Sin embargo como el concreto hidráulico es de sencillo manejo, muchos constructores abusan de los procedimientos de colocación inadecuado, obteniendo como resultado pavimentos de mala calidad y de poca durabilidad.

Si observamos las normas que establecen las especificaciones para la fabricación y colocación del concreto hidráulico en pavimentos seguramente obtendremos resultados en economía y calidad tanto a corto como a largo plazo.

Un pavimento de concreto hidráulico que se ha construido respetando y cumpliendo con las especificaciones, prácticamente no tendrá costos adicionales de conservación o mantenimiento durante su vida de proyecto.

En los siguientes capítulos vamos a tratar de establecer algunos métodos adecuados de trabajo para la pavimentación de losas de concreto hidráulico que cumplen con las normas de especificaciones en fabricación y colocación para obtener resultados óptimos en calidad, costo y duración máxima.

## II TRABAJOS PREVIOS.

### 1 Preparación sub-base.

Los niveles de la Sub-base deberán estar dentro de las tolerancias que marcan las especificaciones, por lo que habrá que tener especial cuidado en la ejecución de ésta etapa de trabajo. Una falla en los niveles puede causar serios trastornos al avance del trabajo para la etapa de colocación del pavimento de concreto hidráulico que siempre se traducen en costos adicionales no recuperables para el constructor. Si los niveles quedan bajos habrá que rellenar la depresión con material de base dándole el tratamiento adecuado para nivelar y llegar a niveles de proyecto. En el caso que los niveles estén altos habrá que recortar la sub-base y tratar de llegar a los niveles de proyecto. Es difícil recortar uno o más centímetros, que se requieren para la nivelación, y siempre se recorta más volumen debido a las características del material de sub-base que normalmente contiene agregados de tamaño de 2". Como resultado cuando fallan los niveles de la sub-base generalmente se sustituye el volumen faltante con concreto hidráulico, esto en costos es del orden de 10 veces superior al de sub-base hidráulica. Para evitar estos costos adicionales se hacen las siguientes recomendaciones:

1.1 Deberá ajustarse a los reglamentos y especificaciones de sub-base para pavimentos.

Antes de iniciar el trabajo de colocación de losas de concreto deberán hacerse los ajustes en niveles de la sub-base ya sea recorte o adicionar material, reconstruir zonas defectuosas para quedar dentro de especificaciones.

En el caso de usar equipos de tendido con formas deslizante deberán dejarse el ancho de la sub-base 80 cm mayor a cada lado al ancho de proyecto del pavimento.

1.2 Cuando se use formas de cimbra fija en la operación de pavimentación, el ajuste de los niveles de la sub-base puede hacerse montando el equipo de recorte sobre las formas que han sido alineadas y niveladas previamente o hacerlo manualmente. En caso de usar equipo de nivel automático guiado sobre un cable previamente nivelado puede caminarsse sobre la sub-base.

Para ajustar niveles finales en sub-base de suelo cemento tendrá que hacerse la operación de afinado antes que se produzca el endurecimiento inicial o sea 3 ó 4 horas de colocado.

1.3 Como operación final deberán volverse a checar los niveles de proyecto, así como las compactaciones en zonas que se vieron afectadas por recortes o rellenos.

En caso de estar especificando un material impermeable sobre la sub-base, deberá colocarse éste material para su protección.

1.4 En caso de permitir el tráfico sobre la sub-base recibida, habrá que hacerlo con mucha precaución para no dañarla, si se altera la superficie de la sub-base habrá que compactarla antes de proceder a colocar el concreto del pavimento.

## 2. Formas Estacionarias (Cimbras).

2.1 Las formas deberán construirse fuertes y lo suficientemente rígidas para poder soportar la carga de los equipos de tendido, vibrado y acabado.

2.2 Se recomienda las siguientes especificaciones:

Normalmente las formas son de 3 m de largo, la base debe ser 0.75m de altura, pero nunca menor de 20 cms, la lámina que se usará variará de 1/4" a 5/16" dependiendo de la carga que van a soportar. Para decidir el espesor de la lámina se apoya la forma en sus extremos con viga libre y se aplica una carga equivalente al peso del equipo que va a soportar, la deformación máxima que puede admitirse es de 0.64 m (1/4").

La forma deberá estar provista de aditamentos que permitan su rápida alineación y colocación para quedar perfectamente unidas entre sí y un sistema de fijación a la sub-base, de no menos de 3 pijas por forma.

2.3 La forma colocada deberá resistir sin vibración, no tocarse, no tener efectos de resorte o asentarse al paso del equipo de colocación de concreto.

2.4 Las formas de 3 m. deberán cumplir con los siguientes requisitos de alineamiento. Por alineamiento vertical deberán estar dentro de 0.32 centímetros (1/8") y para el horizontal de 0.64 m (1/4").

2.5 Es importante que la sub-base sobre la que se colocarán las formas de cimbra esté perfectamente compactada y nivelada a manera que la forma apoye en toda su base y longitud uniformemente. El nivel y el alineamiento deberán ser checados por la cuadrilla de topografía y cual --

quier falla deberá ser corregida de inmediato, una vez rectificada su buena colocación se procederá a fijar la forma mediante pijas lo suficientemente largas y fuertes que aseguren que queden sólidamente fijadas a la sub-base y alineadas libre de todo movimiento en cualquier dirección.

2.6 Las formas no deberán estar desviadas más de 0.60 m (1/4") de su línea de proyectos en cualquier punto.

2.7 Las formas deberán estar perfectamente limpias antes de proceder a iniciar el colocado.

2.8 Si la operación de nivelar y alinear las formas afectó a la sub-base aflojándose, deberá procederse a recompactar ésta.

La preparación de la sub-base deberá estar lo suficientemente adelantada para que no interfieran las operaciones de ésta con el colado de losas.

### 3. Materiales.

3.1 Es necesario hacer una revisión cuidadosa de la existencia y calidad de los materiales, deberán tenerse en suficiente cantidad para no sufrir interrupciones en el proceso del colado, debido al suministro -- por falla en producción, lluvias, crecientes en ríos y otras eventualidades.

### 4. Laboratorio.

Es indispensable contar con un laboratorio con instalaciones suficientes para controlar la calidad de los materiales y concretos colados. Esto, permite hacer los ajustes a los concretos en caso de requerirlo y tener certeza de cumplir con las especificaciones.

### 5. Equipo.

Deberá verificarse que el equipo de colado, tendido, compactado, acabado, aserrado, curado y alumbrado, esté en perfectas condiciones de trabajo para garantizar jornadas completas sin interrupciones.

### 6. Personal.

Se establecerán los turnos de trabajo y se integran las cuadrillas necesarias para cada turno, checar que estén equipadas con las herramientas de

trabajo para que puedan desempeñar eficientemente su trabajo. Para dar los niveles y el alineamiento de las formas deberá contarse con una cuadrilla de topografía.

### III DESCRIPCION DEL EQUIPO PARA FABRICACION Y COLOCACION DEL CONCRETO.

Descripción breve de las diferentes equipos que intervienen en la fabricación y Colocación de Concretos Hidráulicos en Pavimentos:

#### 1. Equipo de Fabricación.

Para la fabricación del concreto hidráulico es recomendable usar Plantas de concreto integradas con Silo para cemento, compartimientos separados para cada tamaño de agregado. En caso de usar cemento envasado, deberá disponerse de bodegas para almacenarlo en cantidades suficientes para garantizar una producción de concreto continua sin interrupciones.

Además deberá tener un sistema de alimentación para cemento envasado. Es indispensable el equipo de dosificación que incluye tolvas pesadoras, básculas y controles de dosificación. El cemento deberá pesarse en tolva separada y no en forma acumulativa con los agregados. Además dispondrá de dispositivos con controles electrónicos.

Es necesario contar con un Sistema de Alimentación de Agua, base de hidrómetro para su exacta dosificación.

El tamaño de las básculas deberá ser el adecuado para hacer la pesada de una revoltura completa en una sola operación.

El equipo de pesado deberá ser capaz de efectuar mediciones precisas y uniformes de todos los materiales dosificados en la Planta. La precisión del equipo de pesado deberá verificarse periódicamente durante la operación de la Planta.

#### 2. Equipo de Transporte.

Para transportar el concreto al sitio de colado se necesitan equipos que garanticen la entrega del concreto de buena calidad, sin segregación y sin pérdida de humedad.

Podemos distinguir dos equipos de Transporte según la distancia de acarreo.

Para distancia hasta de 3 kilómetros y en caminos parejos podremos usar camiones de volteo de 5 a 6 M3 que tengan caja en buen estado y selle perfectamente la puerta de descarga; es conveniente cubrir la caja con una lona para evitar la evaporación del agua del concreto. Normalmente no hay problema de segregación para esta distancia debido al bajo revenimiento del concreto que se utiliza en los pavimentos.

Para distancias mayores conviene usar equipos especializados en el acarreo de concreto, básicamente en un camión con caja en forma de media pera que pueda estar equipado con un agitador dentro de la caja y vacía la caja mediante volteo (Dumpcrete).

Después de cada viaje de concreto es necesario lavar las cajas de los camiones de acarreo para retirar cualquier material adherido o seco. Esto sirve de limpieza y lubricación de la caja y ayuda a la descarga del siguiente viaje de concreto con más facilidad.

Con frecuencia se usan las ollas revolventoras montadas en camión (motorevolventora) para el transporte de concreto. Sin embargo este procedimiento no es recomendable ya que este equipo maneja concretos con revenimientos mayores al recomendado en pavimentos de concreto hidráulico.

### 3. Equipos de Colocación, Compactación y Terminación.

Estos pueden dividirse en dos grandes grupos:

A.- EQUIPOS CON CIMBRA DESLIZANTE.

B.- EQUIPOS CON CIMBRA ESTACIONARIA.

#### A.- EQUIPOS CON CIMBRA DESLIZANTE.

El uso de pavimentadoras con cimbra deslizante requieren tener especial cuidado en varios aspectos del trabajo, para obtener resultados buenos. Su principal uso se recomienda en la construcción de pavimentos en carreteras.

La Sub-base tendrá que estar en tolerancia de nivel y compactación que fijan las especificaciones, además se tendrá que dejar 80 cm más ancha en cada lado del pavimento para apoyar los carriles del equipo de tendido.

El concreto que se suministre deberá tener una calidad uniforme con el más bajo revenimiento que permita trabajarlo.

### EQUIPO PARA COLOCACION, COMPACTACION Y TERMINACION CON CIMBRA DESLIZANTE.

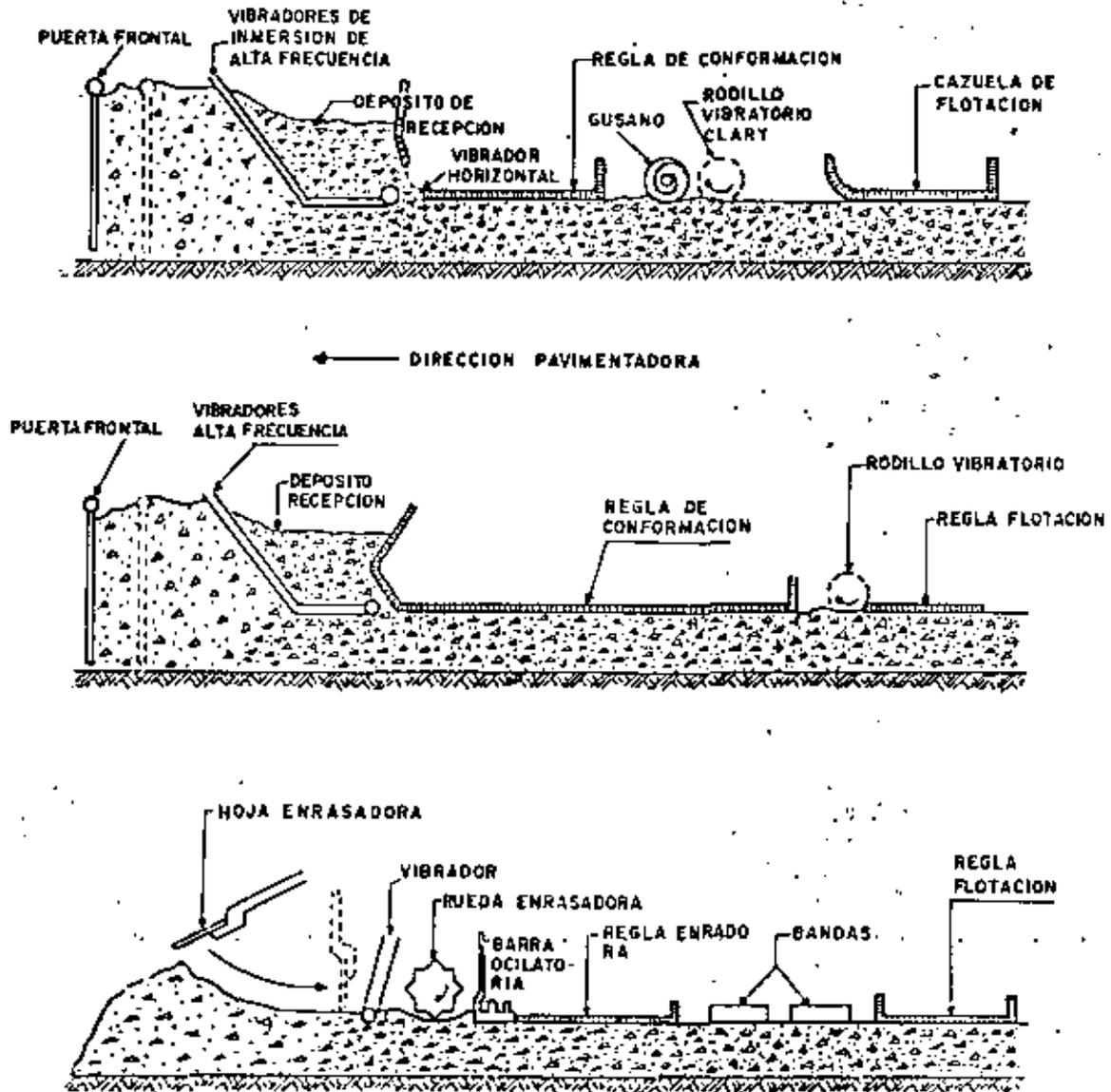


Figura 1

EQUIPO PARA COLOCACION, COMPACTACION Y TERMINACION CON CIMBRA DESLIZANTE

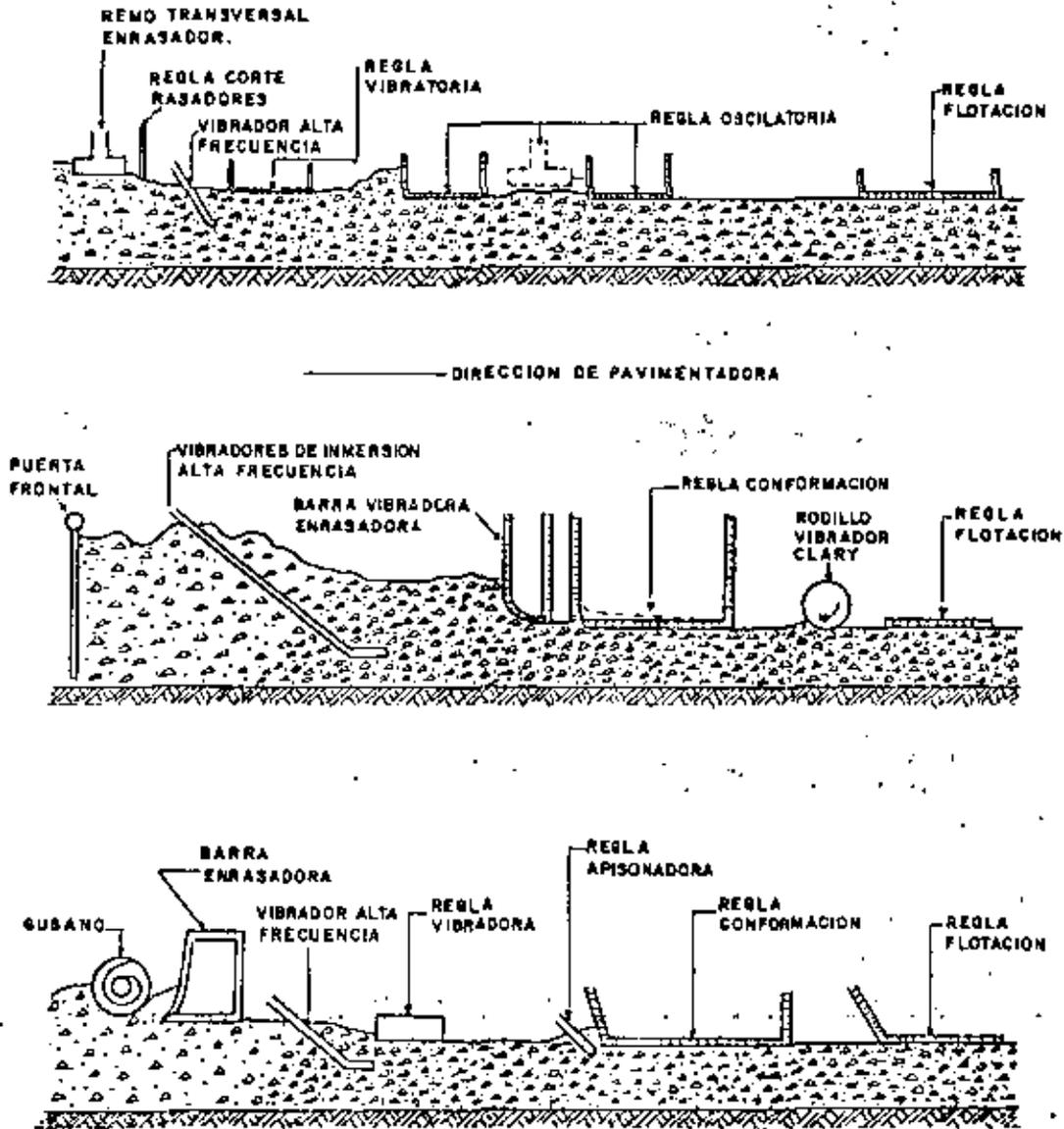


Figura 2

La operación del equipo con cimbras deslizantes es más económico que - aquel de cimbra fija removible, se ahorra obra de mano y en equipos adicionales, se trabaja en zonas más compactas facilitando la supervisión y calidad del trabajo.

La capacidad de ajustarse a una gran gama de dimensiones es otra gran - ventaja.

Se han realizado construcciones de losas de concreto de pavimentos de - espesores variables desde 15 cm hasta 30 cm y ancho desde 3 m a 15 m, en losas con o sin refuerzo.

Otra ventaja para el uso de pavimentadoras de cimbra deslizante es el - factor inversión-producción.

En producciones masivas es más económica la utilización de este equipo, en comparación al de cimbra fija.

#### A.1 Problemas Principales.

Es necesario tener personal y técnicos de operación altamente entrenado.

Deberán usarse métodos de tendido automáticos apoyados en alambre de acero previamente alineados y nivelados.

Para lograr obtener buenos resultados tienen que hacerse experiencias - con el equipo y personal, o bien buscarlos entrenado con suficiente experiencia en este tipo de trabajo, lo cual no es fácil. La atención y mantenimiento del equipo de pavimentación requiere de mecánicos y personal altamente especializado, inclusive asistencia del fabricante, ante todo los equipos electrónicos y componentes electrónicos requieren de técnicos calificados. Este personal es difícil de conseguir y en muchos casos habrá que formarlo.

#### A.2 Preparación de Sub-base.

Uno de los problemas más importantes para el uso de pavimentadoras con cimbra deslizante es lograr los niveles que fijan las especificaciones para la sub-base y que para este sistema es indispensable alcanzar. Cualquier defecto en la sub-base, puede producir variantes en los espesores de las losas y rugosidades en la superficie de las mismas. Este defecto puede reducirse mediante el uso de equipos con controles automáticos en el afine de sub-base.

A.3 Concreto de calidad uniforme.

Deberán dosificarse concreto con una calidad uniforme con materiales bien graduados y revenimientos, lo más bajo posible, se recomienda usar plantas de concreto automatizadas.

A.4 Aplastamiento de los extremos de la losa.

Esto sucede cuando se usa concreto de calidad no uniforme, mal vibrado o de revenimiento alto, (arriba de 6 cm), también pueden presentarse cuando las condiciones climatológicas son desfavorables, tales como humedad excesiva o bajas temperaturas, así como mal control de la máquina, etc.

A.5 Pavimento rugoso o mal acabado.

Puede deberse al tipo de materiales usados, a la sub-base que esté en malas condiciones, problemas climatológicos, al ajuste de una máquina por ser nueva, o al excesivo desgaste de una máquina usada.

En cada caso deberá resolverse de acuerdo con las condiciones del trabajo y equipo.

B. EQUIPO DE COLOCACIÓN, COMPACTACION Y TERMINACION CON CIMBRA ESTACIONARIA.

Existe una gran cantidad de equipos para pavimentación que utilizan cimbras de formas estacionarias.

Tiene una gran ventaja sobre el sistema con cimbra deslizante de poder garantizar mejor los niveles de la rasante y no tiene desplomes en los hombros. La cimbra se coloca previamente alineándola y nivelándola, y luego sirve de apoyo al equipo de colocación y vibrado y terminación final.

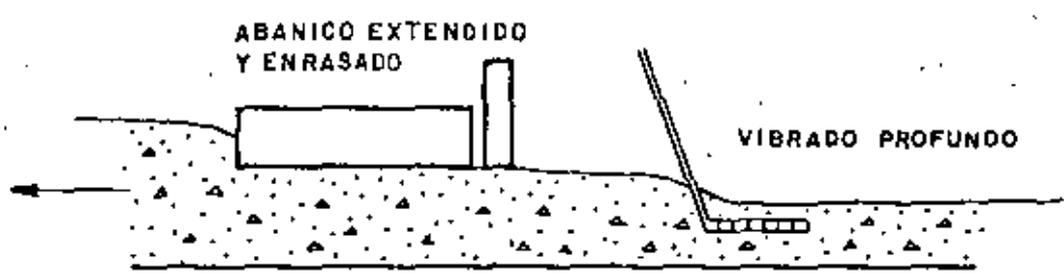
También es posible adaptar los equipos con cimbra deslizante al sistema de cimbra fija, con pequeñas adaptaciones.

Para aeropuertos es preferible usar equipo de pavimentadoras apoyadas en cimbra estacionaria dado que este sistema garantiza mejor la obtención de los niveles que exijan las especificaciones.

En México para la pavimentación de Aeropuertos con concreto hidráulico, se han requerido de 20 a 50 m<sup>3</sup>/hora.

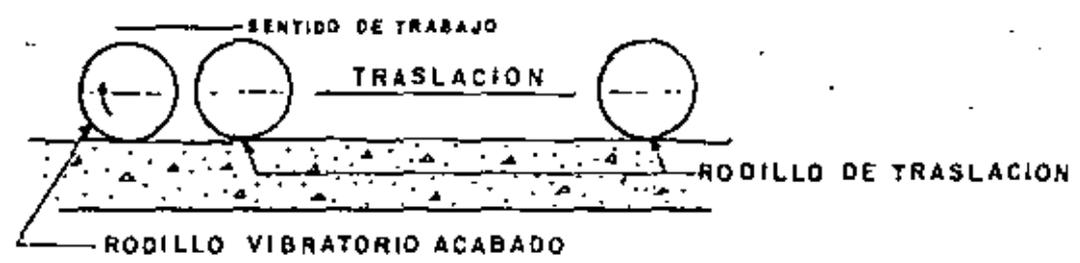
EQUIPO PARA COLOCACION, COMPACTACION Y TERMINACION CON CIMBRA ESTACIONARIA FIJA.

### EQUIPO EXTENDIDO Y VIBRADO PROFUNDO



### EQUIPO DE VIBRADO Y TERMINADO SUPERFICIAL

#### A.- EQUIPO CLARY.



#### B.- EQUIPO MAGGINES.



Figura 3

Vamos a describir algunos de los equipos que pueden utilizarse para estos volúmenes de colado con cimbra fija.

### 8.1 Equipos de Colocación y Compactación.

El primer equipo sería un conjunto de tendido y compactado con la siguiente característica: Tener amplitud suficiente para trabajar en anchos de 5 a 6 m, al frente un extendedor o repartidor de concreto que acomoda a éste a un nivel adecuado para su compactación por vibrado, como segundo elemento básico deberá estar previsto de una batería de vibrado de alta frecuencia de 10.000 \* V.P.M., para el vibrado profundo, al igual que en el caso de equipo con cimbra deslizante.

Este equipo deberá ser autopropulsado, la operación de sumergir y emerger los vibradores se hará por medio de controles hidráulicos.

El equipo irá equipado con unidades de alumbrado para trabajos nocturnos.

### 8.2 Equipo de Vibrado Superficial.

El segundo equipo deberá ser un equipo de vibrado superficial y de acabado, del cual existen varios tipos en el mercado.

El llamado rodillo vibratorio Clary es un equipo que puede utilizarse para estas producciones con mucho éxito, consta de tres rodillos de 6 m de ancho, dos colocados al frente separados 5 cm y uno separado 1 m en la parte posterior. Los rodillos motrices son las dos posteriores. El rodillo de enfrente hace el trabajo de acabado y vibrado superficial por su forma de colocación y giro.

El rodillo acabador tiene una excentricidad ajustable a 1/8", 1/4", y gira a alta velocidad haciendo efecto de vibrado y acabado, los rodillos de traslación mueven el conjunto hacia adelante y atrás permitiendo las pasadas que sean necesarias sobre la superficie de concreto para dejarlo terminado dentro de tolerancia.

Otro equipo de vibrado y acabado superficial puede ser un equipo montado sobre chasis de estructura de 6 m de ancho con ruedas que puede caminar sobre la cimbra o piso de concreto según las necesidades, este equipo es autopropulsado y consta de los siguientes elementos acabados.

Tiene una regla de madera de 6 m de largo y sección de 3" x 12" reforzada en su base con ángulo de hierro, ejecuta con movimiento vibrato

\* V.P.M. Vibraciones por minuto.

rio vertical acomodando el concreto previamente vibrado por el peine de vibraciones de alta frecuencia del equipo de adelante arreglando pequeñas oquedades.

En la parte posterior se encuentra una regla vibratoria fija de aluminio de 6 m de ancho y sección de apoyo de 20 cm, ésta hace el trabajo de terminación. Todos los controles de esta máquina son eléctricos y requieren de una planta de luz para su funcionamiento. Esta máquina está equipada con un eje y llantas para su fácil transportación.

Para volúmenes mayores de 50 m<sup>3</sup>/hora conviene utilizar máquinas integradas con todos los elementos al estilo de las pavimentadoras de cimbra deslizante.

Existen además de las máquinas descritas un gran número de equipos que pueden realizar los trabajos de pavimentación de concreto hidráulico muy eficientemente.

#### 4. Equipo de Terminado Final.

Como un equipo de terminado final es conveniente utilizar alguno que permita dar un acabado de la superficie sin alterar éste.

Puede ser una máquina que conste de una estructura que se apoye a los lados de la losa de la línea de pavimento y sirva de sostén a un tubo dispuesto diagonalmente con respecto al eje de la línea de pavimento y permita su ajuste a manera que se apoye sobre el concreto terminado y al hacer un movimiento de traslación sobre la superficie fresca corrija las pequeñas imperfecciones que pueden dejar las máquinas acabadoras, y a la vez sirva para cerrar las pequeñas fisuras de fraguado superficial que pudieran presentarse en la superficie del concreto.

#### Bandeo, Cepillo de Cerda.

Para volúmenes menores se puede recurrir al Sistema de Bando, que se logra mediante una banda de 20 a 25 cm de ancho y una longitud del ancho de la losa más 1.50 y mediante un movimiento de vaivén, se logra dar una superficie antideslizante muy buena con pequeños zurdos de 1 a 3 mm.

Otro procedimiento puede ser el terminado mediante el Cepillo de Raíz, que al pasar sobre la superficie terminada deja zurdos similares al del Bando.

5. Equipo de Aserrado de Juntas de Construcción.

Deberán tenerse cuando menos dos máquinas para corte de juntas, se usan discos de diamante para concreto fresco de 1/8" y 1/4".

El objeto de tener dos máquinas es que en caso de falla de una de ellas se tenga un repuesto para evitar roturas en las losas.

En caso de tener producciones grandes habrá que calcular el número de cortadoras necesarias y agregar una más para posibles fallas.

6. Equipo para Aplicación de Sellos de Juntas.

El equipo para aplicación de sello se describe ampliamente más adelante en el Capítulo VII.

7. Equipo para Aplicar Película de Curado.

Para aplicación de película de curado pueden usarse equipos de aspersión manual o mecánico similar al que se usa para aplicar insecticidas.

Para producciones masivas existen equipos de aplicación automáticos.

8. Equipo Auxiliar.

8.1 Alumbrado.

Deberá tenerse en obra un equipo de alumbrado que garantice el trabajo nocturno con suficientes lámparas para cubrir todo el tramo desde la colocación del concreto hasta la etapa del aserrado.

8.2 Humedecido.

A todo lo largo del tramo por colar deberán quedar repartidos tanques de agua, que se utiliza para humedecer las sub-bases pre vio al colado y posteriormente se utiliza para proporcionar agua a las máquinas cortadoras.

8.3 Protección contra Lluvia y Viento.

Para poder proteger el concreto fresco colocado contra los efectos de lluvias inesperadas que puedan dañarlo, tendrán que te-

nerse en obra techos con estructuras ligeras en cantidad suficiente que permita proteger el concreto fresco, y por lo que respecta a la protección contra los efectos del viento deberá disponerse de mamparas lastrales en cantidad suficiente para servir de pantallas protectoras.

En caso de presentarse condiciones de viento severas, temperaturas menores de 5°C o lluvias inesperadas, deberá suspenderse el tendido del concreto y colocar una junta de construcción.

#### IV SELECCION DEL EQUIPO.

Para la selección del equipo deberán valorarse, los diferentes factores que intervienen en la realización de la obra.

Podremos enunciarlos de la siguiente forma:

- a. Volumen de Obra a ejecutarse.
- b. Programa de Obra.
- c. Disponibilidad de todos los materiales necesarios, materiales inertes, cemento, varillas, pasajuntas, etc.
- d. Factores climatológicos.
- f. Trabajar en uno o varios turnos.

Procederamos a la siguiente manera:

Conocido el volumen de obra a ejecutarse y el tiempo de entrega de obra, se revisarán las disponibilidades de materiales, si alguno de estos no está disponible en la medida que se requiera habrá que modificar el plazo de entrega de la obra.

Supongamos que se tienen los materiales para cumplir con el Programa de Obra, enseguida analizamos las condiciones climatológicas para evaluar el tiempo posible de trabajo que pueda tenerse dentro del Programa de Obra.

Como último se determinará los turnos de trabajo. En general es conveniente trabajar dos turnos. Como en el colado de las losas no conviene suspender los trabajos ya que al parar las actividades tiene que hacerse una junta de construcción con varillas pasajuntas. Estas juntas de construcción son muy lentas y caras.

Decidido el número de turnos, conocemos el volumen de obra que tenemos - que manejar por hora, lo cual nos permite decidir el equipo que se ajuste a - las necesidades del trabajo.

Se solucionarán los equipos de tendido, vibrado y acabado que más se - - ajusten al programa estudiado y estén balanceados entre sus diferentes elemen- tos.

Ejemplos Numéricos.

Caso No. 1.

- Datos:
- a. Concreto en Pavimento 20 000 M3.
  - b. Duración Obra. 40 Semanas.
  - c. Material pétreo almacenado.
  - d. Lluvias probables. 35 Días.
  - e. Días perdidos por otras causas. 18 Días.

Determinar el equipo más conveniente para la fabricación y colocación del concreto.

10. Determinamos los días disponibles para realizar el trabajo, se con- sidera el Sábado como 1/2 día.

|                                 |    |         |   |     |      |   |                   |      |
|---------------------------------|----|---------|---|-----|------|---|-------------------|------|
| Plazo                           | 40 | Semanas | x | 5.5 | días | = | 220               | Días |
| Días Lluvias.                   |    |         |   | 35  | días | - | 35                | Días |
| Días perdidos por otras causas. |    |         |   | 18  | días | - | 18                | Días |
|                                 |    |         |   |     |      |   | <u>167</u>        | Días |
|                                 |    |         |   |     |      |   | Días Disponibles. |      |

20. Producción promedio necesario para cumplir con el Programa.

$$\frac{20\ 000\ M3}{167\ Días} = 119\ M3/Día.$$

3o. Producción promedio diaria.

En un turno normal podemos considerar 7 horas efectivas de trabajo debido al inicio y terminación de Jornada.

$$\text{Producción mínima diaria} = \frac{119 \text{ M3/Día}}{7} = 17 \text{ M3/Hora}$$

4o. Para la producción horaria en una Planta de Concreto vamos a considerar una eficiencia de 80% y otro 80% en el tendido, tendremos la capacidad mínima necesaria para la Planta.

$$\text{Capacidad Nominal de la Planta} = \frac{17 \text{ M3/H}}{0.8 \times 0.8} = 26.55 \text{ M3/H.}$$

Para cumplir con el programa de trabajo de acuerdo con las condiciones generales de la Región, se requiere una Planta de Concreto con una capacidad mínima de 26.55 M3/H.

Habrá que buscar en el mercado la disponibilidad del equipo disponible que se ajuste al volumen por producir.

En México, se pueden adquirir o Rentar Plantas de Concreto con capacidad de 30 M3/H.

Una máquina de 30 M3/H., trabajará a una eficiencia Real con respecto a la capacidad de colocación media del concreto.

$$\text{Eficiencia} = \frac{26.55 \text{ M3/H}}{30.00 \text{ M3/H}} = \underline{\underline{0.89}}$$

5o. Revisando capacidad de Planta contra la producción requerida.

|                           |       |                  |               |
|---------------------------|-------|------------------|---------------|
| Capacidad de Planta       | 30    | M3/H             |               |
| Eficiencia Planta         | 80    | %                |               |
| Eficiencia Eq. Tendido    | 80    | %                |               |
| Vol. Prom. de Fabricación | 30    | M3/H             | = 19.20 M3/H. |
|                           |       | <u>0.8 x 0.8</u> |               |
| Producción Probable       | 19.20 | M3/H             |               |
| Producción Requerida      | 17.00 | M3/H             |               |

La Planta de 30 M3 es aceptable.

6o. Equipo de tendido, vibrado y acabado.

Para la selección del equipo deberá tomarse en cuenta la producción máxima de la Planta de Concreto, afectada por la eficiencia normal del equipo. Para la Planta de 30 M3/H, el equipo de tendido deberá tener una capacidad mínima de:

$$30 \text{ M3} \times 0.8 = 24 \text{ M3/H.}$$

Para esa capacidad pueden utilizarse los equipos de tendido y vibración descritos en el capítulo III-B.

CASO No. 2.

Con los mismos datos anteriores de volúmenes de concreto y términos de tiempo pero con la limitante de disponer solamente de una Planta de Concreto de 15 M3/H., tendremos la siguiente solución.

Datos:

|   |             |
|---|-------------|
| a. Pavimento de concreto hidráulico         | 20 000 M3   |
| b. Duración Obra                            | 40 Semanas. |
| c. Material Pétreo almacenado.              |             |
| d. Días perdidos por lluvias.               | 35 Días.    |
| e. Días perdidos por otras causas.          | 18 Días.    |
| f. Planta de concreto disponible capacidad. | 15 M3/Hora. |

1o. Días disponibles para el trabajo igual al Caso No. 1 167 Días.

2o. Obtendremos las horas efectivas de trabajo necesarias para realizar el trabajo.

$$\frac{20\ 000 \text{ M3}}{15 \text{ M3} \times 0.8 \times 0.8} = 2083.33 \text{ Horas Efectivas.}$$

3o. Establecer turnos de trabajo.

Si utilizamos la Planta de Concreto de 15 M3/H y tenemos un plazo de 167 días de trabajo, y se requieren 2083 horas efectivas de trabajo para producir y colocar el pavimento tendremos:

$$\text{Turnos} = \frac{2083 \text{ Horas}}{167 \text{ Días} \times 7 \text{ Horas}} = 1.78 \text{ Turnos.}$$

Turno-Día.

Necesitamos 1.78 Turnos Diurnos de Trabajo.

4o. Como el Segundo Turno normalmente es media hora más corto que el primero y que su eficiencia es 10% menor tendremos:

$$\text{1er. Turno rendimiento} = \frac{15 \text{ M3}}{0.8 \times 0.8} = 9.60 \text{ M3/H.}$$

$$\text{2o. Turno rendimiento} = 0.9 \times 9.6 \text{ M3} = 8.64 \text{ M3/H.}$$

$$\text{Prod. 1er. turno} = 9.60 \text{ M3/H} \times 7 \text{ H.} = 67.2 \text{ M3/Turno.}$$

$$\text{Prod. 2o. turno} = 8.64 \text{ M3/H} \times 6.5 \text{ H} = \frac{56.2}{123.4} \text{ M3/Turno.}$$

\*\*\*\*\*

Ajustando la producción de los dos turnos necesarios por eficiencia y horas laborales tendremos:

Producción posible en 167 días laborales con dos turnos por día.

$$\text{Producción} = 167 \text{ días} \times 123.4 \text{ M3/día} = \underline{\underline{20,607.80 \text{ M3}}}$$

Puede realizarse el trabajo utilizando una Planta de 15 M3/H. trabajando dos turnos por día.

3o. Equipo de tendido, vibrado y acabado.

Para el equipo de tendido, vibrado y acabado en este caso de producciones de 15 M3/H., puede utilizarse un equipo similar

al del caso No. 1, a pesar de estar algo excedido.

Sin embargo es posible utilizar un equipo más sencillo a base de 2 vibradores eléctricos de alta frecuencia operados individualmente por peones, y una regla vibratoria de doble barra con vibrador de alta frecuencia, jalada con peones, y el extendido del concreto manualmente.

COMO EJEMPLO DE PAVIMENTACION DE CONCRETO HIDRAULICO  
MASIVO DE PRODUCCIONES HORARIOS ALTISIMOS VAMOS A MENCIONAR:

LOS DATOS DE COLADO DE LOSAS DE CONCRETO HIDRAULICO EN EL AEROPUERTO FT WORTH - DALLAS TEXAS.

Para Aeropuerto de Ft Worth-Dallas Texas, se obtuvieron los siguientes rendimientos para colado de losas de pavimento hidráulico, utilizando 2 Equipos Pavimentadores de 15 m de ancho.

|                             |                            |
|-----------------------------|----------------------------|
| Producción media horaria    | 253 M <sup>3</sup> /H/Maq. |
| Producción máxima horaria   | 386 M <sup>3</sup> /H/Maq. |
| Producción máxima en un día | 12292 M <sup>3</sup>       |
| Producción media semanal    | 37678 M <sup>3</sup> .     |
| Area Pavimentada.           | 2 484000 M <sup>2</sup> .  |
| Espesor de:                 | 44 a 55 cm en dos capas.   |

## V COLADO, COMPACTACION Y CURADO DEL CONCRETO HIDRAULICO.

### 5.1 Colado del Concreto.

El equipo de colocación tiene que ser apto para depositar el concreto a su posición final con un mínimo de agregación y sin dañar la sub-base.

En trabajos que requieran el movimiento de grandes volúmenes de concreto se utilizarán máquinas equipadas con dispositivos de distribución y colocación del concreto en forma mecánica, tales como cajones de recepción y para su distribución pueden contar con cualquiera de los siguientes elementos: banda, gusano, remo, cajones, abanico, etc. Cualquiera de estos dispositivos distribuye el concreto a todo el ancho de la losa con los espesores adecuados sin dañar la sub-base, además manejando el concreto con un mínimo de segregación.

Para el manejo de volúmenes menores de concreto del orden de 20 - - M<sup>3</sup>/hora, pueden usarse equipos de extendido y colocación como los descritos en el Capítulo 3-B, con muy buenos resultados.

Si hablamos de volúmenes del orden de 10 M<sup>3</sup>/hora, entonces usaremos el Sistema de Colocación y tendido manual con peones y palas.

El suministro del concreto en todos los casos será mediante camiones de volteo o Dumpcrete, teniendo especial cuidado de no dañar la sub-base al circular sobre ella.

En el Capítulo III se han explicado algunos equipos que se recomiendan para estos trabajos.

### 5.2 Compactación.

Se logra mediante el uso de vibradores de alta frecuencia 10 000 - V.P.M., se colocan sobre una barra con separación de 75 cm centro a centro a todo el ancho de la losa de concreto, solamente deben trabajar cuando están sumergidos en la masa del concreto, nunca fuera de él.

En algunas máquinas se cuenta con vibradores de tubo colocados en la esquina de avance de la plancha de conformación.

También es posible utilizar varios vibradores de alta frecuencia -- operados individualmente.

### 5.3 Comprobación Superficie Terminada (Depresiones).

Antes de dar el acabado superficial se procede a comprobar si la superficie está dentro de tolerancia en niveles. Esto, se hace colocando una regla metálica de 5 m en el sentido longitudinal de la losa observando las depresiones. Estas deberán ser menores de 0.5 cm si se exceden las depresiones deberán corregirse de inmediato antes de fraguar el concreto.

En caso de colocación de concreto en volúmenes grandes para checar la superficie terminada se recomienda usar el Perfilógrafo que puede proporcionar resultados de perfil más exactos y con esto corregir sobre la marcha el tendido y acabado del concreto ajustando la máquina pavimentadora para lograr resultados dentro de especificaciones.

### 5.4 Acabado Superficial.

En muchas ocasiones ante todo, cuando los volúmenes de colado no son muy grandes, se acostumbra dar un acabado superficial con llanta de madera. Este procedimiento no debe usarse ya que cualquier trabajo hecho a mano deforma la superficie dejando mayores depresiones.

Es preferible en todo caso no usar ningún acabado adicional superficial y dejarlo tal como lo deja la máquina acabadora.

Cuando se trabaja en volúmenes grandes de colado, los equipos que se utilizan tienen interconstruidos elementos suficientes para dar un acabado superficial adecuado. Sin embargo en todos los casos es preferible utilizar algunos de los equipos descritos en el Capítulo III.

### 5.5 Textura Final.

La textura final se logra por cualquiera de los dos procedimientos indicados. El escobillado se hace pasando sobre la superficie terminada una escoba de raíz dejando marcados pequeños zurcos de 1 a 3 mm de profundidad.

### 5.6 Curado del Concreto con Membrana.

Una vez que desapareció la película de humedad brillante sobre el

pavimento fresco, la superficie deberá ser cubierta con una membrana de curado, ésta puede aplicarse con aspersores de tipo manual o mecánicos del tipo que se usan para aplicar insecticidas, también hay máquinas especializadas cuando se trata de grandes volúmenes.

En casos especiales cuando hay mucho viento deberá aplicarse con un bote.

Su aplicación deberá ser con un espesor y textura uniforme.

Un buen producto rinde 3 M<sup>2</sup> por litro. En los cachetes de las losas deberá aplicarse la película de curado antes que transcurra una hora de haber retirado la cimbra.

#### 5.7 Remoción de las Formas de Cimbra.

Las formas se descimbrarán entre 6 y 8 horas después del colado.

Este tiempo puede tener variaciones de acuerdo con las condiciones de temperatura, humedad y viento en cada lugar.

Al remover las formas hay que tener muy en cuenta no dañar las esquinas de las losas.

### VI DESCRIPCION Y CONSTRUCCION DE LOS DIFERENTES TIPOS DE JUNTAS.

Las juntas son esenciales en los pavimentos de concreto hidráulico a fin de reducir los esfuerzos de tensión, compresión y flexión en las losas.

#### A. Diferentes tipos de juntas.

##### 1. Juntas de Expansión.

Su función principal es proporcionar el espacio para que tenga lugar la expansión del concreto y por consiguiente evitar que se originen esfuerzos de compresión que pudieran causar daño en el mismo.

Esta junta funciona también como junta de contracción.

##### 2. Juntas de Contracción.

Tienen por objeto limitar los esfuerzos de tensión a valores --

permisibles. Esta junta debe estar en libertad de abrirse, básicamente existen varios tipos de juntas de contracción.

Juntas de Ranura.- Se construye formando una ranura en la superficie del pavimento utilizando alguno de los siguientes procedimientos.

- a) Introducir temporalmente en el concreto una tira metálica.
- b) Instalar una tira de material premoldeado de relleno para juntas a la profundidad requerida.
- c) Aserrar el pavimento después que el concreto haya endurecido.
- d) Juntas de tiras metálicas.

### 3. Juntas de Alabeo o de Articulación.

Se refiere a cualquier tipo de junta que permita un cierto giro sin una separación considerable entre las losas adjuntas. Su función principal es absorber los esfuerzos por alabeos. A diferencia de la junta de expansión o contracción, se colocan barras de sujeción a través de la junta para prevenir separaciones considerables en la junta. En efecto una junta de este tipo actúa simplemente como una articulación, esto permite que las losas en unión puedan sufrir un cierto desplazamiento angular.

### 4. Juntas de Construcción Transversal.

Al terminar el colado cada día deberá construirse una junta de construcción. Estas, también tendrán que colocarse por alguna interrupción por falla de equipo o razones climatológicas. Deberán colocarse con una interrupción del colado, de 30 min. en climas secos calientes y con viento, o una espera de una hora en condiciones no tan severas puede ser el índice para terminar un colado y hacer la junta de construcción.

### 5. Juntas Longitudinales.

Esta junta puede ser una junta a tope como resultado de la construcción de una banda o bien si la construcción del pavimento se hace a todo lo ancho, se forma utilizando alguno de los métodos descritos en la junta de contracción.

La separación y fallas entre las bandas adyacentes, se evita mediante el uso de barras de sujeción espaciadas convenientemente.

## 6. Dispositivos para Transmisión de Carga.

Debe proporcionarse algún dispositivo para transmisión de cargas aunque los bordes y esquinas se diseñen para resistir la carga sin sobre esforzar el concreto.

Los dispositivos mecánicos para transmisión de cargas pueden dividirse en dos tipos principales.

### 6.1 Resistentes al Corte.

Son los que tienen resistencia al cortante pero poca o ninguna resistencia a la flexión. Pueden ser:

- a) De Machimbre.
- b) De Placas corrugadas.
- c) De Trabazón de Agregados.

Las de Machimbre se logran haciendo formas especiales con machimbre.

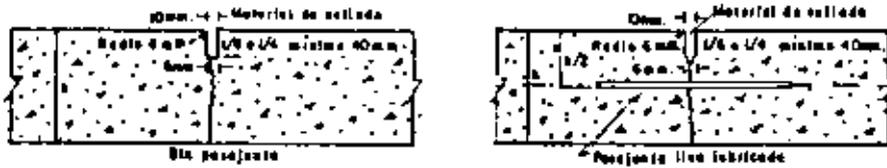
Las de Placas Corrugadas pueden ser a base de cimbra con superficie corrugada.

Las de transmisión de carga por trabazón de Agregados, trabajan a través de la falla de concreto, provocado en la junta de contracción por la ranura falsa o aserrada. Para que la Trabazón de Agregados sea efectiva, la abertura de las juntas no deberá exceder de 0.5 mm. (Especificación A.C.I. e. 325-53).

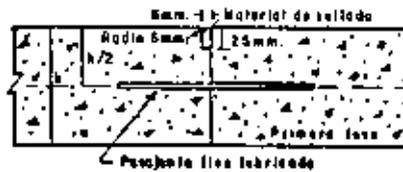
### 6.2 Resistencia al Cortante y Flexión.

Aquellas que tienen resistencias al cortante y a la flexión el más común es en el pasajunta. La mayoría de los dispositivos para transmisión de carga emplean este principio en su diseño. El pasajunta de varillas de acero convencional redondo es el tipo más empleado de dispositivos para transmisión de cargas.

JUNTAS DE CONTRACCION TIPO RANURA



JUNTA DE CONTRACCION A TOPE CON PASAJUNTAS



JUNTAS DE EXPANSION

JUNTA DE EXPANSION CON PASAJUNTAS



Fig. 8 Detalles recomendados de diseño de junta de contracción transversal para carreteras.

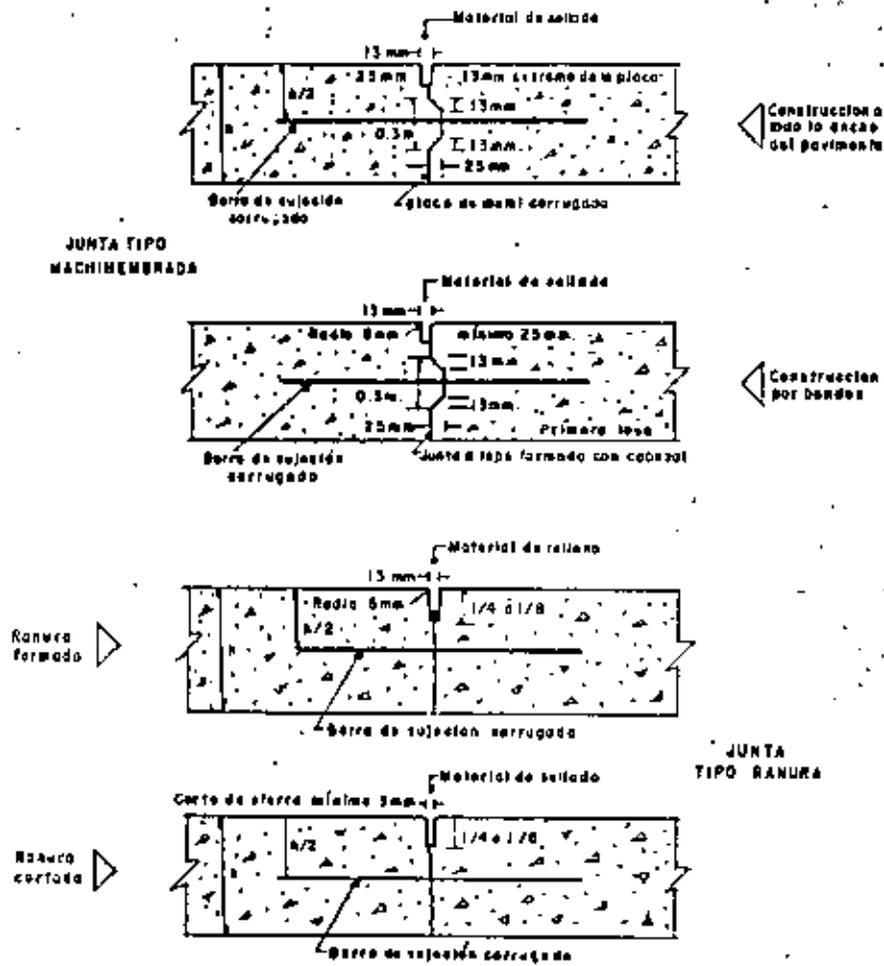


Fig. 9. Juntas longitudinales en carreteras

## VII SELLADO DE LAS JUNTAS DE CONTRUCCION.

Una vez terminado el colado de losas y aserrado de las juntas se procede al sellado.

### 7.1 Productos Empleados.

Para sellar las juntas en losas de concreto se necesita un producto que debe resistir la acción de agua, aceites; minerales, gasolinas y combustibles de aviones a reacción.

En general son productos selladores del tipo termoplástico a base de alquitranes, mica activa, hule sintético clorinado y plasificantes estabilizadores. En su forma original es un líquido espeso negro con un peso específico de 1.4 kg/lt.

Para su aplicación debe calentarse hasta 140°C. Una vez frío se transforma en un cuerpo elástico con apariencia de hule blando de gran elasticidad que se produce por la formación de una red compleja de moléculas de hule sintético dentro de la masa. Las estructuras moleculares de hule se forman al calentarse el producto y se van completando poco a poco durante unos 90 días después del colado.

Después de 90 días, el producto mantiene su valor de penetración de 90 décimos de milímetros (medida estándar de dureza), no obstante estar expuesto a la intemperie.

El producto sellador termoplástico tiene una elevada adherencia en superficies secas y limpias, debido a la polaridad de la masa. La adherencia se califica en pruebas fijadas por la "Federal Specification SS - S1676" y en general deberá cumplir con las especificaciones "ASTM-D-1854".

### 7.2. Formas de Aplicación.

#### 7.2.1 Limpieza de las Juntas.

con objeto de retirar las impurezas alojadas en las ranuras deben limpiarse perfectamente éstas retirando todo cuerpo extraño y como operación final se aplicará un chiflón de aire para dejar perfectamente limpias las juntas sin adherencia ni polvo antes de aplicar el sello.

### 7.2.2 Aplicación del Sello.

Siendo el sello un producto termoplástico debe colocarse a una temperatura adecuada y uniforme. El material puede calentarse en la misma máquina aplicadora que está provista de un recipiente de doble fondo (camisa de aceite) para evitar un calentamiento local excesivo. La temperatura del aceite debe mantenerse a los 170°C hasta que el producto haya adquirido una temperatura uniforme de 140°C. Estando el producto a esta temperatura es un líquido bastante delgado, que fluye fácilmente sin hacer burbujas, que toma la forma de la sección que lo contiene y que penetra en fisuras, porosidades e intesticios, aumentando su anclaje y mejorando su adherencia intrínseca.

Debe mantenerse el recipiente calentador tapado durante el calentamiento de producto sellador. No es necesario revolver constantemente el producto durante su calentamiento. Se deberá revolver cuando ha alcanzado su temperatura de aplicación y especialmente de colocarlo.

En caso de trabajos en que se requiera una mayor eficiencia de la máquina aplicadora, ésta deberá ser abastecida con material previamente calentado a la temperatura de aplicación, manteniendo cerca de la zona de sellado una nodriza o calentador.

El precalentador es un recipiente de calentamiento, montado sobre una plataforma con ruedas que eleva la temperatura del producto por el mismo sistema del fondo (camisa de aceite). Este precalentador por su facilidad de circulación y traslado puede ir detrás de la máquina aplicadora con el objeto de abastecer en el momento oportuno.

La capacidad de la máquina aplicadora es de 63 lt, quedando una cámara de protección de dimensiones adecuadas, para absorber la dilatación del material, especialmente cuando éste ha alcanzado su temperatura óptima de aplicación.

La máquina está diseñada para efectuar la extracción de los 63 lts. en 45 minutos estando el material a una temperatura de 130 a 140°C. El precalentador tiene una capacidad de 126 lts con las mismas características de la máquina aplicadora.

El abastecimiento a la máquina aplicadora se efectúa entre 10 y 12 minutos a una temperatura de 130 a 140°C.

El calentamiento inicial en la aplicadora y precalentador es

de 90 a 120 minutos respectivamente para temperaturas ambientales de 20 a 25°C. Los calentamientos sucesivos en ambas máquinas son del orden de 40 minutos.

El empleo del precalentador elimina la pérdida de 30 minutos por carga, respecto al sistema de calentamientos sucesivos en la máquina aplicadora.

La colocación del producto se hace colando el material fundido dentro de las juntas ya preparadas, empleando un vertedor (boquilla), de dimensiones adecuadas. Debe procurarse no llenar totalmente la sección de la junta, dejándose de 3 a 5 mm libres para que al dilatarse el concreto no expulse el sello de la misma.

### 7.2.3 Restauración de las Juntas.

Las juntas que tengan abocardamientos, fracturas o cavidades con anchos mayores de 2 cm deberán ser restauradas antes de proceder al sellado.

La restauración consiste en reproducir nuevamente la forma original de la junta con productos epóxicos o similares.

Cuando se trata de pegar concreto nuevo con viejo se usará resina epóxica y en caso de resanes pequeños se usará el mortero epóxico o similares. Posteriormente se aplicará el producto de sellado.

## VIII DISCUSION DE LAS CAUSAS QUE ORIGINAN DEFECTOS DE CONSTRUCCION Y METODOS PARA EVITARLOS.

### 8.1 Suministro del Concreto Mal Revenimiento.

- A. Revenimiento bajo 0-2 cm.
- B. Revenimiento alto 6 cm adelante.

A. En caso de revenimientos muy bajos (de 0 a 2 cm) es muy difícil colocar el concreto, retrasando esto el avance. No se logra tener suficientes finos en la superficie por lo que el acabado queda defectuoso y generalmente fuera de especificaciones en niveles terminados. Para evitar esto habrá que tener especial cuidado de suministrar concreto con los revenimientos y calidades especificadas.

B. Suministro del concreto con revenimiento demasiado alto 6 cm adelante.

El colocar este concreto puede causar agrietamientos indeseables, se corre el peligro de tener bajas resistencias. En general se prefiere deshechar estos concretos por estar fuera de especificaciones. El remedio es controlar la cantidad uniforme del concreto en el suministro.

## 8.2 Colocación Deficiente del Concreto.

A. Colocación con Volumen escaso.

B. Colocación con volumen sobrado.

A. Cuando se coloca el concreto en volumen escaso habrá que rellenar éste después del vibrado profundo, manualmente y distribuirlo con el equipo de acabado y vibrado superficial retrasado al avance de obra.

B. Cuando se coloca concreto en exceso se tiene que retirar el volumen sobrante con el personal manualmente ayudado con el equipo de vibrado superficial, esta operación se dificulta mucho debido a que el concreto sobrante ha sido vibrado intensamente encontrándose en forma densa y compacto.

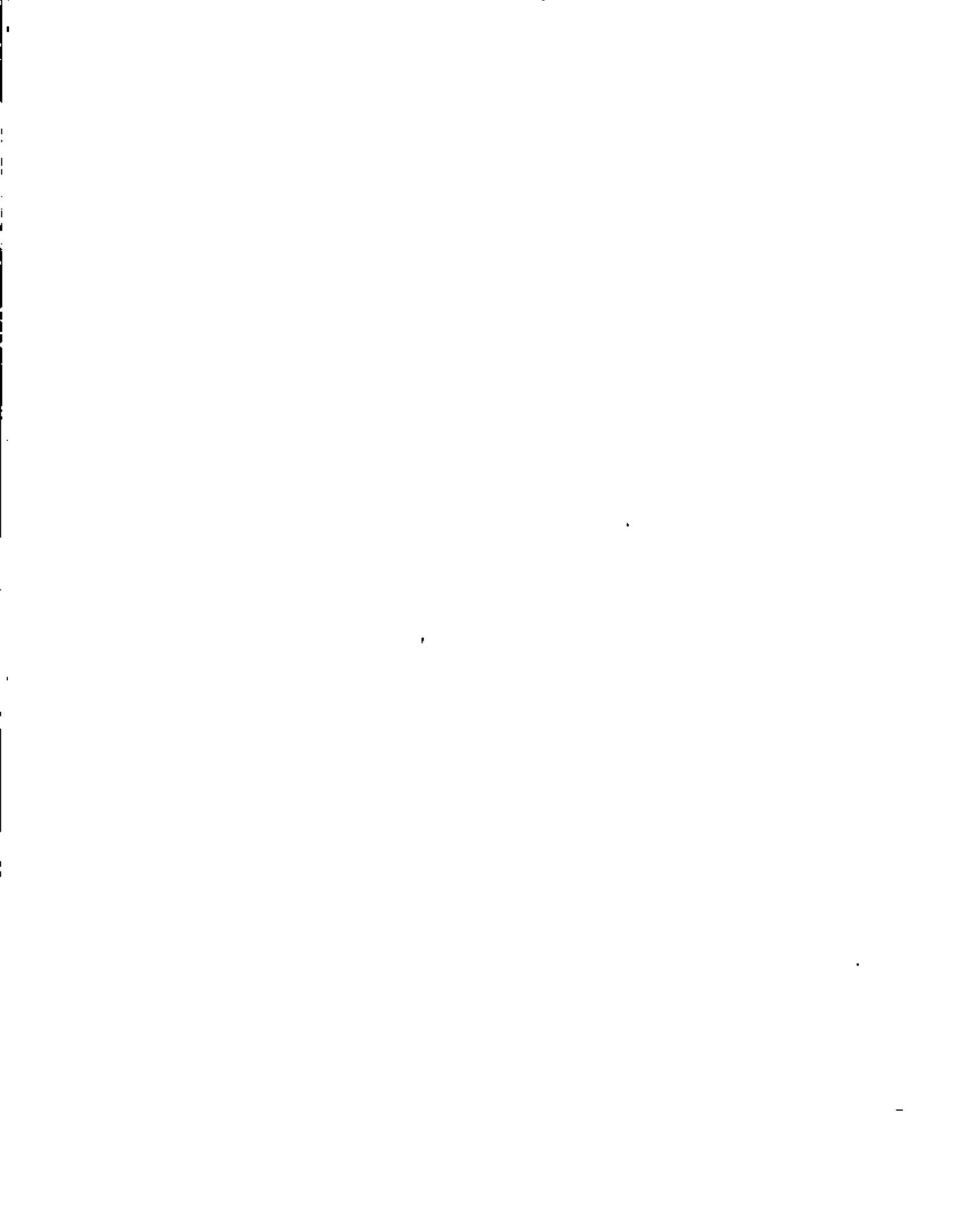
Esta operación es difícil, lenta y retrasa los avances de obra. En los dos casos habrá que tener especial cuidado de colocar el concreto en cantidad exacta para evitar estos problemas.

## 8.3 Pisar el Concreto Fresco.

Debe evitarse a toda costa pisar el concreto fresco cuando está terminado de colocar, para lo cual deben tenerse en el sitio de obra puntos de trabajo. El arreglar estos desperfectos se hace recortando las protuberancias que quedan y rellenando las oquedades con productos especializados que en todo caso son muy caros.

## 8.4 Mal Alineamiento de la Cimbra.

El problema que presenta es de aspecto. Para corregirlo se corta con disco de diamante alineando las juntas del concreto, esa operación es muy costosa.





centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de Ingeniería, unam



CURSO: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS

TEMA: CONTROL DE PRODUCCION

ING. FERNANDO FAVELA LOZOYA



## I N D I C E

|  | PAGINA |
|--|--------|
| 1. INSTRUCCIONES   | 2      |
| 2. EL CONTROL  | 3      |
| 3. CONTROL DE CANTIDADES   | 14     |
| 4. CONTROL DE COSTOS   | 17     |
| 5. CONTROL PRESUPUESTAL  | 19     |
| 6. CORRECCION DE DESVIACIONES                                      | 22     |
| 7. REQUISITOS DE UN SISTEMA DE CONTROL DE COSTOS                   | 22     |
| 8. PROBLEMA  | 28     |
| 9. ESTUDIAR LOS SISTEMAS DE CONTROL PARA UNA PLANTA DE TRITURACION | 27     |



## EL CONTROL

### 1.- GENERALIDADES.

1.- Control es el proceso que determina que -- también se está llevando a cabo una actividad va-  
lorizándola y si es necesario aplicando las medi-  
das correctivas apropiadas, de manera que la --  
ejecución esté de acuerdo con lo planeado.

(sin respuesta)

2.- La comparación entre lo planeado y lo ejecu-  
tado es lo que constituye la base del \_\_\_\_\_  
y la determinación del estándar o patrón que es-  
ta esencia de dicha comparación, es el primer -  
paso a seguir.

control

3.- El control es pues, un \_\_\_\_\_ que  
requiere de la determinación del \_\_\_\_\_  
en primer lugar y después de la comparación el  
estándar planeado y el trabajo ejecutado y por --  
último el de llevar a cabo la acción correctiva -  
en caso necesario.

proceso  
estándar

4.- La identificación de los objetivos que se rea-  
liza en la función de la \_\_\_\_\_  
norma el primer paso del control que consiste -  
en la \_\_\_\_\_ de los \_\_\_\_\_.

planeación  
determinación  
estándares

5.- Entonces la definición de la cantidad de tra-  
bajo a realizar en una jornada, es lo que consti-  
tuye la determinación de un \_\_\_\_\_ para  
la valuación del desempeño del trabajador. La  
definición de un modelo de comportamiento o ac-  
ción es lo que constituye un estándar (sí/no) \_\_\_\_\_.

estándar

o.

sí

6.- La valorización de lo ejecutado y lo planea-  
do, sería una etapa de la comparación entre el -  
estándar y lo que se está realizando. En caso de  
que exista una diferencia entre lo \_\_\_\_\_  
y lo \_\_\_\_\_ es cuando se debe tomar  
la \_\_\_\_\_.

planeado  
ejecutado  
acción correctiva

7.- Principio de Control.- Para que un \_\_\_\_\_  
sea efectivo debe cubrir y regular el funciona-  
miento planeado. Es decir se debe buscar y lo-  
grar que la actividad se esté realizando de acuer-  
do con lo \_\_\_\_\_.

control

planeado

## INSTRUCCIONES

La primera parte de estos apuntes utiliza el sistema denominado EDUCACION PROGRAMADA. Rogamos al lector atender las siguientes instrucciones para obtener el mejor aprovechamiento :

- 1) Cubriendo la columna de la derecha con la tira que se anexa, lea cada uno de los temas.
- 2) Escriba la respuesta en el espacio marcado o en una hoja -- por separado, cuando así se requiera. (Es esencial que no se concrete usted a pensar la respuesta, DEBE ESCRIBIRLA).
- 3) Revise su respuesta, moviendo la tira hacia abajo, descubriendo la respuesta correcta en la columna de la derecha.
- 4) Si su respuesta es correcta pase al siguiente tema.
- 5) Si su respuesta no es correcta, lea el tema nuevamente y trate de comprender por qué está usted equivocado.

## PROCEDIMIENTO

Cada tema deberá ser resuelto en orden. NO ALTERE EL ORDEN, a menos que así se le indique. Si tiene dificultad en un determinado punto debe regresar al lugar donde este punto apareció por primera vez y revisar los temas relacionados con él.

## CONVENCIONES

\_\_\_\_\_ = Escriba la palabra solicitada.

\_\_\_\_\_ = Anote la letra que se requiere.

...(sí/no) = Subraye o circule la alternativa correcta.

\_\_\_\_\_ = Escriba las palabras que se requieran.

( ) = Ponga el número correcto

8.- Se analizarán en seguida los diferentes tipos de modelos, patronos o como los hemos llamado \_\_\_\_\_ que son más usados: Cantidad, Calidad, Uso del tiempo y Costo. estándares

9.- La determinación del volumen medio esperado de producción, de acuerdo a la actuación de los empleados más eficientes es lo que define un estándar de \_\_\_\_\_. cantidad

10.- El especificar las sumas de dinero a gastar en la adquisición de materias primas o publicidad es lo que implica un \_\_\_\_\_. estándar de costo

11.- El establecimiento de un programa a seguir en la realización de ciertas actividades constituye la implantación de un estándar de \_\_\_\_\_. uso del tiempo

12.- Por último, el definir las tolerancias que se pueden especificar en la realización de las actividades que permiten lograr los objetivos organizacionales es lo que define un estándar de \_\_\_\_\_. calidad

13.- Para poder comparar los resultados obtenidos se cuenta con los estándares de \_\_\_\_\_ y \_\_\_\_\_ que nos indican si podremos o no lograr, por ese medio, los \_\_\_\_\_ de la empresa. cantidad, calidad, uso del tiempo, costo objetivos

14.- El establecimiento de puntos estratégicos de control nos permite el lograr una mejor \_\_\_\_\_ entre el estándar definido y lo que se está realizando. Cuando surgen diferencias en la comparación se dice que existe una excepción. comparación

15.- El control administrativo es más fácil concentrando la atención sobre las excepciones o variaciones entre lo planeado y lo \_\_\_\_\_ es lo que nos dice el Principio de Excepción. Se puede decir que donde el Principio de \_\_\_\_\_ es válido, debemos colocar un punto \_\_\_\_\_ de control. ejecutado o realizado  
excepción estratégico

16.- Lo anterior significa que el esfuerzo control está dirigido a los lugares donde una \_\_\_\_\_ tiene lugar, es decir en el punto donde lo realizado no se conforma con el \_\_\_\_\_ o patrón definido.

excepción

estándar

17.- En los sitios de excepción es donde se debe colocar un \_\_\_\_\_ de control y donde se debe aplicar el tercer paso del proceso control, es decir la toma de la acción \_\_\_\_\_.

punto estratégico

correctiva

18.- La determinación de los sitios donde existe una \_\_\_\_\_ es básica para lograr un buen control, ya que el incluir todas las facetas de una empresa en él, consume demasiado tiempo y esfuerzo, por lo que resulta muy costoso.

excepción

19.- El concentrar el control en \_\_\_\_\_ estratégicos ahorra tiempo y esfuerzo y es una práctica muy unida al Principio de \_\_\_\_\_. Cuando al comparar estándares y funcionamiento no existe ninguna desviación o \_\_\_\_\_ el control de esa actividad pasa a segundo término y solo requiere de revisiones periódicas.

puntos

excepción

excepción

20.- En resumen: La \_\_\_\_\_ surge cuando al comparar el funcionamiento o resultados obtenidos y los \_\_\_\_\_ existe alguna diferencia y es el sitio donde debemos establecer un \_\_\_\_\_ de control y llevar a cabo la toma de la \_\_\_\_\_ correctiva.

excepción

estándares

punto estratégico

acción

## DISPOSITIVOS DE CONTROL.

21.- Una vez establecidos los estándares y que se han medido y comparado éstos con los resultados para poder llevar a cabo la acción \_\_\_\_\_ se utilizan varios \_\_\_\_\_ de control que son:

correctiva

dispositivos

Presupuesto

Informes estadísticos de control

Análisis del punto no pérdida-no ganancia

Reportes especiales de control

Auditoría Interna

- 22.- El presupuesto es el \_\_\_\_\_ de control que se utiliza con más frecuencia. Cuando el presupuesto sirve para corregir y revisar el trabajo que se está ejecutando forma parte del proceso de \_\_\_\_\_ mientras que su determinación como recurso para el logro de objetivos lo hace parte del proceso de la función \_\_\_\_\_
- 23.- El presupuesto entonces es de gran importancia como dispositivo de \_\_\_\_\_ y como parte integrante del proceso de la \_\_\_\_\_. La definición del estándar costo es base común para coordinar las actividades de la empresa y forma parte del dispositivo \_\_\_\_\_
- 24.- El dispositivo que se basa en la determinación de los costos, es el de \_\_\_\_\_. Pero el dar importancia a la reducción de costos solamente, puede tener como consecuencia que esto afecte al estándar (cantidad/calidad/uso del tiempo) \_\_\_\_\_
- 25.- El segundo dispositivo de control consiste en la elaboración de reportes periódicos de las actividades realizadas, con el fin de estudiar la historia de la marcha de la empresa y es lo que implican los \_\_\_\_\_
- 26.- El hecho de que los informes \_\_\_\_\_ de control sirvan de base para que se les compare con otros informes previos, significa que es importante que se elaboren en forma \_\_\_\_\_ (continua/no continua) \_\_\_\_\_
- 27.- El análisis del punto no pérdida no ganancia es otro de los \_\_\_\_\_ que más se usa. El uso de gráficas que muestran el porcentaje de utilización de una planta contra ingresos y gastos pueden utilizarse para el análisis del punto \_\_\_\_\_
- 28.- La determinación de las utilidades o pérdidas de la empresa, es otro ejemplo de lo que se puede lograr al utilizar el dispositivo de \_\_\_\_\_
- dispositivo
- control
- planeación
- control
- planeación
- presupuesto
- presupuesto
- calidad
- informes estadísticos
- estadísticos
- continua
- dispositivos de control
- no pérdida - no ganancia
- análisis del punto no pérdida no ganancia

29.- Los reportes especiales de control son el -  
cuarto dispositivo de \_\_\_\_\_ . Estos-  
\_\_\_\_\_ son  
los que investigan casos particulares en un tiem-  
po y lugar definido.

control, repor-  
tes especiales

30.- De acuerdo a lo anterior estos reportes se  
realizan en forma (continua/no continua) \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ y por el hecho de referirse a  
situaciones particulares donde se presume existe  
alguna desviación, constituyen una aplicación di-  
recta del Principio de \_\_\_\_\_ .

no continua

excepción.

31.- Cuando se realizan investigaciones periódic-  
as, sobre actividades generales se está utilizan-  
do el dispositivo de \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ de control. En cambio in-  
vestigaciones acerca de los procedimientos, fun-  
cionamiento de un área específica de trabajo se-  
usan para elaborar \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ .

informes es-  
tadísticos

reportes  
especiales

32.- El último dispositivo de control mencionado  
es el de la \_\_\_\_\_ interna. Así por  
ejemplo cuando la central de adiestramiento del  
personal revisa las operaciones de las unidades  
subsidiarias se está llevando a cabo una \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ .

auditoría

auditoría  
interna

33.- Los cinco \_\_\_\_\_  
son: presupuesto, informes estadísticos de con-  
trol, análisis del punto no pérdida-no ganancia,  
reportes especiales de control y auditoría interna.

dispositivos  
de control

34.- Los dos dispositivos que tienen que ver con  
los análisis monetarios, costos y flujo de fondos  
son: \_\_\_\_\_ y el \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ .

presupuesto,  
análisis del punto  
no pérdida-no ga-  
nancia

35.- El dispositivo que se elabora en forma no -  
continua y que está relacionado con el Principio  
de Excepción es el de \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ de control.

reportes  
especiales

36.- Los dispositivos que se realizan en áreas -  
extensas y en forma más o menos periódica son:  
la \_\_\_\_\_ y los \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ de control.

auditoría interna,  
informes estadís-  
ticos

37.- Para que en toda empresa no se pierda la continuidad en el flujo de las actividades es necesario que se utilicen como forma de control, los \_\_\_\_\_ antes mencionados.

dispositivos

## 2.- SISTEMAS DE CONTROL Y CONTROL DE LA ACTUACION HUMANA

38.- Los sistemas de control son aquellos que se utilizan para determinar si los objetivos y metas de la organización definidos en la función \_\_\_\_\_ se están ejecutando correctamente. Dichos sistemas se auxilian de los \_\_\_\_\_ de control para cumplir su cometido.

planeación

dispositivos

39.- El control centralizado es el \_\_\_\_\_ de control que se lleva a cabo en áreas específicas de una empresa. Así el control de presupuestos departamentales a cargo del staff de finanzas es lo que constituiría un \_\_\_\_\_

sistema

control centralizado.

40.- El control personal es el que incluye el chequeo y correcciones que realiza un supervisor a un trabajador o grupo de ellos. Así el sistema de control que se realiza en áreas más específicas y es de primera línea primordialmente es el de control \_\_\_\_\_

personal

41.- Los sistemas de \_\_\_\_\_ y control \_\_\_\_\_ son los que se deben ejercer de acuerdo a las teorías clásicas de la Administración. Es lógico pensar que los datos así obtenidos fluyen hasta (los niveles superiores/los niveles más bajos) \_\_\_\_\_

control centralizado personal

los niveles superiores

42.- El tercer sistema es el auto-control. El individuo que instituye cambios en sus propios métodos de trabajo con el fin de lograr mayor éxito está practicando el \_\_\_\_\_

auto-control

43.- La supervisión realizada por los niveles altos de la empresa sobre áreas extensas de trabajo es lo que implica un \_\_\_\_\_ . El perfeccionamiento del individuo debido a un supervisor que chequea su trabajo constituye la meta a alcanzar del \_\_\_\_\_ . El deseo de superación personal, la automotivación y la iniciativa del individuo para ir perfeccionando sus métodos de trabajo son consecuencia del \_\_\_\_\_ .

control centralizado

control personal

auto-control

44.- Desde el punto de vista de la Teoría y (unidad anterior) el sistema de control mejor es el \_\_\_\_\_ . Según la Teoría X que establece que el hombre es incapaz de lograr nada por sí mismo, sería necesario el uso de los controles \_\_\_\_\_ y \_\_\_\_\_ .

auto-control

centralizado personal

45.- Porque fomenta el sentido de responsabilidad y brinda una cierta libertad en la elección de los métodos de trabajo y estrategias a seguir el sistema de control ideal sería el \_\_\_\_\_ .

auto-control

#### CONSECUENCIA DE LA APLICACION DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

46.- El éxito de los \_\_\_\_\_ de control se basa, en que sean aceptados por los individuos a quienes se aplica. Por desgracia los estudios del comportamiento humano han demostrado que el hombre generalmente (acepta/rechaza), \_\_\_\_\_ los sistemas de control.

sistemas

rechaza

47.- Los sistemas de control producen en el hombre un rechazo que se traduce en un incumplimiento del deber. El \_\_\_\_\_ o resistencia a dichos sistemas se debe generalmente a las siguientes causas:

rechazo

1) El control tiende a romper la imagen propia de la persona.

2) El no aceptar los objetivos de la empresa.

3) La creencia de que los estándares exigidos son demasiado altos.

- 62.- El cumplimiento del deber, según se dijo en el cuadro 59, se logra con sentido de \_\_\_\_\_ a la causa y ello se logra cuando el individuo logre la \_\_\_\_\_ de las metas u objetivos.
- 63.- Mayor será la \_\_\_\_\_ a la causa cuando más compatibles sean las \_\_\_\_\_ u \_\_\_\_\_ de la empresa con los sentimientos, inquietudes, aspiraciones y necesidades del hombre que en ella trabaja.
- 64.- Teniendo en mente estas ideas, se puede entrar al estudio de lo que está constituyendo el sistema de control moderno y que se basa en lograr una mayor \_\_\_\_\_ a alcanzar las metas y objetivos de la empresa. A este sistema se le conoce por sistema orgánico de control.
- 65.- El sistema \_\_\_\_\_ de control viene siendo la forma de promover una mayor \_\_\_\_\_ a la causa de la empresa basado en la idea de que imponiendo a los demás determinados objetivos y normas atractivas se logra su aceptación.
- 66.- El establecimiento de los \_\_\_\_\_ y las \_\_\_\_\_ debe hacerse en base a una exploración conjunta y abierta de la realidad. Así la exposición y discusión de los criterios de la empresa para competir con éxito en cualquier ocasión son la base para el \_\_\_\_\_ de los objetivos y las normas.
- 67.- Esto puede parecer engorroso y lento, pero se basan en la convicción de que el tiempo empleado en lograr la identificación de los objetivos, actividad propia de la función \_\_\_\_\_ estará compensado de sobra con el tiempo que se ahorrará en la solución de problemas posteriores.
- 68.- Así definidos en forma concreta y conjunta todos los objetivos, metas y normas a seguir y por haber sido determinados con el concurso de todos los miembros de la empresa, teniendo en cuenta todos los puntos de vista y sugerencias, será (fácil/difícil) \_\_\_\_\_ poderse dedicar por entero a la causa.

dedicación

percepción

dedicación

metas

objetivos

dedicación

orgánico

dedicación

objetivos

normas

establecimiento.

planeación

fácil

69.- El sistema orgánico de control basado en lo antes expuesto tendría una aplicación (igual/muy distinta) \_\_\_\_\_ a los sistemas convencionales, ya que si se ha logrado la entera \_\_\_\_\_ al logro de los \_\_\_\_\_, lo primero, para realizar un \_\_\_\_\_ efectivo, será proporcionar ayuda a los subsistemas (departamentos) en su esfuerzo por alcanzar los niveles acordados en común.

muy distinta

dedicación  
objetivos  
control

70.- La función de las unidades administrativas en el sistema \_\_\_\_\_ será la de proporcionar a cada uno de los niveles de la empresa la información relativa a su funcionamiento para que pueda utilizarla a este fin.

organico de  
control

71.- Así cada subsistema tendrá que dar cuenta de sus actividades al sistema inmediato superior, periódicamente indicando el desarrollo alcanzado, la exposición de los problemas encontrados y de los planes para resolverlos. Ello elimina la utilización de grupos especiales de control que hacen (más caro/más barato) \_\_\_\_\_ el control.

más caro

72.- Con ello también se evita en gran parte la vigilancia directa, en el sentido estricto de la palabra, ya que el problema no consiste en obtener un cumplimiento pasivo, sino en capacitar a todas las secciones a lograr los \_\_\_\_\_ propuestos.

objetivos

73.- Así el sistema \_\_\_\_\_, motiva al empleado a ir corrigiendo sus errores y a ejercer sobre sí mismo un \_\_\_\_\_ control de sus movimientos. El auto-control es la mejor manera de responsabilizar al individuo y lograr el \_\_\_\_\_ de su deber y su mayor \_\_\_\_\_ a partir de alcanzar los objetivos de la empresa.

organico de  
control

auto

cumplimiento  
dedicación

74.- El \_\_\_\_\_ control desarrollado en base al estudio de situaciones particulares, producido, a su vez de las necesidades e inquietudes del individuo y que se ejerce por medio de informes de subsistemas al sistema superior, a base de confianza y sinceridad es lo que constituye el \_\_\_\_\_ de control.

auto

sistema organico

4) No gustarle que se asigne el control a determinados grupos de la organización.

48.- El hecho de que la mayoría de los reportes o informes de control, acusan sólo las deficiencias en la actuación de la persona, hacen que sean (aceptados/rechazados) \_\_\_\_\_ ya que tienden a \_\_\_\_\_ la imagen de la propia persona.

rechazados  
romper

49.- Ahora suponiendo que el individuo acepta el control como un medio para corregir sus deficiencias es necesario, además, que los objetivos de los sistemas de control le hagan sentir que valen la pena.

(sin respuesta)

50.- Así otra de las razones por las que se rechazan los sistemas de control es porque exista incompatibilidad entre los \_\_\_\_\_ de la persona y los de la organización.

objetivos

51.- Si un empleado siente que lo que le están exigiendo es demasiado para sus aptitudes o habilidades, puede deberse a que los \_\_\_\_\_ son muy altos y por ello (admite/no admite) \_\_\_\_\_ que se le controle.

estándares

no admite

52.- Por ejemplo la fijación de volúmenes de venta a un vendedor basados en su desempeño anterior es más fácilmente (aceptada/rechazada) \_\_\_\_\_ que si se aplica un volumen estándar sin tener en cuenta la experiencia.

aceptada

53.- Se estableció que un individuo rechaza los \_\_\_\_\_ de control cuando no le gusta, que para tal efecto, hayan asignado a un determinado \_\_\_\_\_. Es de esperarse que un control ejercido por los mismos compañeros se (acepta/rechaza) \_\_\_\_\_ en tanto que un control proveniente de un staff de "afuera" sea aceptado/rechazado) \_\_\_\_\_

sistemas

grupo

acepta

rechazado

54.- Se han visto hasta ahora, las razones por las que se \_\_\_\_\_ un sistema de control, que trae como consecuencia un incumplimiento del deber. Un individuo no cumple con su \_\_\_\_\_ ante la percepción del deber.

rechaza

deber

55.- Cuando aquellos a quienes se aplica un sistema de control sienten que éste constituye una amenaza para ellos, se dice que hay \_\_\_\_\_

percepción del peligro

56.- La percepción del \_\_\_\_\_ nace cuando se insiste en el castigo en vez de la ayuda y del apoyo para alcanzar las metas y/o los \_\_\_\_\_ cuando existe falta de confianza en las relaciones entre superior y subordinado, personal staff y de línea, etc.

peligro

objetivos

57.- Las amenazas y castigos, así como la falta de confianza o comunicación entre los jefes y los \_\_\_\_\_ es lo que hace que aparezca la \_\_\_\_\_ y con ello la falta de \_\_\_\_\_ del deber.

subordinados  
percepción del peligro  
cumplimiento

58.- Se puede concluir que los sistemas de control tienden a provocar y a acentuar la conducta que tratan de evitar que es la falta de \_\_\_\_\_ la razón de ello es que las presiones para cumplir con el deber en una atmósfera de falta de \_\_\_\_\_ en las relaciones y de castigos hacen percibir el \_\_\_\_\_.

cumplimiento del deber

confianza  
peligro

59.- Desgraciadamente la ausencia del peligro no garantiza el cumplimiento del \_\_\_\_\_. El cumplimiento del deber puede lograrse con sentido de dedicación a la causa.

deber

60.- Como ya vimos el objeto de todo control es lograr la determinación de un \_\_\_\_\_ o patrón para evaluar el trabajo. Entonces el éxito del control consiste en la determinación del nivel del estándar apropiado, ni muy alto porque puede ser inalcanzable y por ello \_\_\_\_\_ ni tan bajo que no se logran las metas y los \_\_\_\_\_ organizacionales.

estándar

rechazados

objetivos

61.- Sin embargo la reacción favorable del individuo no estará determinada por la meta-objetivo en sí sino por la percepción que de ella tenga de acuerdo a sus sentimientos, necesidades y actitudes de ahí que el estudio de las Ciencias del \_\_\_\_\_ humano son básicas en la administración.

comportamiento

## CONTROL DE CANTIDADES

El controlar las cantidades es muy usual en la Industria de la Construcción. Conocida desde la planeación la cantidad de una obra determinada por unidad de tiempo (hora, día, mes) que se requiere producir es muy fácil utilizar esa cantidad planeada como estándar. A medida que se desarrolla la obra pueden irse afinando los estándares.

En el proceso de planeación se determina primero un estándar ideal o teórico, esto es la cantidad de obra que puede producirse con un 100% de eficiencia, luego se aplican factores producto de la experiencia para llegar al estándar práctico, o de otra manera, si se tienen datos estadísticos de obras anteriores con el mismo proceso productivo pueden tomarse estos datos para determinar los estándares reales o prácticos.

Establecidos los estándares por unidad de tiempo se procede a establecer los puntos de control; normalmente se van controlando las cantidades por lapsos acordes con el control contable de la obra. Así pueden establecerse controles diarios, semanales o mensuales.

La ventaja de ligar el control de cantidades a la contabilidad de costos es que se tendrán puntos de control iguales para cantidades y costos lo cual es muy útil puesto que la producción real en un determinado plazo junto con el costo real nos dará el costo por unidad de obra ejecutada que es un dato que interesa primordialmente al constructor.

Otra característica del control de cantidades es que los puntos de control son diferentes dependiendo del nivel jerárquico que toma decisiones usando el control. Así por ejemplo en una planta de agregados el jefe de la planta recibe un informe de producción por turno, el superintendente de pavimentación recibiría un informe condensado de producción semanal y el superintendente general este mismo informe pero mensual. Esto sucede desde luego si no hay desviaciones significativas. Si las hay el sistema de control debe ser capaz de alertar hasta un nivel que pueda tomar las decisiones que corrijan aquellas fallas del proceso que estaban provocando una falta de producción respecto a los estándares.

Esto se hace en diferentes formas. El superintendente de pavimentación puede por ejemplo decirle al jefe de la planta que debe avisarle si la producción de cualquier turno de 8 hrs. es inferior un 10% al estándar por turno. El superintendente general podrá enterarse si la producción semanal es 10% inferior al estándar semanal. Esto desde luego facilita la operación organizada de control.

Es muy común que al reporte de control se le añadan una serie de datos estadísticos que sirvan para tomar decisiones en caso de que exista alguna desviación.

Si siguiendo el ejemplo de la planta de agregados el reporte debería contener aquellos datos que permitan conocer las causas de alguna posible desviación. Por ejemplo el número de horas paradas de la máquina por cualquier causa indicando dichas causas o no, demoras causadas por deficiencias en el suministro, deficiencias en el almacenamiento, fallas en el personal, etc.

Si todos estos datos se llevan a lo largo del trabajo esto permitirá que además de llevar el control y facilitarse las decisiones se pueda revisar periódicamente las causas de las demoras para poder, por ejemplo, replanear el proceso o si es conveniente, fijar estándares más altos en beneficio de la economía de la obra modificando el proceso completo, parte del proceso o simplemente aumentando el estándar en función de la experiencia acumulada si parece lo indicado.

En realidad el control es un proceso de retroalimentación, este es, un sistema que toma muestras, las compara con el estándar y en caso de desviaciones significativas actúa sobre el proceso de producción para regresarlos a la producción planeada.

El reporte de control permite pues a los diferentes funcionarios que manejan el proceso tomar decisiones. Estas decisiones son de diferente tipo y podríamos dividirlos en dos:

- a) Decisiones de Emergencia.
- b) Decisiones Preventivas.

Como ejemplo de decisiones de emergencia podría mencionarse el hecho de que una máquina trituradora tenga problemas mecánicos y esto origine una producción inferior al estándar. Otro ejemplo sería que una máquina se descomponga por rotura de una pieza. En estos casos la decisión inmediata será proceder a la reparación.

Como ejemplo de decisión preventiva puede mencionarse la siguiente: las horas perdidas por descompostura de una máquina, tienen tendencia a aumentar. Analizando la causa pueden presentarse varios casos:

- a) La máquina está fuera de la vida económica
- b) El mantenimiento es defectuoso
- c) La operación es defectuosa
- d) Algún mecanismo de la obra tiene un efecto importante

El atacar este problema y tomar decisiones respecto a él sería una decisión preventiva si se toma antes de que ésta causa de demora provoque que la producción quede abajo del estándar.

Es costumbre que para poder tomar estas acciones preventivas se usen cartas de control, que indiquen en forma gráfica y durante lapos grandes las variaciones reales del comportamiento de la producción, demoras, etc.



## CONTROL DE COSTOS

Este sistema de control es muy usual en lo que a construcción -- se refiere, ligado íntimamente al control de cantidades como ya se indicó.

Este control consiste en ordenar en diferentes cuentas los costos correspondientes a los insumos que se van utilizando en la obra.

El conjunto de estas cuentas se denomina catálogo de cuentas de costos, y pueden dividirse de acuerdo con las necesidades del control. Así por ejemplo puede llevarse una cuenta de costos para producción -- de agregados, otra cuenta de costos para elaboración de concreto asfáltico, una más para colocación de concreto revestido, etc., es usual que se subdividan estas cuentas de costos en sub cuentas, en función -- del tipo de insumo, así pues cada una de estas cuentas podría llevar -- las siguientes sub cuentas :

- a) Obra de Mano
- b) Materiales
- c) Maquinaria
- d) Acarreos
- e) Destajistas

El control de costos compara las cantidades erogadas por cada -- una de las cuentas y sub cuentas con las supuestas y cuando hay una -- desviación importante, tomará una decisión para corregir esta desvia -- ción.

El estándar en el caso de control de costos puede elaborarse a -- base de presupuestos mensuales o, relacionando un control de cantida -- des con el de costos en base a los costos unitarios supuestos en la pla -- neación.

Así por ejemplo se puede presuponer cuánto se va a gastar en -- una determinada empresa por concepto de maquinaria para agregados, y usar esta cantidad como estándar y contra ella comparar el costo -- real. Puede también fijarse un costo unitario como estándar por m<sup>3</sup> -- de agregado por ejemplo y con los datos reales de cantidades de costos dividiendo la cantidad erogada realmente en el mes entre la cantidad -- producida realmente en el mes en m<sup>3</sup> tendríamos el costo unitario real que se compararía con un costo unitario supuesto. En ambos casos; -- si hay desviaciones se deberá contar con un mecanismo en la organiza -- ción de la obra que tome decisiones de inmediato para corregir las de -- ficiencias que presente el mecanismo de producción, con objeto de ha -- cer que el costo real sea igual o menor que un costo estimado.

La información del control de costos se puede presentar en base a listados que nos indican las cantidades realmente erogadas en cada una de las cuentas y sub cuentas, se puede presentar en gráficas, o pueden presentarse exclusivamente aquellos costos que se disparan del presupuesto (control por excepción).

Como se puede ver estas cuentas de costos pueden sofisticarse y pueden ampliarse hasta llegar a un control muy detallado. La experiencia en construcción indica que es muy difícil llegar a un gran detalle ya que normalmente en los datos de campo se originan errores que hacen inútil este control tan detallado. Es más frecuente que se tengan cuentas por actividades generales y en caso de tener que tomar una decisión se hace un análisis de detalle de esa cuenta particular dividiéndola con el criterio del ingeniero en sub cuentas.

La contabilidad de costos implica una buena organización contable de la obra, ya que esta contabilidad de costos deberá estar ligada a la contabilidad general de la empresa para que dé siempre datos reales.

Desde luego se deberán llevar cuentas de los costos directos, así como de indirectos y gastos generales de la empresa con objeto de tener siempre un panorama completo y tomar decisiones que conduzcan a la obra y a la empresa al objetivo cuantitativo predefinido.

Los estándares deben modificarse y revisarse continuamente, ya que es muy frecuente que haya variaciones en el proyecto en las cantidades de obra y en los métodos de construcción que evidentemente modifican el estándar.

Para llevar adecuadamente el control de costos es indispensable que el ingeniero que hace uso de este control tenga conocimientos básicos de contabilidad, lo que le permitirá interpretar adecuadamente los resultados de las diferentes cuentas que tiene que supervisar.

Existen diferentes métodos para llevar el control de costos, que usan desde sistemas manuales hasta computadoras electrónicas, en general el uso de computadoras está restringido a aquellas áreas de trabajo en donde se tenga una máquina cercana, ya que la transmisión de datos masivos por teléfono o radio no ha sido resuelta satisfactoriamente en México. Esto es muy importante ya que la información debe ser oportuna para que las decisiones que se tienen que tomar en base a esa información también lo sean.

## CONTROL PRESUPUESTAL

El control presupuestal permite llevar el control de cantidades y costos al mismo tiempo, y desde luego permite tomar las decisiones que se requieran tanto en el área de producción como en otras áreas tales como compras, manejo financiero, cobranzas, etc.

Para poder llevar un control presupuestal se requieren los siguientes requisitos.

Un sistema de planeación que permita la elaboración de un presupuesto completo que servirá de estándar para el control.

Un sistema idóneo de contabilidad y costos de la empresa.

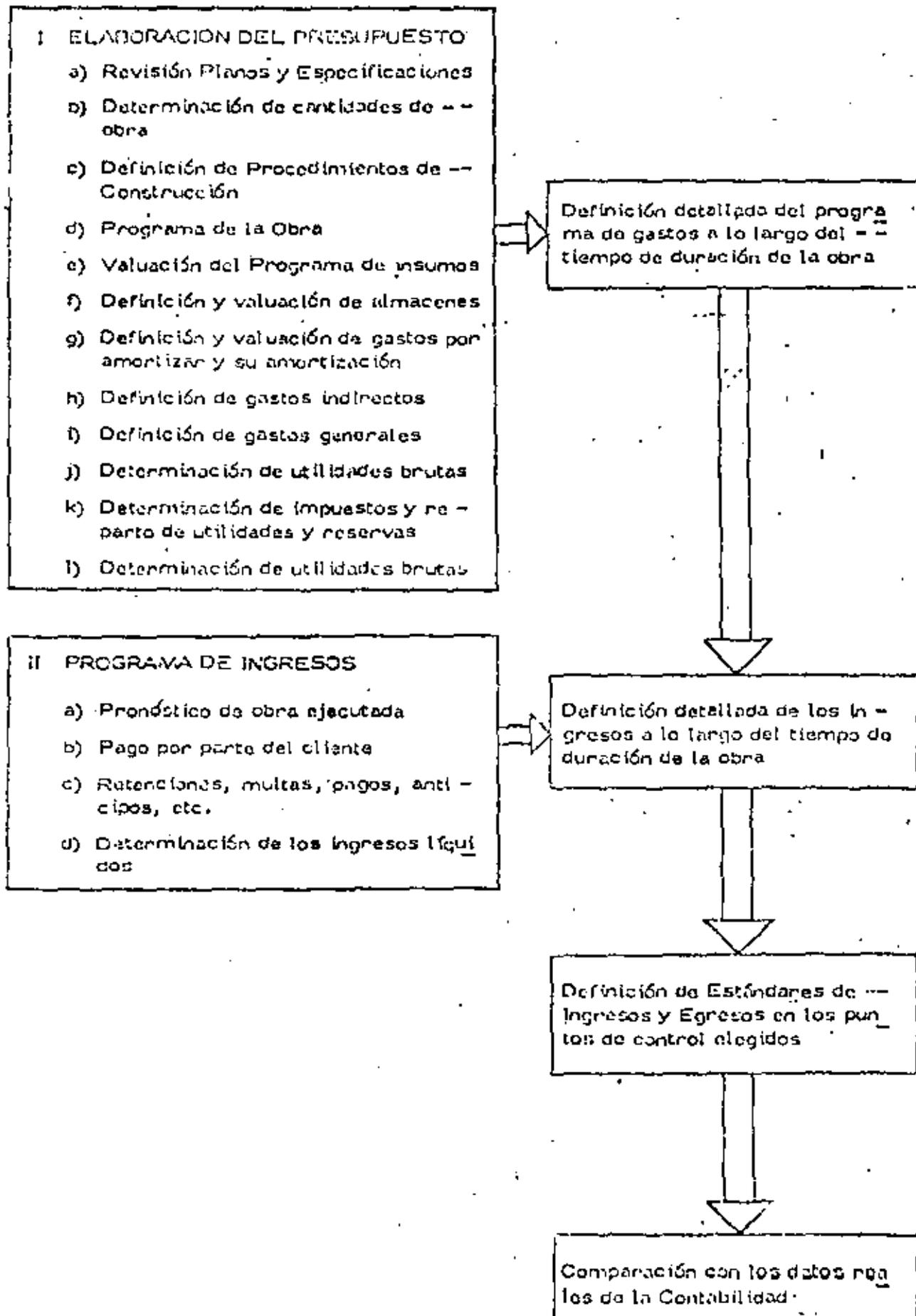
En general puede decirse que un sistema integrado de control presupuestal en una empresa de construcción tiene limitaciones e inconvenientes que algunas veces anulan a las indudables ventajas que tiene el sistema.

Entre los inconvenientes que presenta pueden mencionarse :

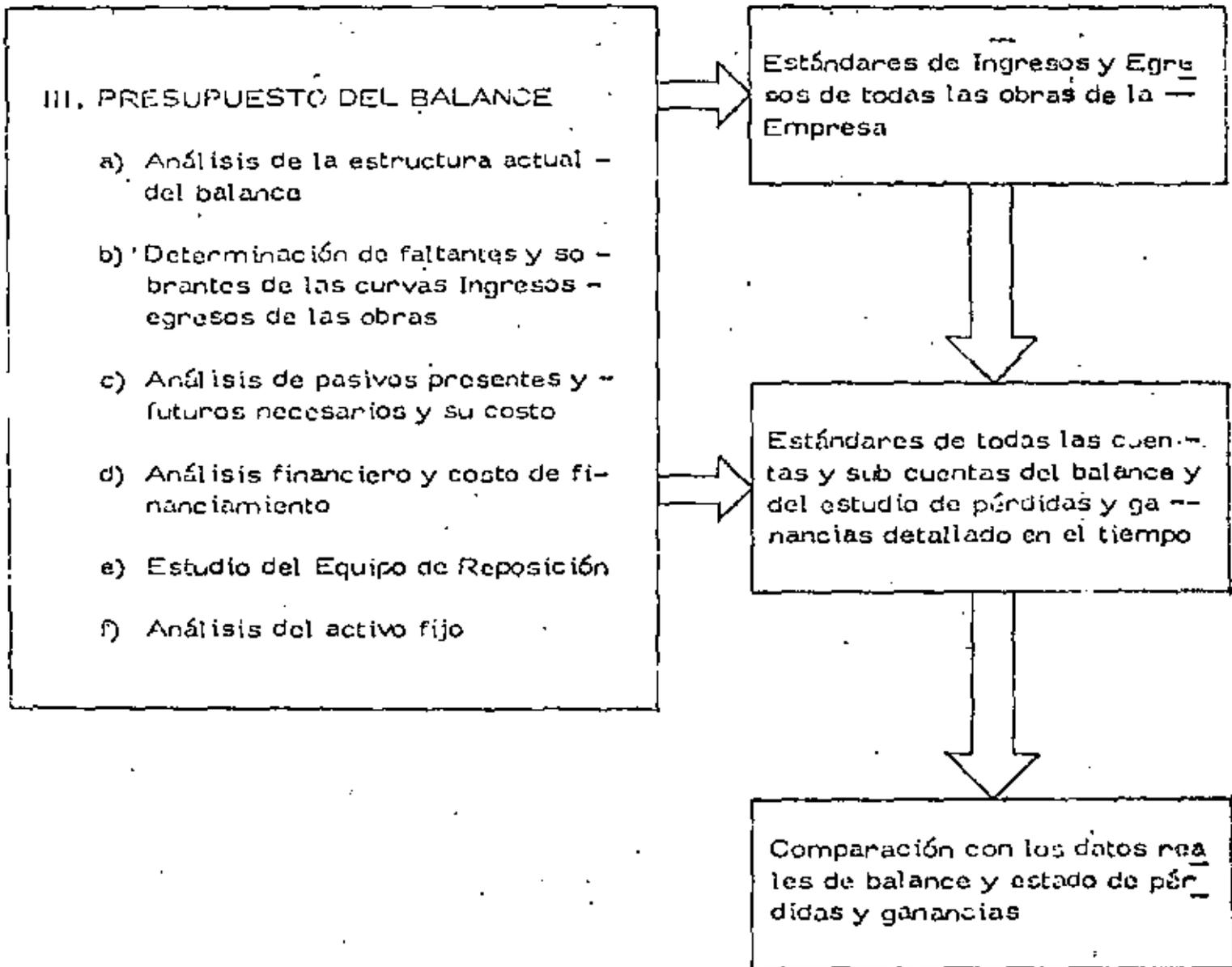
- a) Los presupuestos deben modificarse continuamente debido a las variaciones en programas y volúmenes que tienen la mayor parte de las obras de construcción en nuestro país.
- b) Al implantar el sistema no se deben esperar resultados completos a corto plazo.
- c) Existen obstáculos psicológicos importantes, pues el cambio de sistema significa una modificación en los hábitos del personal.

Existen gran número de procedimientos diferentes para llevar el control presupuestal, desde sistemas que se operan manualmente hasta los que hacen uso de las computadoras.

El control presupuestal a nivel de obra podría definirse como sigue:



El control presupuestal a nivel de empresa podría esquematizarse así:



Como en los casos anteriores desviaciones significativas originan de inmediato decisiones correctivas.

### CORRECCION DE DESVIACIONES

El establecimiento de los medios adecuados para corregir las desviaciones de los estándares es probablemente la etapa más importante de todo control.

Si el "aviso" no es oportuno y no llega rápidamente a la persona capaz de tomar las decisiones correctivas se pierden total o parcialmente las ventajas del control.

La empresa puede mejorar sistemas de construcción, modificar su organización para definir mejor las funciones y responsabilidades de cada puesto, mejorando así la coordinación de sus actividades, o modificar los sistemas de dirección de la empresa, en función de los reportes de control debidamente evaluados.

Como consecuencia del control de costos, puede reducirse la inversión real y mejorar la rentabilidad de la obra, o aumentar los beneficios del contratista, generalmente muy por encima del gasto necesario para ejercer el control. Cuando la decisión para ejecutar una obra se ha basado en hipótesis falsas respecto a los costos, el control de éstos generalmente revela prontamente este hecho, permitiendo así una oportuna reevaluación y corrección de los planes. Por supuesto que el control de costos no puede corregir los defectos en los estimados de costos, pero la misma experiencia derivada del control permitirá realizar estimados cada vez mejores.

### REQUISITOS DE UN SISTEMA DE CONTROL DE COSTOS, DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA EMPRESA CONSTRUCTORA.

Los textos de administración señalan diversas exigencias para que un sistema de control opere adecuadamente. Se analizará cada una de ellas con referencia especial al control de los costos.

Los controles deben reflejar la naturaleza y las necesidades de la actividad. El sistema para controlar los costos de ingeniería de proyecto será indudablemente distinto del que se use para controlar los costos de construcción. Los sistemas e instrumentos adecuados para controlar los costos de construcción de una planta industrial son diferentes de los que deben usarse en la construcción de una presa. Los costos de operación y mantenimiento requieren

procedimientos de control especiales, y lo mismo puede decirse de los costos de producción en serie. Por lo tanto, los catálogos de cuentas de costos y los sistemas de información correspondientes tienen que diseñarse para las necesidades de cada empresa y las características de cada tipo de obras.

2. Los controles deben indicar rápidamente las desviaciones.

Ya se hizo notar anteriormente la importancia del "tiempo de respuesta" de un sistema de control. Los sistemas de contabilidad tradicionales generalmente tienen un tiempo de respuesta exageradamente largo; debido a que tienen que satisfacer diversos requisitos legales, además de servir para el control financiero de la empresa, deben ser meticulosamente exactos y reportar únicamente transacciones completamente terminadas y debidamente documentadas. Por lo tanto, su funcionamiento es lento y un tanto inflexible. El control de los costos requiere el establecimiento de un sistema de información más ágil y flexible, que permita conocer rápidamente las desviaciones de los planes y apreciar con igual rapidez los efectos de las medidas correctivas. El procesamiento electrónico de datos constituye una valiosa herramienta para lograr sistemas de control de respuesta rápida. Es importante, sin embargo, que exista una fuente de datos común para el sistema contable y el de control de costos, de tal manera que exista armonía y complementación entre ellos.

3. Los controles deben mirar hacia adelante. A este respecto debe también señalarse que los sistemas contables están generalmente orientados al pasado, es decir, tienen el carácter de registros de las transacciones realizadas en el pasado. Por lo tanto, se concluye como en el punto anterior, que es necesario establecer sistemas de control de costos orientados al futuro o lo que es lo mismo, capaces de predecir las consecuencias de las desviaciones de los planes. Los sistemas de programación y control de obras por redes de actividades constituyen instrumentos idóneos para proyectar hacia el futuro el efecto de las desviaciones presentes.

4. Los controles deben señalar las excepciones en los puntos estratégicos. Se hace referencia aquí al principio de control por excepción, según el cual el ejecutivo debe concentrar su atención en los casos de excepción, es decir, en aquellos en que lo logrado se aparta de las normas o planes establecidos. Los sistemas de programación por ruta crítica, al señalar claramente la secuencia de actividades cuyo cumplimiento es crítico para la consecución de la meta pre-fijada, facilitan la identificación de los puntos estratégicos. Para poder apreciar las desviaciones significativas en los costos, es indispensable que los presupuestos-

y estimados de costo sean: entonamente congruentes con el programa de obra aprobado, y se elaboren mediante un análisis de las secuencias de operaciones por realizar. Podrá así advertirse fácilmente cuándo el costo se aparta en forma inconveniente del presupuesto y de los estándares prefijados.

5. Los controles deben ser objetivos. Es necesario subrayar aquí nuevamente la importancia de basar el control de costos en un buen estimado de costo. Sin él, la apreciación que pueda hacerse respecto a los costos observados en la obra se convierte en un proceso totalmente subjetivo y de escasa significación. Cuando el estimado de costo se integra con el programa de obra, de tal manera que se fija un costo directo para cada actividad, el control de costos adquiere máxima objetividad y oportunidad.
6. Los controles deben ser flexibles. Con frecuencia, diversas circunstancias fuera de control del ejecutivo hacen que se tenga que cambiar los planes. Los sistemas de control de costos deben poder adaptarse fácilmente a estos cambios sin perder su validez y utilidad. Sucede en ocasiones que al elaborar un programa por CPM, se pretende darle un carácter estático e inflexible, que lo hace obsoleto rápidamente, debido a que no se ha previsto su frecuente revisión y actualización, de acuerdo con los cambios impuestos por las circunstancias. Los estimados de costo deben mantenerse consecuentemente actualizados para que siempre se ñalen en forma realista las metas alcanzables.
7. Los controles deben reflejar el modelo de organización. En toda buena organización las responsabilidades de los diferentes niveles ejecutivos y de los diferentes puestos están perfectamente definidos. Es indispensable que los sistemas de control provean a cada ejecutivo de una información congruente con sus responsabilidades. Se infiere la necesidad de establecer reportes de costos adecuados a cada nivel administrativo. Así por ejemplo, el reporte que reciba el responsable de una fase de la obra será más detallado y más específico que el que reciba el superintendente general de la misma, y el que éste reciba, más detallado y menos general que el que se dé al gerente de la empresa constructora.
8. Los controles deben ser económicos. Deben distinguirse claramente el volumen de información y el valor de la información. Dar mayor número de datos no significa necesariamente mejorar la información; por el contrario, en muchas ocasiones el exceso de información provoca incertidumbre, indecisión e incapacidad para interpretar adecuadamente la gran cantidad de datos que se reciben. Por lo tanto, hay que establecer un equilibrio adecua-

do entre la cantidad de datos que conviene generar y el costo de procesarlos y distribuirlos para convertirlos en información utilizable. En general sólo debe proporcionarse la información indispensable para que cada ejecutivo pueda tomar las decisiones que le competen.

9. Los controles deben ser comprensibles. Los reportes de costos deben tener siempre una interpretación fácil y presentarse en forma inmediatamente utilizable. Resultan de poca utilidad los datos de costos que el ejecutivo deba todavía procesar y analizar para que adquieran significado.
10. Los controles deben indicar una acción correctiva. Ya se expresó anteriormente que si no hay acción correctiva no existe control. Por lo tanto, los informes de costos deben presentarse de tal manera que se puedan apreciar claramente las causas de las desviaciones, los responsables de las mismas y las medidas que puedan adoptarse para corregirlas.



P R O B L E M A

13

ESTUDIAR LOS SISTEMAS DE CONTROL PARA  
UNA PLANTA DE TRITURACION



La Planta de que trata el problema se ilustra en la figura # 1. Es una Planta para producir material para pavimentación y consta de una trituradora primaria, una secundaria y una terciaria, todas montadas sobre molques. Existen cinco bandas que las unen y colocan el material en montones.

Los motores son eléctricos y se abastecen de energía mediante una planta de fuerza con motor diesel con capacidad de 600 K.V.A.

#### 1. Control de Cantidades.

Para definir mi control debo principiar por fijar mi estándar, es decir la producción esperada. Para determinarlo tengo el dato dado por el fabricante, que en el caso de mi sistema es de 90 ton. de 2000 lbs/por hora igual a 81.72 toneladas métricas. Además debo suponer una eficiencia del conjunto, que en este caso fijo en 0.70. Con estos datos tengo, suponiendo un peso volumétrico de  $1.5 \text{ ton/m}^3$

##### a) Producción horaria

$$Ph = \frac{81.72}{1.5} \times 0.70 = 38 \text{ m}^3/\text{h}$$

##### b) Producción diaria

$$38 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 15.5 \frac{\text{h}}{\text{día}} = 589 \text{ m}^3/\text{día}$$

##### c) Producción mensual

$$589 \times 25 \frac{\text{día}}{\text{mes}} = 14725 \text{ m}^3/\text{día}$$

Para controlar la producción podría por ejemplo usar la gráfica - que se muestra en la figura # 2.

La línea llena corresponde a la producción esperada mensual. Con línea punteada se muestra la producción real, ambas acumuladas en el mes.

Algunas veces el estándar por mes no es igual, ya que se podría suponer una eficiencia más baja al principio, los estándares de los primeros meses podrían bajar, pero el sistema es el mismo.

También puede usarse una carta de control, como se muestra en la figura # 2A en la que fija la producción deseada, las producciones diaria y la media, que puede ser del mes o acumulada.

Si la producción real no es igual a la producción esperada, es necesario analizar las causas y tomar decisiones para corregir aquellos defectos que impiden que la producción sea la planeada.

Un tipo de reporte diario y semanal que se muestra en las figuras 3 y 4, que analiza la producción por hora efectiva, las horas efectivas -- trabajadas y las causas de demoras nos ayudará efectivamente a definir las causas y tomar acciones correctivas.

Viendo el informe de la producción semanal vemos que la producción por hora efectiva está bien, e inclusive ligeramente superior al dato del fabricante,  $(54.5 \text{ m}^3/\text{h}) = 81.72/1.5$ . Por lo que podemos enfocar el problema como defecto en el número de horas trabajadas.

A la vez analizando las horas perdidas podríamos analizar primero - las que implican un mayor porcentaje, que serían las reparaciones de la criba y las piedras atoradas. De inmediato podrían tomarse decisiones para corregir estas anomalías aumentando así el número de horas trabajadas.

Este tipo de reportes, que pueden diseñarse para cada actividad de construcción son de gran ayuda para el control y toma de decisiones posteriores. Sin estos datos es frecuente que se tomen decisiones erróneas por falta de información fehaciente y oportuna.

INSTALACION PORTATIL

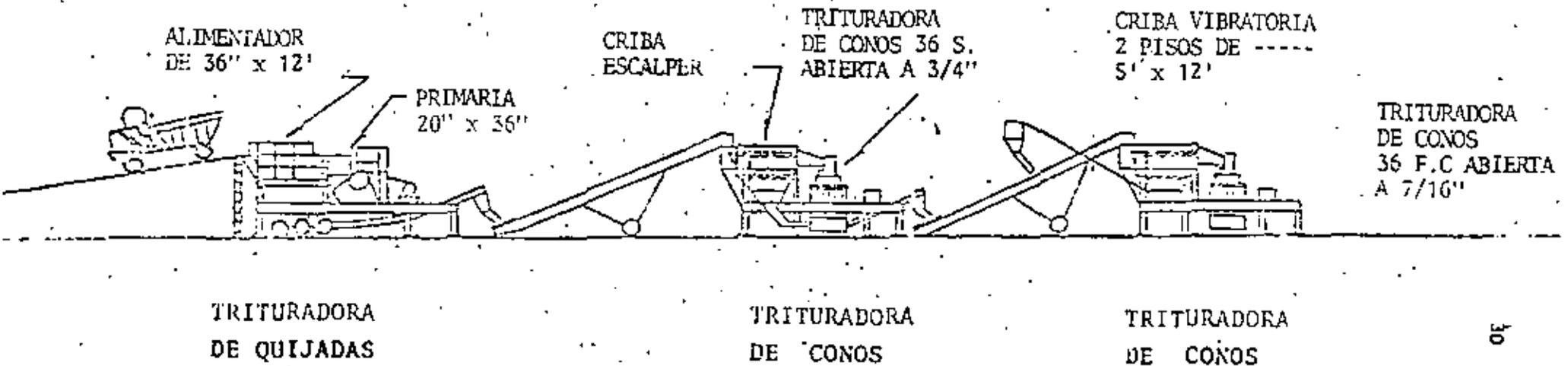
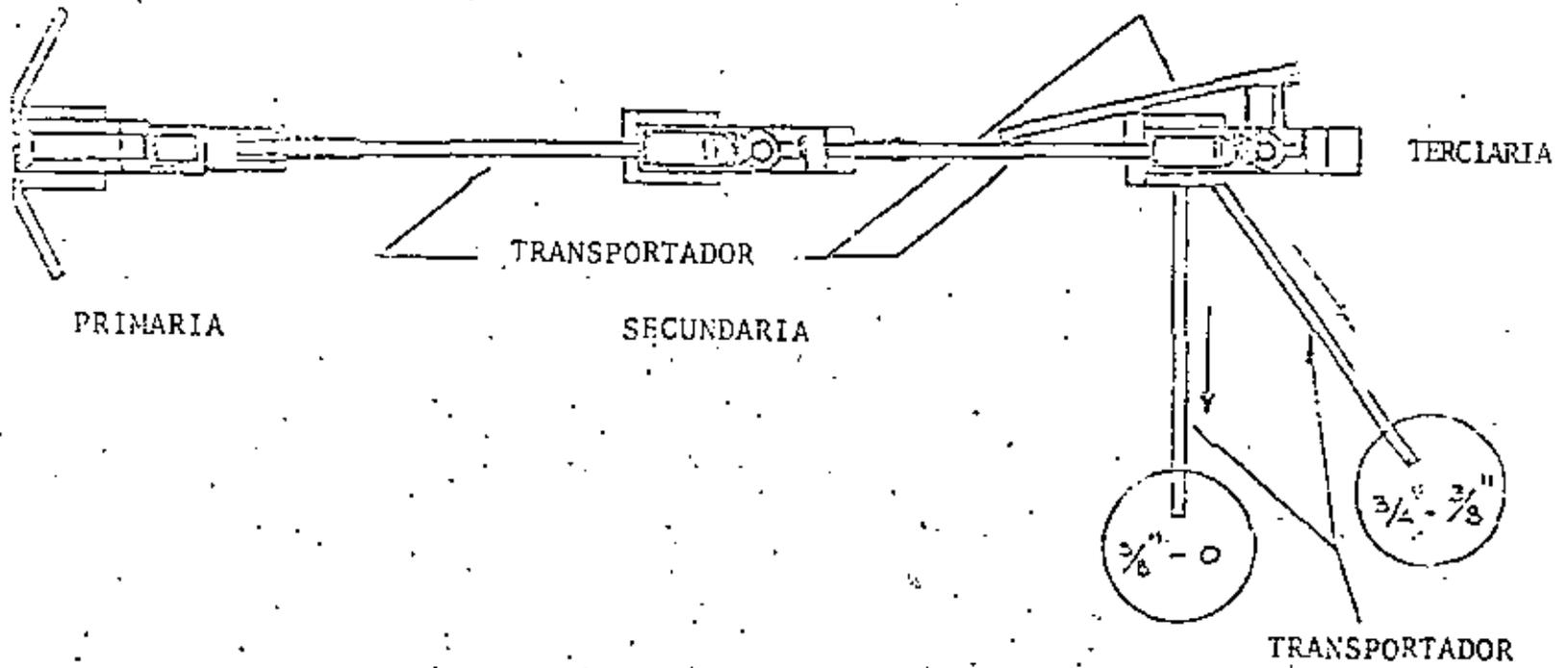


FIGURA # 1

TA DE CONTROL DE PRODUCCION DE AGREGADOS

RESULTADOS ESTADISTICOS

PROCEDENCIA: LOS REYES

OBRA: X

PERIODO ANALIZADO: 1o. AL 30 DE SEPTIEMBRE DE 1979

NUMERO DE DATOS \_\_\_\_\_

X = \_\_\_\_\_

$\sigma$  = \_\_\_\_\_

$\sigma$  = \_\_\_\_\_

PROD. < PROD. ESPERADA \_\_\_\_\_

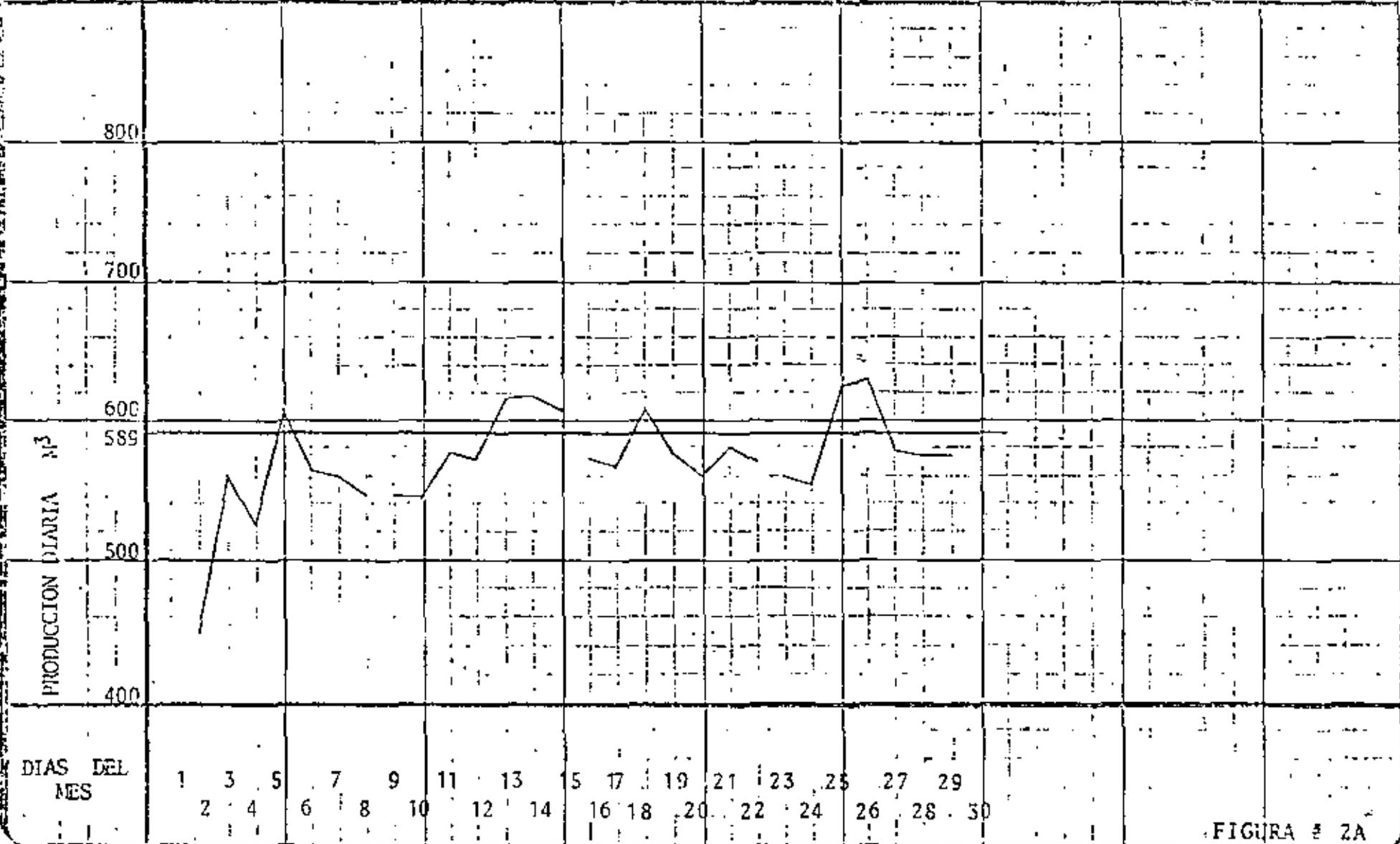


FIGURA # 2A



## INFORME DIARIO DE PRODUCCION DE AGREGADOS

OBRA: 24FECHA Viernes 14-IX/79TIEMPO TEORICO OPERACION 15:30 HORASTIEMPO REAL OPERACION 7:20 HORASNUMERO DE DEMORAS 7EFICIENCIA : 47.5% EFICIENCIA ESPERADA = 70%PRODUCCION REAL 400 M<sup>3</sup>PRODUCCION POR HORA EFECTIVA 400/7.33 = 54.57PRODUCCION ESPERADA = 54.5

| CAUSA DE DEMORAS            | HORAS PERDIDAS | % EFICIENCIA PERDIDA |
|-----------------------------|----------------|----------------------|
| FALTA DE MATERIAL           | 1:05           | 6.9%                 |
| REPARACION PLANTA DE LUZ    | 1:10           | 7.5%                 |
| REPARACION TRIT. SECUNDARIA | 1:30           | 9.7%                 |
| SOLDANDO MALLA              | 1:10           | 7.5%                 |
| FALTA ENERGIA ELECTRICA     | 0:35           | 3.7%                 |
| REPARACION CRIBA            | 0:40           | 4.3%                 |
| PIEDRAS ATORADAS            | 2:00           | 12.9%                |
| TOTAL                       | 8:10           | 52.5%                |

## INFORME DE PRODUCCION SEMANAL

|   |  |
|---|--|
| OBRA: <u>24</u>                                     | PERIODO DEL <u>10-IX/79</u> AL <u>15-IX/79</u>           |
| PRODUCCION REAL: <u>2600 M<sup>3</sup></u>          | PRODUCCION ESPERADA: <u>3534</u>                         |
| EFICIENCIA REAL: <u>48.8 %</u>                      | EFICIENCIA ESPERADA: <u>70 %</u>                         |
| HORAS TRABAJADAS: <u>45.4</u>                       | HORAS DEMORA : <u>47.6</u>                               |
| PRODUCCION REAL -<br>POR HORA EFECTIVA: <u>57.3</u> | PRODUCCION ESPERADA -<br>POR HORA EFECTIVA : <u>54.5</u> |

| CAUSA DE DEMORAS            | HORAS PERDIDAS | % EFICIENCIA PERDIDA |
|-----------------------------|----------------|----------------------|
| FALTA DE MATERIAL           | 1:30           | 1.6                  |
| REPARACION PLANTA LUZ       | 1:10           | 1.2                  |
| REPARACION TRIT. SECUNDARIA | 6:30           | 7.0                  |
| SOLDANDO MALLAS             | 5:0            | 5.4                  |
| FALTA ENERGIA ELECTRICA     | 1:0            | 1.1                  |
| REPARACION CRIBA            | 16:00          | 17.2                 |
| MANT. CAMINO A PLANTA       | 1:00           | 1.1                  |
| PIEDRAS ATORADAS            | 11:00          | 11.8                 |
| DESCOM. BANDAS              | 1:30           | 1.6                  |
| POR ALMACENAMIENTO          | 3:0            | 3.2                  |
| TOTAL                       | 47:40          | 51.2                 |

CONSTRUCTORA

X

Máquina: Trituradora  
Modelo: Quijadas 24 x 36Hoja No: 1Calculó: F.F.L.OBRA: TRITURACION "A"Datos Adic: con alimentador 36" x 12" Montada.  
RemolqueRevisó: F.F.L.Fecha: febrero de 1979

## DATOS GENERALES

Precio adquisición: \$ 4'420,000.00 Fecha cotización: febrero de 1979  
 Equipo adicional - Vida económica (Ve): 5 años  
 Horas por año (Ha): 1600 hr/año  
 Motores eléct. de 150 HP.  
 Valor inicial (Va): 4'420,000.00 Factor operación: 0.90  
 Valor rescate (Vr): 10 % = \$ 442,000.00 Potencia operación: 135 HP. op.  
 Tasa interés (i): 18 % Coeficiente almacenaje (K): 0  
 Prima seguros (s): 3 % Factor mantenimiento (Q): 0.80

## I. CARGOS FIJOS.

$$a) \text{ Depreciación: } D = \frac{Va - Vr}{Ve} = \frac{4'420,000 - 442,000}{5 \times 1600} = \$ 497.25$$

$$b) \text{ Inversión: } I = \frac{Va + Vr}{2 Ha} i = \frac{4'420,000 + 442,000}{2 \times 1600} \times 0.18 = 273.49$$

$$c) \text{ Seguros: } S = \frac{Va + Vr}{2 Ha} s = \frac{4'420,000 + 442,000}{2 \times 1600} \times 0.03 = 45.58$$

$$d) \text{ Almacenaje: } A = KD = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$e) \text{ Mantenimiento: } M = QD = \underline{0.80 \times 497.25} = \underline{\underline{397.80}}$$

Suma Cargos Fijos por Hora \$ 1,214.12

|                              |   |   |
|------------------------------|---|---|
| CONSTRUCTORA<br><u>X</u>     | Máquina: <u>Trituradora</u><br>Modelo: <u>Conos 36.S</u><br>Datos Adic: <u>con Criba -</u><br>Scalper. Montada remolque | Hoja No: <u>2</u><br>Calculó: <u>F.E.L.</u><br>Revisó: <u>F.E.L.</u><br>Fecha: <u>febrero de 1979</u> |
| OBRA: <u>TRITURACION "A"</u> |   |   |

## DATOS GENERALES

|  |  |
|--|--|
| Precio adquisición: \$ <u>4'240,000.00</u>     | Fecha cotización: <u>febrero de 1979</u> |
| Equipo adicional -                             | Vida económica (Ve): <u>5</u> años       |
|  | Horas por año (Ha): <u>1600</u> hr/año   |
|  | Motores eléct. de <u>110</u> HP.         |
| Valor inicial (Va): <u>4'240,000.00</u>        | Factor operación: <u>0.9</u>             |
| Valor rescate (Vr): <u>10% = \$ 424,000.00</u> | Potencia operación: <u>99</u> HP. op.    |
| Tasa interés (i): <u>18%</u>                   | Coefficiente almacenaje (K): <u>0</u>    |
| Prima seguros (s): <u>3%</u>                   | Factor mantenimiento (Q): <u>0.8</u>     |

## I. CARGOS FIJOS.

$$a) \text{ Depreciación: } D = \frac{Va - Vr}{Ve} = \frac{4'240,000 - 424,000}{5 \times 1600} = \$ 477.00$$

$$b) \text{ Inversión: } I = \frac{Va + Vr}{2 Ha} i = \frac{4'240,000 + 424,000}{2 \times 1600} \times .18 = 262.35$$

$$c) \text{ Seguros: } S = \frac{Va + Vr}{2 Ha} s = \frac{4'240,000 + 424,000}{2 \times 1600} \times 0.03 = 43.72$$

$$d) \text{ Almacenaje: } A = KD = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$e) \text{ Mantenimiento: } M = QD = \underline{0.8 \times 477.00} = \underline{\underline{381.60}}$$

Suma Cargos Fijos por Hora \$ 1,164.67

OBRA: TRITURACION "A"

Datos Adic: con Criba y  
montado en remolque

Revisó : F.F.L.  
Fecha : febrero de 1979

DATOS GENERALES

|                     |                     |                              |                 |
|---------------------|---------------------|------------------------------|-----------------|
| Precio adquisición: | \$ 4'380,000.00     | Fecha cotización:            | febrero de 1979 |
| Equipo adicional -  |                     | Vida económica (Ve):         | 5 años          |
|                     |                     | Horas por año (Ha):          | 1600 hr/año     |
|                     |                     | Motores eléct. de            | 150 HP.         |
| Valor inicial (Va): | 4'380,000.00        | Factor operación:            | 0.9             |
| Valor rescate (Vr): | 10% = \$ 438,000.00 | Potencia operación:          | 135 HP. op.     |
| Tasa Interés (i):   | 18%                 | Coefficiente almacenaje (K): | 0               |
| Prima seguros (s):  | 3%                  | Factor mantenimiento (Q):    | 0.8             |

1. CARGOS FIJOS.

a) Depreciación:  $D = \frac{Va - Vr}{Ve} = \frac{4'380,000 - 438,000}{5 \times 1600} = \$ 492.75$

b) Inversión:  $I = \frac{Va + Vr}{2 Ha} = \frac{4'380,000 + 438,000}{2 \times 1600} \times .18 = 271.01$

c) Seguros:  $S = \frac{Va + Vr}{2 Ha} \times 0.03 = \frac{4'380,000 + 438,000}{2 \times 1600} \times 0.03 = 45.17$

d) Almacenaje:  $A = \cdot KD = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$

e) Mantenimiento:  $M = QD = \frac{0.8 \times 492.75}{\hspace{2cm}} = \underline{\underline{394.20}}$

Suma Cargos Fijos por Hora \$ 1,203.13



II. CONSUMOS.

- a) Combustible:  $E = e P_c$   
 Diesel:  $E = 0.20 \times \text{HP. op.} \times \$ \text{ /lt.} = \$$   
 Gasolina:  $E = 0.24 \times \text{HP. op.} \times \$ \text{ /lt.} =$

b) Otras fuentes de energía: \_\_\_\_\_ =

c) Lubricantes:  $L = a P_e$

Capacidad carter:  $C = \text{litros}$   
 Cambios aceite:  $t = \text{horas}$

$$a = C/t + \begin{cases} 0.0035 \\ 0.0030 \end{cases} \times \text{HP. op.} = \text{lt/hr.}$$

Grasa  $L = 1/10 \text{ lt/hr} \times \$ 14.00 \text{ /lt.} = 1.40$

d) Llantas:  $Ll = \frac{Vll \text{ (valor llantas)}}{Hv \text{ (vida económica)}}$       Bandas  
 $Hv = 3500$   
 Vida económica:  $Hv = \text{horas}$       \$ 750,000.00  
 $Ll = \frac{\text{horas}}{\text{horas}}$        $\frac{750,000.00}{3,500} = 214.28$

Suma Consumos por Hora \$ 215.08

II. OPERACION .

Salario base : \$ \_\_\_\_\_

Salario real -  
 operador : \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Sal/turno-prom:\$

Horas/turno-prom.: (H)

$H = 8 \text{ horas} \times \text{(factor rendimiento)} = \text{horas}$

$\text{Operación} = 0 = \frac{S}{H} = \frac{\$}{\text{horas}} = \$$

Suma Operación por Hora \$ \_\_\_\_\_

COSTO DIRECTO HORA - MAQUINA (HMD) \$ 589.26

SIN OPERACION NI ENERGIA

|                       |   |  |
|-----------------------|---|--|
| CONSTRUCTORA<br>X     | Máquina: P. Eléctrica<br>Modelo: 600 K.V.A. | Hoja No: 5-1<br>Calculó: F.E.L.          |
| OBRA: TRITURACION "A" | Datos Adic: _____                           | Revisó: F.E.L.<br>Fecha: febrero de 1979 |

## DATOS GENERALES

|   |                                    |
|---|------------------------------------|
| Precio adquisición: \$ 1'874,500.00     | Fecha cotización: Febrero de 1979  |
| Equipo adicional - _____                | Vida económica (Ve): 7 años        |
| _____                                   | Horas por año (Ha): 1600 hr/año    |
| _____                                   | Motores diesel de 805 H.P. HP.     |
| Valor inicial (Va): 1'874,500.00        | Factor operación: 0.85             |
| Valor rescate (Vr): 10% = \$ 187,450.00 | Potencia operación: 684.25 HP. op. |
| Tasa interés (i): 18%                   | Coefficiente almacenaje (K): 0.02  |
| Prima seguros (s): 3%                   | Factor mantenimiento (Q): 0.80     |

## I. CARGOS FIJOS.

$$a) \text{ Depreciación: } D = \frac{Va - Vr}{Ve} = \frac{1'874,500 - 187,450}{11200} = \$ 150.63$$

$$b) \text{ Inversión: } I = \frac{Va + Vr}{2 Ha} = \frac{1'874,500 + 187,450}{2 \times 1600} \cdot 0.18 = 115.98$$

$$c) \text{ Seguros: } S = \frac{Va + Vr}{2 Ha} \cdot s = \frac{1'874,500 + 187,450}{2 \times 1600} \cdot 0.03 = 19.33$$

$$d) \text{ Almacenaje: } A = KD = \frac{150.63 (0.02)}{1} = 3.01$$

$$e) \text{ Mantenimiento: } M = QD = \frac{150.63 (0.80)}{1} = 120.50$$

Suma Cargos Fijos por Hora \$ 409.45

## II. CONSUMOS.

a) Combustible:  $E = e P_e$ 

$$\text{Diesel: } E = 0.20 \times 684.25 \text{ HP. op.} \times \$ 1.00 / \text{lt.} = \$ 136.85$$

$$\text{Gasolina: } E = 0.24 \times \text{HP. op.} \times \$ \text{ /lt.} =$$

b) Otras fuentes de energía: \_\_\_\_\_ =

c) Lubricantes:  $L = a P_e$ 

$$\text{Capacidad carter: } C = \frac{50}{100} \text{ litros}$$

$$\text{Cambios aceite: } t = \frac{100}{100} \text{ horas}$$

$$a = C/t + \begin{cases} 0.0035 \\ 0.0030 \end{cases} \times 684.25 \text{ HP. op.} = 2.89 \text{ lt/hr.}$$

$$L = 2.89 \text{ lt/hr} \times \$ 14 \text{ /lt.} = 40.46$$

d) Llantas:  $LI = \frac{VII \text{ (valor llantas)}}{H_v \text{ (vida económica)}}$ 

$$\text{Vida económica: } H_v = \text{_____ horas}$$

$$LI = \frac{\text{_____}}{\text{_____}} \text{ horas} = \underline{\underline{\hspace{2cm}}}$$

Suma Consumos por Hora

\$ 177.31

## II. OPERACION.

Salario base: \$ \_\_\_\_\_

Salario real -

operador: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Sal/turno-prom:\$ \_\_\_\_\_

Horas/turno-prom.: (H)

$$H = 8 \text{ horas} \times \text{_____ (factor rendimiento)} = \text{_____ -horas}$$

$$\text{Operación} = O = \frac{S}{H} = \frac{\$ \text{_____}}{\text{_____ horas}} = \$ \underline{\underline{\hspace{2cm}}}$$

Suma Operación por Hora

\$ \_\_\_\_\_

COSTO DIRECTO HORA - MAQUINA (HMD)

\$ 586.76

SIN OPERACION

CALCULO DEL SALARIO REAL DEL  
PEON, SOBRESTANTE Y OPERADOR  
DE LA TRITURADORA

1. Días Pagados al Año

|   |             |
|---|-------------|
| a) Días calendario                              | 365         |
| b) Aguinaldo (Artículo 87)                      | 15 (mínimo) |
| c) Prima de Vacaciones<br>(Artículo 76 y 80)    |             |
| Se considera antigüedad -<br>promedio de 2 años |             |
| 8 días x 0.25                                   | 2           |
|   | 382         |

No se consideran trabajos en  
tiempo extra ni en día de --  
descanso semanal.

2. Días trabajados al Año

|   |      |
|---|------|
| a) Días de descanso al año  |      |
| Domingos  | 52   |
| Vacaciones  | 8    |
| Descansos obligatorios<br>(Artículo 74)   |      |
| (1o. Enero, 5 Febrero, 21 Marzo,<br>1o. Mayo, 15 Septiembre, 20 No -<br>viembre, 1o. Diciembre de cada -<br>6 años. | 7.2  |
| Mal tiempo y enfermedad   | 4.0  |
|   | 71.2 |

$$365 - 71.2 = 293.8 \text{ días}$$

3. Factor de costo para  
 aplicar al salario base :

|  |               |
|--|---------------|
| a) $\frac{\text{Días pagados}}{\text{Días trabajados}} = \frac{382}{293.8} =$    | 1.3002        |
| b) Impuesto Educación (1% Sobre Remuneraciones)<br>$0.01 \times 1.3002$          | 0.0130        |
| c) Fondo para fomento deportivo (0.5%)<br>$0.005 \times 1.3002$                  | 0.0065        |
| d) Guarderías (1%)<br>$0.01 \times 1.3002$                                       | 0.0130        |
| e) I.M.S.S. Patronal<br>Para salario mínimo (19.687%)<br>$0.19687 \times 1.3002$ | <u>0.2560</u> |
| Suma   | 1.5887        |

Para salarios diferentes al mínimo.

|   |               |
|---|---------------|
| a)  | 1.3002        |
| b)  | 0.0130        |
| c)  | 0.0065        |
| d)  | 0.0130        |
| e) Para salarios diferentes al mínimo<br>(15.9375%)<br>$0.159375 \times 1.3002$ | <u>0.2072</u> |
| Suma  | 1.5399        |

## D.F. Zona Metropolitana (#74)

| Categoría              | Salario Nominal | Factor | Salario Real   |
|------------------------|-----------------|--------|----------------|
| Peón                   | \$ 138.00       | 1.5887 | \$ 219.24/ Día |
| Operador de quebradora | \$ 260.00       | 1.5399 | \$ 400.37/ Día |
| Sobrestante            | \$ 325.00       | 1.5399 | \$ 500.47/ Día |

El 5% de Infonavit no puede cargarse al costo directo, lo debe pagar la Empresa de sus utilidades.

El 2% Sindical lo paga normalmente el trabajador.

## S A L A R I O S

LOS SALARIOS BASE DEBERAN INCREMENTARSE PARA OBTENER EL SALARIO REAL --  
 TOMANDO EN CUENTA, CUOTAS DEL SEGURO SOCIAL PAGADAS POR EL PATRON, ----  
 INFONAVIT, PRESTACIONES DE LA LEY FEDERAL DEL TRABAJO, IMPUESTO COMPLE-  
 MENTARIO, FONDEO PARA FOMENTO DEPORTIVO EN SU CASO, GUARDERTAS EN SU --  
 CASO. REALIZANDO LAS OPERACIONES TENDREMOS.

| EMPLEADO     | SALARIO<br>BASE | SALARIO<br>REAL |
|--------------|-----------------|-----------------|
| PEONES       | 138.00          | 219.24          |
| OPERADORES   | 260.00          | 400.37          |
| SOBRESTANTES | 325.00          | 500.47          |

PARA OBTENER EL COSTO HORARIO SE PRESUPONE UNA EFICIENCIA (75%) O SE --  
 CONSIDERA EL COSTO ANUAL DIVIDIDO ENTRE EL NUMERO DE HORAS TRABAJADAS -  
 POR LAS MAQUINAS EN UN AÑO.

USANDO EL PRIMER CRITERIO TENDRIAMOS.

$$\text{PEON} \quad \frac{219.24}{8 \times .75} = \$ 36.54/\text{H}$$

$$\text{OPERADOR} \quad \frac{400.37}{8 \times .75} = \$ 66.73/\text{H}$$

$$\text{SOBRESTANTE} \quad \frac{500.47}{8 \times .75} = \$ 83.41/\text{H}$$

## CONTROL DE COSTOS

EN LA MISMA FORMA QUE EL CONTROL DE PRODUCCION, EN PRIMER LUGAR DEBE OBTENERSE EL POSIBLE COSTO MENSUAL, POR EJEMPLO, QUE NOS VA SERVIR DE BASE DE COMPARACION, ES DECIR DE ESTANDAR.

CONVIENE DIVIDIR EL COSTO DE ACUERDO COMO VAMOS A LLEVAR EL CONTROL. EN ESTE CASO VAMOS A EJEMPLIFICAR EL CONTROL CON EL COSTO DIRECTO, DIVIDIENDO ESTE EN COSTO DE MAQUINARIA, DE OBRA DE MANO, DE MATERIALES Y DE COMBUSTIBLES Y LUBRICANTES.

EN LAS PAGINAS SIGUIENTES, SE ANALIZAN LOS COSTOS POR HORA MAQUINA, COSTOS POR MATERIALES, TAMBIEN POR HORA Y COSTOS POR OBRA DE MANO. CON TODOS ESTOS COSTOS SE PUEDEN PREPARAR LAS SIGUIENTES TABLAS.

### COSTOS DIRECTOS POR HORA

#### I. MAQUINARIA (CARGOS FIJOS).

|   |            |
|---|------------|
| A) TRITURADORA PRIMARIA DE QUIJADAS         | 1,214.12   |
| B) TRITURADORA SECUNDARIA DE CONOS (36S)    | 1,164.67   |
| C) TRITURADORA TERCIARIA DE CONOS (36 F.C.) | 1,203.13   |
| D) BANDAS TRANSPORTADORAS                   | 373.58     |
| E) PLANTA DE LUZ CAT 0-348-600 KVA          | 409.45     |
| C.D. MAQUINARIA                             | 4,364.95/H |

#### II. MATERIALES (CONSUMOS).

|           |        |
|-----------|--------|
| A) BANDAS | 215.68 |
|-----------|--------|

|                   |             |
|-------------------|-------------|
| B) PLANTAS DE LUZ |             |
| 1. COMBUSTIBLES   | 136.85      |
| 2. LUBRICANTES    | 40.46       |
|                   | <hr/>       |
| C.D. MATERIALES   | \$ 392.99/H |

|                               |             |
|-------------------------------|-------------|
| III. MANO DE OBRA             |             |
| A) UN SOBRESTANTE             | 83.41       |
| B) CUATRO OPERADORES          | 266.92      |
| C) TRES PEONES                | 109.62      |
|                               | <hr/>       |
| COSTO DIRECTO DE MANO DE OBRA | \$ 459.95/H |

RESUMEN COSTOS DIRECTOS  
POR HORA

|                              |          |
|------------------------------|----------|
| MAQUINARIA                   | 4,364.95 |
| MATERIALES                   | 392.99   |
| MANO DE OBRA                 | 459.95   |
|                              | <hr/>    |
| COSTO DIRECTO TOTAL POR HORA | 5,217.89 |

COSTO DIRECTO POR M<sup>3</sup>

$$\text{C.D./M}^3 \quad \frac{\$ 5,217.89/H}{38 \text{ M}^3/H} = \$ 137.31/\text{M}^3$$

NO ES SUFICIENTE EL CONTROL DE PRODUCCION, PUESTO QUE EL COSTO UNITARIO DEPENDE DE PRODUCCION Y GASTOS EROGADOS REALMENTE.

SE PUEDE LLEVAR UN CONTROL DE COSTOS ELABORADO EN BASE AL PRESUPUESTO.

LOS GASTOS ESPERADOS POR MES SON LOS SIGUIENTES, DESGLOSADOS EN CONCEPTOS DE COSTO.

PODRIAMOS SELECCIONAR LOS SIGUIENTES CONCEPTOS :

MAQUINARIA

OBRA DE MANO

MATERIALES

COMBUSTIBLES Y LUBRICANTES

EL COSTO RESULTARIA EN LA SIGUIENTE FORMA :

COSTO ESPERADO POR MES

HORAS ESPERADAS = 15.5 x 25 = 387.5

| CONCEPTO               | MAQUINARIA   | OBRA DE MANO | MATERIALES | COMBUSTIBLES Y LUBRICANTES |
|------------------------|--------------|--------------|------------|----------------------------|
| TRITURADORA PRIMARIA   | 470,471.50   |              |            |                            |
| TRITURADORA SECUNDARIA | 451,309.62   |              |            |                            |
| TRITURADORA TERCIARIA  | 466,212.87   |              |            |                            |
| BANDAS TRANSPORTADORAS | 144,762.25   |              | 83,576.00  |                            |
| PLANTA DE LUZ          | 158,661.87   |              |            | 68,707.63                  |
| OBRA DE MANO           |              | 178,230.62   |            |                            |
| S U M A                | 1'691,418.11 | 178,230.62   | 83,576.00  | 68,707.63                  |

TOTAL COSTO ESPERADO = \$ 2'021,932.36

TOTAL PRODUCCION ESPERADA = 14725 M<sup>3</sup>/MES

COSTO/ M<sup>3</sup> =  $\frac{2'021,932.36}{14725}$  = \$ 137.31

EL INFORME MENSUAL DE CONTROL DE COSTOS PRESUPUESTAL QUEDARIA EN LA SIGUIENTE FORMA

| CATALOGO | CONCEPTO                       | MOVIMIENTO DEL MES |              |              | ACUMULADO HASTA EL MES |             |            |
|----------|--------------------------------|--------------------|--------------|--------------|------------------------|-------------|------------|
|          |                                | REAL               | PRESUPUESTO  | DIFERENCIA   | REAL                   | PRESUPUESTO | DIFERENCIA |
| 1        | TRITURACION                    |                    |              |              |                        |             |            |
|          | a) Maquinaria                  | 1'350,052.70       | 1'691,418.11 | 341,365.41 R |                        |             |            |
|          | b) Obra de Mano                | 182,329.92         | 178,230.62   | 4,099.30     |                        |             |            |
|          | c) Materiales                  | 43,894.95          | 83,576.00    | 39,681.05 R  |                        |             |            |
|          | d) Combust. y Lubri-<br>cantes | 78,456.93          | 68,707.63    | 9,749.30     |                        |             |            |
|          | S U M A                        | 1'654,734.50       | 2'021,932.36 | 367,197.86 R |                        |             |            |

$$\text{COSTO REAL / M}^3 = \frac{1'654,734.50}{11,817} = \$ 140.03$$

SIN EMBARGO EL CONTROL PRESUPUESTAL DE COSTOS NO ME DICE NADA SI NO TOMO EN CUENTA LA PRODUCCION REAL, PARA TOMAR ESTO EN CONSIDERACION PUEDO LLEVAR EL CONTROL PRESUPUESTAL POR UNIDAD DE PRO -- DUCCION.

VOLUMEN DE PRODUCCION ESTIMADO = 14725

VOLUMEN DE PRODUCCION REAL = 11815

INFORME MENSUAL DE CONTROL DE COSTOS

COSTO UNITARIO

| CATALOGO | C O N C E P T O               | MOVIMIENTO DEL MES |             |            |         | ACUMULADO HASTA EL MES |             |            |   |
|----------|-------------------------------|--------------------|-------------|------------|---------|------------------------|-------------|------------|---|
|          |                               | REAL               | PRESUPUESTO | DIFERENCIA | %       | REAL                   | PRESUPUESTO | DIFERENCIA | % |
| 1        | TRITURACION                   |                    |             |            |         |                        |             |            |   |
|          | a) Maquinaria                 | 114.25             | 114.87      | 0.62 R     | 0.5% R  |                        |             |            |   |
|          | b) Obra de Mano               | 15.42              | 12.10       | 3.32       | 27.4%   |                        |             |            |   |
|          | c) Materiales                 | 3.71               | 5.67        | 1.96 R     | 34.6% R |                        |             |            |   |
|          | d) Combust. y Lubri<br>cantes | 6.64               | 4.67        | 1.97       | 42%     |                        |             |            |   |
|          | S U M A                       | 140.02             | 137.31      | 2.71       | 1.97%   |                        |             |            |   |

PANEL: RECUPERACION Y RECICLAJE DE PAVIMENTOS ASFALTICOS.

1. INTRODUCCION \_\_\_\_\_ ING. CARLOS FERNANDEZ LOAIZA
2. RECICLADO TERMICO \_\_\_\_\_ ING. MARIO LOPEZ COELLO
3. RECUPERACION EN FRIO Y  
RECICLADO EN PLANTA \_\_\_\_\_ ING. RAFAEL A. LIMON LIMON
4. EXPERIENCIAS Y PERSPECTIVAS  
EN PAVIMENTOS URBANOS \_\_\_\_\_ ING. CARLOS VALENCIA RODRIGUEZ
5. EXPERIENCIAS Y PERSPECTIVAS  
EN CARRETERAS \_\_\_\_\_ ING. ROBERTO PASQUEL LUJAN
6. MAQUINARIA Y EQUIPO \_\_\_\_\_ ING. PEDRO LUIS BENITEZ ESPARZA
7. CONCLUSIONES \_\_\_\_\_ ING. ALFONSO RICO RODRIGUEZ









centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de Ingeniería, unam



CURSO: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS

TEMA: CONTROL DE CALIDAD

ING. ALFONSO RICO RODRIGUEZ



## CONTROL DE CALIDAD.

### I.- INTRODUCCION

Evidentemente, las normas más reciosas de proyecto y de construcción más ambiciosa y costosa no bastan para garantizar la existencia de una obra de ingeniería útil, económica y duradera. Entre el proyecto y la obra o entre la construcción y la obra existen todo un conjunto de pasos y criterios que será preciso garantizar para llegar a un buen resultado. Un criterio simplista podría expresar este nexo como la simple necesidad de hacer las cosas "bien", pero, naturalmente, esto no basta. Un conjunto de cosas bien hechas, cada una bien concebida individualmente y bien ejecutada puede llevar a un proceso inconveniente.

Una vía terrestre exitosa es un balance de un número muy grande de acciones previas. No basta que cada una esté "bien hecha" para garantizar el conjunto; por el contrario, en muchos casos el éxito sonríe a procesos en que positivamente se han descuidado muchos eslabones, pero se han cuidado otros en que residía lo esencial. La concatenación de los eslabones es lo que ha de ser comprendido a fondo; en el conocimiento realista de lo que cada uno representa e influye parece descansar la base del éxito del control.

Controlar idealmente cada paso conduce a un perfeccionismo rígido, incompatible con las realidades de la construcción pesada. Definir los puntos vitales y ejercer en ellos una vigilancia razonable y científica, eso parece ser el secreto de un control exitoso.

El grado de perfección o cuidado con que se ejecute cada acción podrá y deberá ser diferente; en algunas, casi se admitirá el descuido o la improvisación, con tal de obtener en otras la plena garantía de una calidad que conduzca a la del conjunto.

El control de calidad de las obras de ingeniería se ha convertido hoy en una compleja ciencia; no cabe duda que constituye, por sí un nuevo campo con su propia metodología y con criterios específicos y privativos. Como tal, cae definitivamente fuera de los alcances de esta obra. Pero a la vez, en el caso concreto de las vías terrestres, la mecánica de suelos aplicada interviene como disciplina de apoyo; en forma muy relevante. Puesto que los procesos que han de controlarse están regidos muy principalmente por la mecánica de suelos, ella ha de proporcionar los criterios para distinguir lo substancial de lo accesorio, las pruebas de campo o de laboratorio en que se fundamenten los juicios del control y los límites y tolerancias en que las diferentes acciones del constructor han de mantenerse.

Ocurre a veces que muchos ingenieros, incluso con alta responsabilidad, están poco dispuestos a comprender el papel fundamental de las ciencias geotécnicas en el proyecto, la construcción y la conservación de las vías terrestres; como consecuencia, se limita su intervención o los alcances de sus mandatos, en favor de una supuesta (nunca real) ganancia en costo o en expeditividad de ejecución. Podría bastar, sin embargo, a esos escépticos el meditar

sobre la composición de lo que actualmente se considera en todas partes que debe ser un laboratorio para control de calidad de obra, en este campo. Se verá entonces que ese laboratorio es básicamente (y aún en los detalles) un laboratorio de mecánica de suelos y mecánica de rocas (esta última no figura tanto aún en muchas partes, en lo que sin duda es una grave limitación de las unidades de control, debido a la falta de asimilación oportuna de un campo relativamente nuevo y en muy rápida expansión). Esto equivale al reconocimiento explícito de que en esas disciplinas descansa lo esencial para garantizar el éxito o el fracaso de este tipo de obras.

Un aspecto importante en la planeación de un buen programa de control es la definición previa del nivel de calidad requerido en la construcción. En su planteamiento más simple este nivel puede definirse formulando tres preguntas fundamentales.

- Qué se desea
- Como puede ordenarse y programarse la actividad que conduzca al logro de tal deseo.
- Como determinar que se ha alcanzado lo que se deseaba.

En efecto, es una afirmación difícilmente discutible el que las grandes instituciones de proyecto y construcción tienen normas de control uniformes para todas sus obras, cuando la lógica y la búsqueda de lo esencial, de que antes se habló, aconsejan evidentemente establecer normas de control y metas por conseguir diferentes para las distintas obras, diversas en sus características, riesgos e importancia.

Las tres cuestiones anteriores están interrelacionadas. En esencia, lo que se necesita podría en principio ser fijado en un "sistema cerrado", en el cual el proyecto especificaría los requerimientos a conseguir y los resultados finales conseguidos podrían solamente servir como norma de experiencia para futuros proyectos. Esta línea de acción es claramente ineficiente, desaprovecha muchas posibilidades de superación y expone a las obras importantes a quedar con defectos de difícil o imposible corrección. En rigor se necesita un sistema de acción susceptible de ser retroalimentado de manera que los requerimientos estén continuamente interaccionados con los logros parciales; éste, a su vez, retroalimentado por el conjunto de necesidades o requerimientos. Paralelamente, los requerimientos de la obra deben poder ser constantemente revisados a la luz de los logros parciales que se vayan viendo posibles.

Por otra parte las dos primeras cuestiones mencionadas anteriormente tienen que ver con la filosofía del proyecto y con la de la contratación. Al formular la filosofía del proyecto el ingeniero debe entender que la construcción no puede clasificarse simplemente en buena o mala, rechazable o aceptable; habrá siempre toda una graduación posible a partir de las condiciones óptimas y deberán considerarse posibilidades de variación dentro del propio diseño, en relación a materiales y a técnicas constructivas, así como tolerancias en prácticamente todas las actividades. Estas tolerancias deben estar claramente especificadas en los documentos de contratación. Sólo dentro de

este marco flexible podrán definirse realísimamente las aspiraciones y requerimientos del ingeniero.

La tercera cuestión de las señaladas exige un sistema de inspección, - - muestreo y pruebas que permita analizar las realidades de la construcción, - - así como las tendencias y oscilaciones de los trabajos. El hacer este programa tiene cuatro requerimientos básicos. En primer lugar, deberá fundarse en pruebas de significación relevante desde el punto de vista técnico, pues sólo éstas darán indicaciones apropiadas sobre el estado real del trabajo. En tercer lugar, deberá satisfacerse una vez más la condición de que el sistema de inspección se refiera a los aspectos fundamentales del comportamiento de la obra y no a los accesorios. En cuarto lugar, la interpretación del programa debe ser clara y poco controversial, para lo que un enfoque científico puede ser de gran ayuda.

Otro aspecto importante al contemplar las características de un programa de control de calidad, es que en realidad no debe afectar sólo a la construcción, sino que debe contemplar muy de cerca la futura conservación. La institución responsable del control tiene que procurar perfeccionar continuamente los resultados de sus niveles y métodos de control, a la luz de los costos y necesidades de la conservación de sus obras.

Un aspecto fundamental en la definición de un programa de control también es el conjunto de especificaciones de construcción que se manejen, pues ellas fijan de un modo u otro muchas de las metas por lograr, muchas de las ordenanzas y programas que conducen a la consecución de los logros deseados y muchos de los métodos para determinar si se ha alcanzado lo que se desea. Es decir, las especificaciones manejadas por una institución influyen y gobiernan en gran medida a las tres preguntas básicas que más arriba se formularon como el fundamento último de la filosofía del control.

Desgraciadamente existe una actitud no siempre sana en lo que se refiere al manejo de las especificaciones institucionales por parte de algunos de los miembros del personal de cualquier gran institución constructora de vías terrestres. Existe una marcada tendencia a idealizar las especificaciones en uso, colocando sus afirmaciones por encima de toda crítica; lo afirmado por las especificaciones no puede discutirse y cualquier criterio que las modifique es acusado de enfrentarse a la técnica entronizada, en nombre de la improvisación, cuando no de la ignorancia.

El autor de este trabajo no desconoce lo fundamental que resulta disponer de un cuadro completo de especificaciones técnicas de trabajo en cualquier gran institución constructora. Proporciona seguramente la única forma de manejar de un modo claro y razonable todos los aspectos legales de la construcción, la contratación, la relación con las empresas contratistas, etc., a la vez que proporcionan un substracto fundamental que da unidad de estilo y calidad a la institución que las maneja. Pero también es un hecho cierto que la "santificación" de cualquier conjunto de especificaciones conduce a la rigidez mental y al anquilosamiento de las técnicas empleadas. Las instituciones que dan un carácter excesivamente sacramental a sus normas técnicas suelen sentir al poco tiempo grandes oposiciones internas a cualquier cambio en tales normas, con lo que su técnica se fosiliza.

Un conjunto de especificaciones no es más que el resultado del trabajo en un equipo de unos cuantos hombres señalados por sus conocimientos y experiencia. Es lógico pensar que este grupo humano realice un excelente trabajo, produciendo normas razonables y ajustadas a la impresión del momento. Pero sin duda está en la mente de cada uno de los hombres de ese grupo la idea de que su recomendación final ha de aplicarse a una obra cuyas características y circunstancias él no conoce; esta idea ha de forzarlo a ser prudente, por lo que no es raro que la obediencia ciega de normas técnicas preestablecidas a nivel internacional o nacional conduzca a trabajos conservadores y no óptimos, desde el punto de vista de la economía. El ingeniero que juzga pecaminoso apartarse, aunque sea en mínima parte de las normas y especificaciones de su institución está reconociendo implícitamente que un grupo de hombres distinguidos, reunidos años ha, es capaz de dar criterios de mayor validez a su propia obra, a la que se enfrenta hoy, de lo que es capaz de hacer el actual grupo de trabajo, que comparte las responsabilidades del momento. Esta actitud es, por lo menos, injusta para los colegas de un hombre de pensamiento tan rígido y evidentemente sacrifica mucha capacidad de selección y de decisión ajustada a las circunstancias de la obra concreta.

Es claro que cualquier institución puede manejar las aparentes contradicciones anteriores de un modo lógico. Las especificaciones institucionales deben manejarse, en primer lugar, como el marco legal de la actividad técnica y, en segundo, como la referencia última de la propia actividad técnica, válida en tanto no se le señalen limitaciones, variaciones o ajustes de detalle. Para todo esto último, cada proyecto importante deberá contener sus propias especificaciones complementarias, nacidas de sus características específicas; no debe tenerse miedo en producir unas especificaciones complementarias audaces, novedosas y ajustadas a los últimos datos de la experiencia y el conocimiento de la institución de que se trate.

Un conjunto de especificaciones técnicas, rector último de cualquier programa de control de calidad, debe ser competente, en el sentido de garantizar las normas esenciales de la calidad de la obra; debe ser también muy ajustado a las necesidades sociales y económicas de la nación que lo utiliza y también a sus características topográficas, climáticas, de tránsito, etc. En este sentido, la transcripción ciega de normas técnicas producidas por instituciones de otros países, por avanzadas que parezcan en el campo estrictamente tecnológico, suele conducir sistemáticamente a políticas inadecuadas. Las especificaciones deben ser también muy realistas, ajustadas a lo que debe lograrse dadas las características de un proyecto determinado y a lo que puede lograrse, dado el nivel tecnológico (personal obrero especializado, idoneidad de laboratorios de obra, equipo de construcción; etc) del país que vaya a usarlas.

También deben ser capaces de garantizar que los materiales de calidad aceptable no sean rechazados. Este es uno de los aspectos importantes que hacen que el seguir en muchos países las normas producidas por otros conduzca a errores de política. Es común, que las naciones cuyas especificaciones institucionales se transcriben, sean no solo avanzadas en el terreno técnico, sino también en el económico; como consecuencia, sus caminos, ferrocarriles y aero-

pistas mueven volúmenes de tránsito que son excepcionales o desconocidos en el país que adopta las normas. Ello va a conducir a este último a rechazar muchos materiales y técnicas de uso económico, que sus vías con niveles de tránsito muy inferiores, podrían utilizar perfectamente. Lo que en realidad va a suceder, es que el país menos económicamente desarrollado va a descubrir muy pronto lo inapropiado, para su propio consumo, de las normas que está siguiendo, lo que lo conducirá a violarlas sistemáticamente, generándose la siguiente confusión. En rigor éste será el precio que siempre se pague por el uso de especificaciones no realistas.

Otra condición básica de un conjunto de especificaciones es contener tolerancias apropiadas, cuya fijación depende de un conocimiento completo de los factores que contribuyen a las variaciones de los diferentes conceptos. Debe existir una valuación de las consecuencias de exceder tales tolerancias. Puede ayudar el establecer una clasificación de lo críticos que pueden resultar las desviaciones y defectos que puedan presentarse; una clasificación de tales conceptos podría ser, por ejemplo, la que se menciona a continuación:

**Crítico.** El defecto que puede hacer al concepto muy peligroso, de no corregirse.

**Importante.** El defecto que puede afectar al comportamiento en forma seria.

**Poco importante.** El defecto que puede afectar al comportamiento en forma poco seria.

**De contrato.** La transgresión del contrato que no tendrá consecuencias de importancia.

En el caso de productos que son mezcla de otros, las especificaciones deben permitir reconocer con facilidad cual es el componente responsable de las principales características que puede exhibir la muestra.

Otro aspecto importante de todo programa de control de calidad lo constituye el conjunto de pruebas de laboratorio, que proporciona lo que pudiera considerarse la base metodológica y técnica del programa. Las pruebas de laboratorio con fines de control deben cumplir algunas características, fáciles de comprender:

- Estar dirigidas a la comprobación de las características esenciales.
- Ser sencillas y rigurosamente estandarizadas.
- Ser rápidas en su realización.
- Ser de fácil interpretación.
- Requerir equipos económicos, fáciles de corregir y calibrar y de manejo simple.

Sólo así se podrán tener resultados confiables en los laboratorios de pie de obra, que son los que han de realizar el control, sin interferir o frenar-

los programas de construcción. En efecto, no suele ser posible disponer en los laboratorios de obra, de personal y equipo de calidad muy destacada, por lo que los requerimientos de laboratorio han de ser particularmente realistas en este concepto, so pena de verse envuelto en el manejo de mucha información dudosa; por otra parte, el requisito de rapidez es esencial y no precisa de ulterior discusión.

Otro constituyente de un programa de control de calidad es el criterio con el que habrán de manejarse los volúmenes de información que resulten de quienes las interpretan en primera instancia y observan día a día. Esta información deberá estar dispuesta para el uso futuro y ser difundida en todos los niveles institucionales interesados, pues es un elemento de excepcional valor para la formación de la experiencia institucional y para la planeación de futuros trabajos de mantenimiento o reconstrucción.

Los objetivos anteriores exigen el desarrollo de sistemas integrados de almacenamiento de información, disponibilidad de la misma, análisis periódicos y mecanismos de difusión. Sin la correcta operación de tales sistemas será realmente difícil hablar de "experiencia institucional", aún en organismos en que abunde el personal con experiencia individual adecuada. La implantación de un sistema de esta naturaleza será, sin duda, una de las más altas responsabilidades de quienes dirigen, desde la cima, una gran institución constructora de vías terrestres. Es inevitable que las decisiones de este grupo de alta dirección en lo referente a cualquier cuestión del área de control de calidad tienen que basarse en esquemas en que las relaciones costo-efectividad jueguen un papel de importancia.

Un defecto común en los programas de control de calidad, tal como se aplican algunas veces, es el de ejercer la actividad después de ejecutada la obra objeto del control. Este orden de realizaciones conduce al planteamiento de situaciones de hecho consumado, en las que el especialista de control no tiene ya más disyuntiva que la aceptación de la obra defectuosa o su rechazo, que siempre produce trastornos de tiempo y dinero y contra el cual suelen concitarse fuertes presiones, no todas mal intencionadas. Más bien conviene dividir el control en dos aspectos bien diferenciados.

- Control e inspección de materiales, para asegurar que su trabajo satisfará los requisitos del proyecto. En una situación ideal convendría que este trabajo lo realizara la empresa constructora, obligada por un contrato a garantizar ese trabajo satisfactorio.
- Aceptación, por parte del ingeniero que representa a la institucional contratante, de los materiales y de los aspectos parciales de la obra, con ellos concluidos.

Oviamente, los criterios de control, inspección y aceptación estarán fijados por las especificaciones generales de la institución contratante y las complementarias del proyecto. Es realmente lógico y conveniente, aún cuando en muchos países no se desarrolle así el control de calidad, que desacance en el contratista el énfasis del control y verificación de calidad y en el contratante el de la aceptación; a despecho de lo anterior, es muy común que en muchos países la responsabilidad del control descansa por completo en el con-

tratante, lo que no es idóneo, pues conduce a una separación excesivamente aguda entre dos grupos que en principio tienen que ser colaboradores (contratista y contratante) y desinteresa al contratista de muchos aspectos técnicos importantes, tendiendo a convertirlo en un mero ejecutor.

Complementando este punto de vista, debe verse como deseable que el contratista posea sus propios laboratorios y métodos de control.

Es usual que el contratante no tenga ingerencia legal en el modo en como el contratista hace su trabajo, los equipos que usa o la administración que implanta. Por ello, la realización de todas las partes de control por parte del contratante conduce a muchas contradicciones de hecho, pues el resultado por el que se lucha y la aceptación o rechazo del logro final se gestan por toda la cadena de trabajos del contratista en la que el contratante no tiene ingerencia. No es posible ver, cuando se trabaja con los lineamientos generales que se comentan, como el contratante exige determinadas metas que el contratista está imposibilitado de lograr, dada su organización de trabajo y el equipo que usa. La alternativa lógica a estas situaciones es, obviamente, que el contratista se responsabilice de la calidad de su trabajo, quedando a cargo del contratante sólo la verificación y aceptación finales.

Es también norma aún frecuente en muchas partes que el control de calidad se desarrolle con base en lo que podrían llamarse "índices por conseguir". Por ejemplo, la calidad de una compactación se juzga con base en un índice fijo, frecuentemente el grado de compactación; el trabajo está bien hecho, si se ha logrado el 95% de compactación respecto a una determinada prueba, por decir algo. El control se hace obteniendo muestras por diferentes procedimientos, que también para esta labor existen varios criterios, como se verá. Al probar cada una de las muestras no debe aparecer ningún grado de compactación menor que 95%. Este sistema de medir la calidad de lo logrado adolece del defecto de no tomar en cuenta la realidad de los asuntos humanos. Toda actividad realizada por los hombres está sujeta a muy complejas leyes de variación, a veces imposibles de definir; otras excesivamente complejas para ser detalladas cuantitativamente. La variabilidad emana frecuentemente de factores de heterogeneidad de los materiales y de los métodos de su manipulación; otras de factores circunstanciales o de ambiente en que los trabajos se realizan, todas las cuales son de imposible detalle.

Las ideas anteriores conducen a que si ha de respetarse un valor determinado de un índice específico, tal como el 95% de compactación arriba ejemplificado, deberá intentarse sistemáticamente la obtención de un valor bastante mayor en la obra; sólo así se logrará tener sistemáticamente valores iguales o mayores que 95%, una vez que las realidades de la naturaleza impongan sus variaciones. Esta consideración lleva a pensar que para lograr sistemáticamente el 95% y no correr riesgo de rechazo en ningún caso, hay que buscar lograr en la obra un índice bastante mayor, lo que conducirá, por principio de cuentas, a gastos innecesarios, pues, por hipótesis, 95% es el grado de compactación supuestamente conveniente y previamente seleccionado; además, la búsqueda sistemática de un índice mayor que el seleccionado por el proyecto, simplemente para cumplir un requisito artificial, impuesto por el control, podría ser causa de serias deficiencias técnicas, tales como sobrecompactación, en el caso que se ejemplifica.

Si el ejecutor de la obra por no encarecerla o no perjudicarla busca el estricto valor de 95% como meta, podrá estar seguro de que, en términos generales, la mitad de las muestras de suelo que le analice el controlador de calidad, exhibirán grados de compactación por abajo del 95% especificado y de que tendrá problemas de control con quien establezca la calidad con base en índices por conseguir y los maneje rigidamente.

Las ideas anteriores, pese a ser comunes a todos los que tengan que ver con el proyecto y construcción de las vías terrestres, se han incluido con cierta insistencia, pues en ellas reside el fundamento de criterio que lleva a la necesidad de plantear el control de calidad sobre bases estadísticas.

Antes de terminar estos breves comentarios sobre la metodología del control de calidad conviene insistir en dos aspectos adicionales, pero importantes. El primero es que un programa de control de calidad debe ser concebido desde el proyecto de la obra, de manera que ésta y el programa de ejecución lo contemplen claramente y tengan presentes sus necesidades. Cuando las cosas no se hacen así ocurre que el control tropieza con muchos obstáculos al entrar en conflicto con la expeditividad del programa. De la misma manera, será preciso que las necesidades del control (presupuesto, personal, equipos, laboratorios, etc.) se prevean claramente en la administración de la obra.

Respecto a la autoridad de construcción y a la de proyecto. Aparentemente, sólo así se logrará la libertad de acción y la independencia de criterio que requiere la crítica objetiva que necesariamente va aplicada en la actividad del control. Si el control de calidad está subordinado jerárquica y administrativamente a la autoridad de construcción, se ve difícil que quien ha de dirigir desde la cumbre la política de cualquier gran institución constructora, pueda tener una información objetiva y desapasionada sobre la actividad constructiva, sus defectos y sobre los posibles modos de remediarlos. Si el control está ligado al proyecto por una relación de dependencia directa, llegará a dificultarse el establecer cuanto de los defectos de la construcción pueda ser atribuible a deficiencia en el proyecto.

Al contemplar las consideraciones anteriores deben tenerse en cuenta algunos hechos comunes, de los que difícilmente se descargará cualquier gran institución constructora. Parece inevitable un cierto enfrentamiento entre el personal de proyecto y el de construcción; aparentemente la actividad de ambos grupos tiene metas algo diversas en el fondo, pues mientras el grupo de proyecto busca calidad y puede caer en el perfeccionismo; el de construcción busca expeditividad, cumplimiento de programas y podrá caer en el apresuramiento. El grupo de conservación también tenderá a ser antagónico en algo a los otros dos, pues heredará los errores o deficiencias de ambos. Naturalmente que estos diversos puntos de vista no tienen por que derivar a conflictos personales; son simplemente énfasis de posición que resultan una consecuencia lógica, inevitable y probablemente no desfavorable de las respectivas responsabilidades de los diferentes grupos de trabajo. El control de calidad debe moverse en el medio de todos estos equipos de trabajo, sin ligarse a ninguno administrativa o jerárquicamente para conservar una posición que le permita ejercer un juicio independiente y, frecuentemente, un arbitraje de enorme utilidad para orientar los criterios de quienes han de dirigir toda la labor de las posiciones más altas.

Desde los puntos de vista anteriores se comprende lo indispensable que resulta que el grupo de control sea capaz de ejercer una excelente actividad en el campo de las relaciones humanas. El peor error que el grupo de control podrá cometer será convertir su particular posición de intermediario, informador y valuator del éxito de todos, en una posición de crítico o, peor aún, en la de un grupo que busca preeminencia con base en su actividad peculiar. En este sentido ha de tenerse muy en cuenta que en muchas reuniones de trabajo, el constructor maneja sus opiniones, pero el hombre de control de calidad maneja las suyas, más un monto de datos provenientes del laboratorio, que muchas veces tienden a verse como irrefutables y seguros, aún cuando en rigor no tengan por que tener razón especial de preeminencia; de esta manera, no es raro que en tales reuniones, el hombre del control actúe con ventaja, que si es in convenientemente manejada puede ser causa de errores y conflictos.

Parece fuera de duda que la más segura norma de conducta de un grupo de control que aspire al éxito a largo plazo es el espíritu de equipo y la conciencia del servicio común.

Como resumen de todas las consideraciones anteriores, parece que el conjunto de cualidades que puede exigirse al control de calidad son las siguientes:

1. Ser capaz de distinguir las desviaciones y deficiencias significativas, separando las características esenciales de la obra de las accesorias. Esto obligará a un control flexible y diversificado, adaptado a cada obra.

2. Ser capaz de diferenciar las desviaciones o deficiencias inherentes a problemas de obra, de las emanantes de particularidades del muestreo o de la ejecución de pruebas de laboratorio.

3. Ser capaz de ejercer oportuna vigilancia sobre los materiales que vayan a usarse, garantizando un comportamiento adecuado de los que se seleccionen para un cierto fin. En una situación idónea, parece conveniente que este aspecto del control sea cubierto por la empresa contratista a cargo de la obra. Además, ser capaz de establecer normas claras y seguras para la aceptación o el rechazo de trabajos parciales correspondientes a diferentes etapas de la obra, quedando el ejercicio de estas facultades a la parte contratante de la misma.

4. Estar basado en normas expeditas, concordantes con los aspectos legales y de contratación de la obra y rápidas, de manera que la tarea del control no interfiera, o lo haga en lo mínimo, con el ritmo normal de la construcción.

5. Estar basado en especificaciones competentes y realistas, adaptadas a las verdaderas posibilidades y necesidades de la obra y del ambiente técnico general.

6. Estar fundado en técnicas de muestreo y pruebas de laboratorio objetivas, rápidas y sencillas; a la vez, deben ser de fácil interpretación y parte de un esquema científico, que elimine hasta donde sea posible los juicios de decisión basados en apreciaciones estrictamente personales.

7. Estar previsto en el proyecto, de manera que sus interferencias y necesidades estén debidamente programadas y no sean causa de dilaciones inesperadas.

8. Representar un criterio independiente, respecto al proyectista y al constructor. Para ello será preciso que goce de independencia jerárquica y administrativa en relación con ambos.

9. Estar a cargo de personal capaz y penetrado del necesario espíritu de servicio.

## II. FUNDAMENTOS DE LOS METODOS ESTADISTICOS DE CONTROL DE CALIDAD.

En este párrafo tratarán de darse los fundamentos teóricos del control estadístico de la calidad de la construcción, tal como puede utilizarse éste en las vías terrestres.

Todos los datos que se obtienen de observaciones repetidas o de pruebas de laboratorio o campo están sujetos, como ya se mencionó, a variaciones. La Tabla 1, que se refiere a resistencias a la compresión de especímenes de una roca, por ejemplo, ilustra de alguna manera una discusión que es en realidad general y podría hacerse en torno a cualquier acumulación numerosa de datos de observaciones de un cierto parámetro, obtenidas haciendo medidas repetidas de él, por cualquier método, muestra la forma típica en que tales variaciones pueden presentarse y disponerse.

La primera medida que se ocurre para tener un valor general, representativo, pero único, de tal conjunto de datos es un promedio de ellos, obtenido dividiendo la suma total de todos los valores de la resistencia, entre el número de especímenes probados (promedio aritmético). Sin embargo, una segunda mirada al problema hará ver que el simple promedio aritmético no basta, pues no indica nada sobre cuanto difieren los datos del promedio obtenido, ni de la frecuencia con la que se presenta cada dato.

Una representación muy común de una tabla de datos como la No. 1 es un histograma, como el que aparece en la Fig. 1.

El histograma se construye llevando a escala en el eje de ordenadas el número de datos comprendido en intervalos de variación iguales, los que se señalan en el eje de las abscisas. En la figura, los valores de la resistencia a la compresión de la roca se agruparon en intervalos de 20 kg/cm<sup>2</sup>. Así, 23 especímenes tuvieron una resistencia comprendida entre 251 y 270 kg/cm<sup>2</sup>. El promedio aritmético de todos los valores de la Tabla 1 es 247 kg/cm<sup>2</sup>.

Tanto la experiencia como la teoría demuestran que si el número de datos que se maneja es suficientemente grande y el intervalo de variación que se escoge es lo suficientemente pequeño, el histograma se acercará a una curva continua de distribución de datos; casi todas las distribuciones de interés ingenieril y concretamente, casi todas las de interés para problemas de control de calidad son del tipo denominado distribución normal o de Gauss, que aparece dibujada en la misma Fig. 1, superpuesta al histograma. En lo que sigue se supondrá que todas las distribuciones de datos que se manejan resultan ser de la forma normal o Gaussiana.

T A B L A 1

Resistencia a la compresión simple obtenida en especímenes de una cierta roca.

| Espécimen | Resistencia<br>kg/cm <sup>2</sup> | Espécimen | Resistencia<br>kg/cm <sup>2</sup> |
|-----------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|
| 1         | 247                               | 51        | 236                               |
| 2         | 249                               | 52        | 236                               |
| 3         | 241                               | 53        | 211                               |
| 4         | 197                               | 54        | 261                               |
| 5         | 252                               | 55        | 243                               |
| 6         | 252                               | 56        | 243                               |
| 7         | 241                               | 57        | 249                               |
| 8         | 197                               | 58        | 251                               |
| 9         | 304                               | 59        | 261                               |
| 10        | 276                               | 60        | 247                               |
| 11        | 249                               | 61        | 233                               |
| 12        | 322                               | 62        | 249                               |
| 13        | 348                               | 63        | 249                               |
| 14        | 241                               | 64        | 267                               |
| 15        | 249                               | 65        | 211                               |
| 16        | 194                               | 66        | 238                               |
| 17        | 236                               | 67        | 253                               |
| 18        | 233                               | 68        | 241                               |
| 19        | 208                               | 69        | 246                               |
| 20        | 231                               | 70        | 246                               |
| 21        | 261                               | 71        | 253                               |
| 22        | 304                               | 72        | 211                               |
| 23        | 288                               | 73        | 217                               |
| 24        | 308                               | 74        | 213                               |
| 25        | 281                               | 75        | 224                               |
| 26        | 265                               | 76        | 204                               |
| 27        | 279                               | 77        | 208                               |
| 28        | 314                               | 78        | 203                               |
| 29        | 308                               | 79        | 208                               |
| 30        | 293                               | 80        | 198                               |
| 31        | 283                               | 81        | 277                               |
| 32        | 239                               | 82        | 253                               |
| 33        | 246                               | 83        | 253                               |
| 34        | 288                               | 84        | 251                               |
| 35        | 300                               | 85        | 224                               |
| 36        | 286                               | 86        | 268                               |
| 37        | 281                               | 87        | 271                               |
| 38        | 288                               | 88        | 216                               |
| 39        | 277                               | 89        | 216                               |
| 40        | 268                               | 90        | 251                               |
| 41        | 257                               | 91        | 203                               |
| 42        | 257                               | 92        | 229                               |
| 43        | 267                               | 93        | 217                               |
| 44        | 227                               | 94        | 227                               |
| 45        | 236                               | 95        | 193                               |
| 46        | 257                               | 96        | 204                               |
| 47        | 273                               | 97        | 193                               |
| 48        | 268                               | 98        | 204                               |
| 49        | 257                               | 99        | 187                               |
| 50        | 270                               | 100       | 193                               |

En la Fig. 2 se muestran dos distribuciones normales, una alta y delgada y la otra más baja y más desparramada. Si ambas se refieren al mismo número de datos, las áreas bajo ellas serán iguales; es obvio que en la curva alta los datos están más cerca del promedio, en tanto que en la curva más baja se tiene una mayor dispersión.

Si esas curvas se han obtenido midiendo una cierta magnitud por medio de pruebas de laboratorio, utilizando un método A (curva alta) y otro B (curva baja), podrá decirse sin más, que el método A conduce a resultados más consistentes que el método B.

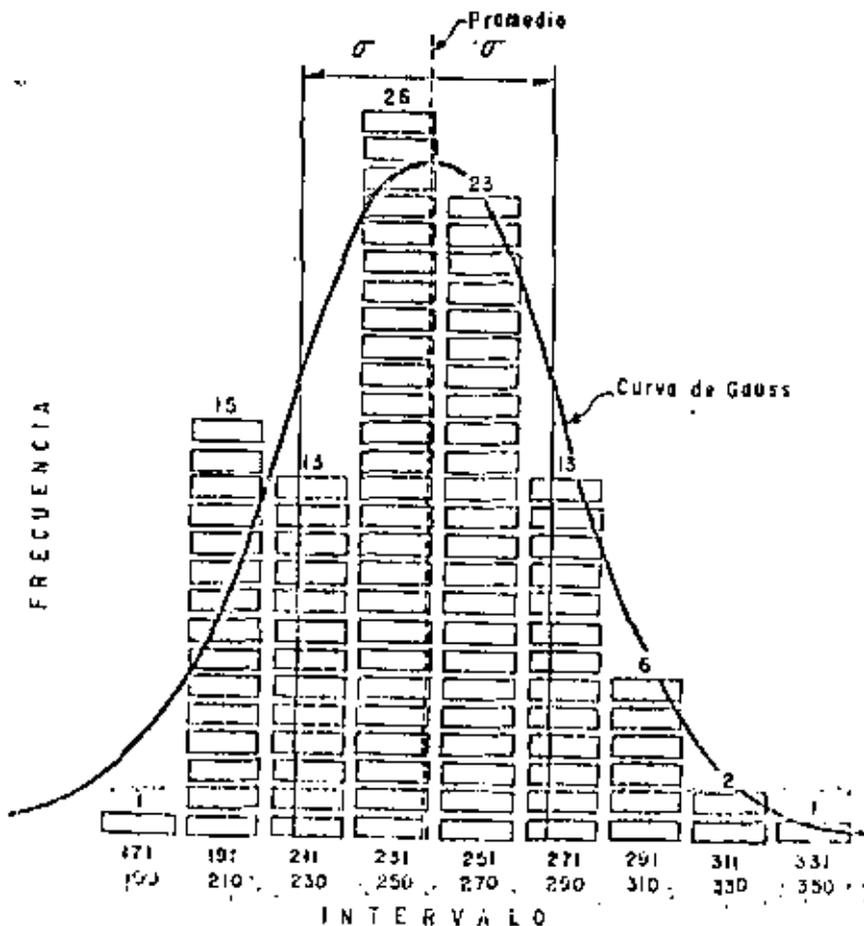


Figura 1. Histogramas de los datos de la Tabla 1.

Resulta fundamental en las aplicaciones poder valorar el grado de dispersión de los datos respecto al promedio. Una idea tosca de esta medida se tendría por la simple diferencia entre el dato más alto y el más bajo, pero

tal medida haría a un lado la idea de distribución, que es fundamental. Se define como desviación-normal, a la expresión:

$$= \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n}}$$

donde,  $x$  representa el valor de un dato cualquiera y,  $\bar{x}$  el promedio de todos los datos;  $x - \bar{x}$  será entonces la desviación de un dato respecto a la media. En la expresión se considera el cuadrado de las desviaciones para eliminar la influencia del signo, pues unas pueden ser en más y otras en menos. Al dividir la suma de todas las desviaciones entre el número de ellas, se tiene lo que podría considerarse una media de las variaciones.

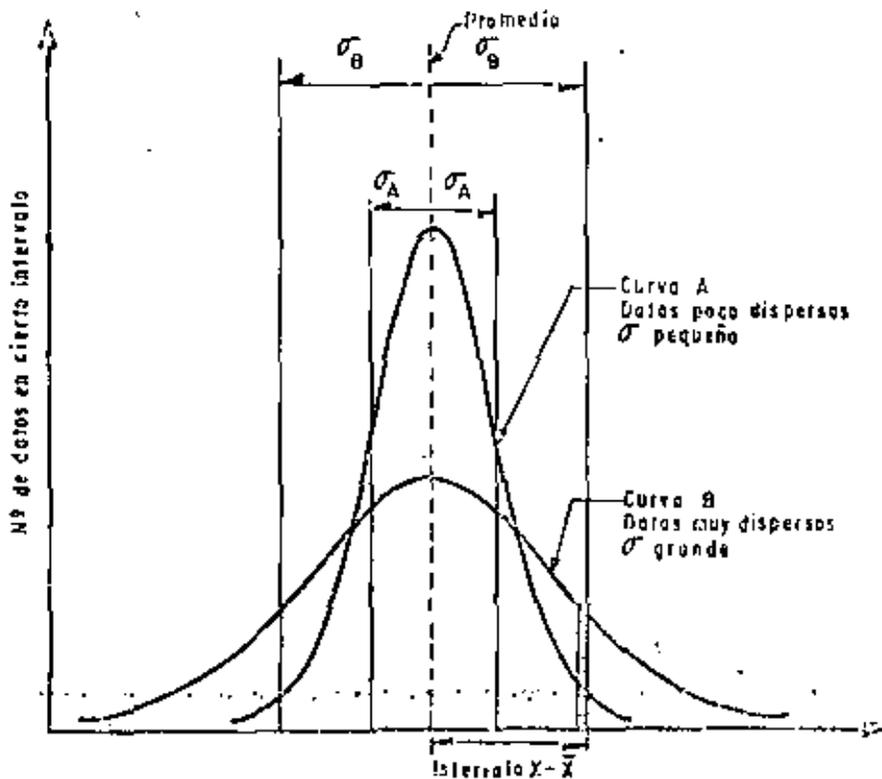


Figura 2. Formas de la curva de distribución normal.

El valor  $\sigma^2$  recibe el nombre de variancia de la distribución.

Se ve que la desviación estándar tiene las mismas unidades que los datos originales.

En el caso de los datos de la Tabla 1, la desviación estándar es  $\sigma = 32.7$  kg/cm<sup>2</sup>.

Una propiedad importante de la curva de distribución normal es que, independientemente de su forma, si se lleva a ambos lados del promedio el valor de desviación estándar se obtiene un área parcial que representa un porcentaje fijo de los datos de la muestra en observación (68.2 %); análogamente, si a ambos lados del promedio se lleva el valor  $2\sigma$  se obtiene un área parcial que representa al 95% de la población de la muestra en estudio, obteniéndose un valor de 99.7% de los datos de la muestra si se lleva  $3\sigma$  a ambos lados del promedio. La Fig. 3 ilustra las afirmaciones anteriores.

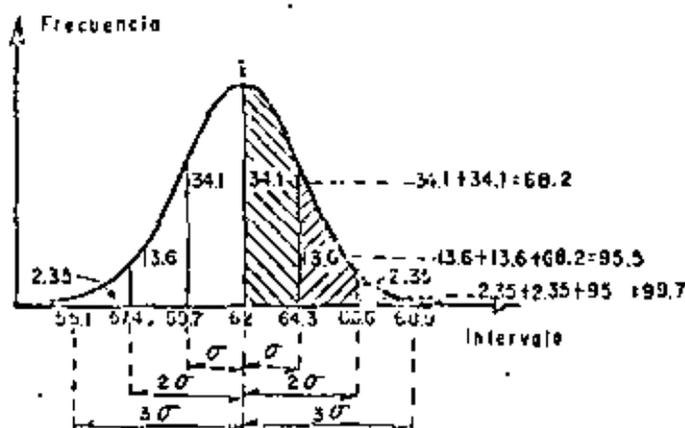


Figura 3. Porcentajes del área bajo la curva de distribución normal, correspondiente a distintos múltiplos de  $\sigma$ .

De nuevo con referencia a la Fig. 2, se ve que cuanto menor sea la desviación estándar se tiene un más bajo nivel de dispersión. Por ejemplo, para una curva como la A, un cierto intervalo  $x - \bar{x}$  puede quedar comprendido en la porción central de extensión  $+2\sigma$ , respecto al promedio ( $\bar{x}$ ); esto quiere decir que un 95% de los valores se desvían del promedio menos que la magnitud  $x - \bar{x}$ . Este mismo intervalo puede caer en la curva B dentro de la porción central de extensión únicamente  $+\sigma$ , lo que indica que en la distribución B sólo un 68.2% de los datos varían respecto al promedio menos que la diferencia  $x - \bar{x}$ . Así pues, a menor desviación estándar corresponde un menor nivel de dispersión en los datos.

Tomando en cuenta la propiedad anterior se ve claramente cómo la desviación estándar es una buena medida de la dispersión de los datos respecto al promedio; a mayor desviación estándar ( $\sigma$ ) el intervalo que comprende el mismo porcentaje de datos es más grande. Por ejemplo, en la Fig. 2 la desviación estándar de la curva A es mucho menor que la de la curva B, de manera que si ambas se refieren a dos series de resultados, obtenidos en dos labora-

torios, al practicar una misma prueba, por concretar un caso, podría decirse que el laboratorio A es mucho más consistente que el laboratorio B (supuesto que en ambos se probó el mismo suelo).

Es muy usual en las aplicaciones prácticas de estas ideas comparar la desviación estándar con el valor promedio de todos los datos, pues, con referencia a la Tabla 1 y a la Fig. 1, no es lo mismo que una desviación estándar de 20 kg/cm<sup>2</sup> respecto a una resistencia promedio de la roca de 150 kg/cm<sup>2</sup>, que respecto a otra de 400 kg/cm<sup>2</sup>. Este orden de ideas conduce a la definición del concepto de coeficiente de variación:

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

donde las letras tienen el significado visto atrás. El coeficiente de variación es adimensional y suele expresarse como porcentaje.

Finalmente, es usual hablar también de la variancia,  $\sigma^2$ , de la distribución de datos; este concepto tiene la ventaja de la constancia de su signo, que permite siempre una suma aritmética, en tanto que la desviación estándar puede desarrollarse a un lado u otro del promedio y tiene que ser tratada algebraicamente.

Cuando se comparan distribuciones reales de datos con especificaciones límites para dichos datos, lo cual es una situación muy frecuente en la práctica, pueden presentarse tres casos diferentes (Fig. 4).

a) Se produce una variación pequeña, con la mayoría de los datos dentro de los límites especificados. Esto indica que se está trabajando con especificaciones realistas y que los datos se están obteniendo con procesos bien controlados. Sin embargo, el hecho de que todos los datos queden dentro de los límites pudiera indicar que los sistemas de muestreo que se están utilizando adolecen de un defecto consistente y no proporcionan todos los tipos de muestras.

b) Se produce una variación relativamente pequeña con su promedio muy cerca de uno de los límites de la especificación. Esto puede indicar o que la producción de datos es inadecuada, debiendo mejorarse o que la especificación es poco realista, respecto a la práctica razonable.

c) Se obtiene una variación grande que hace improbable que la mayor parte de los datos caigan dentro de los límites especificados la mayor parte del tiempo. Esta situación indica que debe afinarse el control de la calidad de la producción de datos, para reducir la variación obtenida o que las tolerancias de la especificación no son realistas, y deben ampliarse.

Las tres condiciones anteriores deben mantenerse siempre en mente en procesos constructivos (tales como compactación, por ejemplo). El esquema mental que de su análisis se obtiene puede utilizarse para formar criterio en dos aspectos fundamentales:

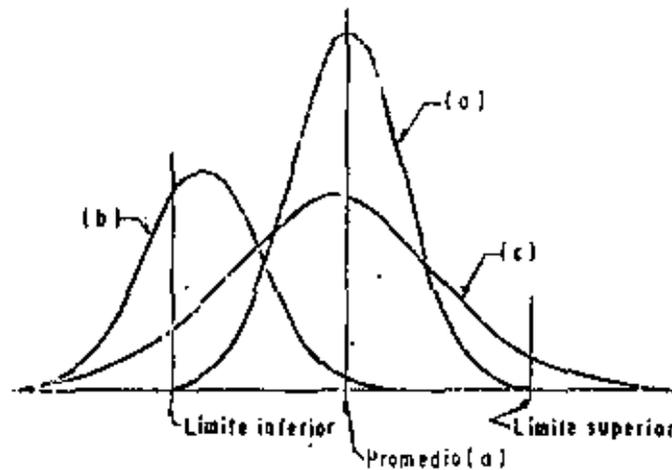


Figura 4. Posiciones de interés de una curva de distribución de datos respecto a límites de especificación.

1. Para establecer la confiabilidad de un material, proceso, método de prueba, etc., dados, con respecto a los requerimientos establecidos por las especificaciones.

2. Para comparar los requerimientos fijados por las especificaciones con la variabilidad de las operaciones reales típicas.

Este método de análisis permite visualizar las relaciones apropiadas entre las tolerancias de operación y los límites de las especificaciones y proporciona métodos lógicos para vislumbrar áreas que requieran estudio más detallado para determinar si hace falta mejorar el control o los métodos de administración o la necesidad de cambiar las especificaciones en uso.

Para asegurar la validez de un programa estadístico de control de calidad es preciso conocer y valorar de antemano, el error inherente al propio programa; para un cierto nivel de confianza, este error está dado por la expresión:

$$E_m = \frac{t \sigma}{\sqrt{n}}$$

donde,  $E_m$  es el error inherente al programa de control,  $\sigma$  y  $n$  tienen los sentidos ya discutidos y  $t$  es un factor que define el nivel de confianza con el que se desea trabajar la distribución de datos de que se disponga; con referencia a la fig. 3,  $t$  valdría 1 si se desea garantizar un nivel de confianza de 68.25,  $t$  valdría 2 si se desea garantizar un nivel de confianza de 95.5% ó,  $t$  valdría 3 si se desea garantizar un nivel de confianza en los resultados del análisis de 99.7%. Naturalmente podrán usarse valores intermedios, que

En la práctica el valor de  $t$  se fija a criterio de quien vaya a usar el programa de control.

Puede observarse que  $E_m$  disminuye cuando aumenta el número de datos de que se dispone ( $n$ ). En realidad  $E_m$  es el error que inevitablemente debe esperarse en el manejo del problema que se estudia; no depende de lo humano, por así decirlo, sino que es debido al azar.

El valor de  $\sqrt{V}$  correspondiente a todo un programa de control se integra en realidad con los valores de  $\sqrt{V}$  correspondientes a cada operación de las que constituyen el programa. Habrá análisis de datos en lo que se refiere a materiales, muestreo, pruebas de laboratorio, compilaciones, etc. El valor de total puede obtenerse con una expresión del tipo:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}$$

Si  $x$  es la variable que representa a los datos que se manejan y  $\bar{x}$  es la media de esos datos, tal como hasta ahora se ha considerado, conviene definir en muchas aplicaciones de la estadística al control de calidad un nuevo término.

$$z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma}$$

De la ecuación anterior se deduce que:

$$x = \bar{x} + \sigma z$$

lo que hace ver que la recién definida  $z$  es simplemente una nueva variable -- introducida por un cambio de variable que sigue la ley (anterior). Sin embargo, el manejo de la ecuación de la variable normal estándar proporciona normas útiles. Supóngase que un conjunto de muestras de roca dieron una resistencia media de 240 kg/cm<sup>2</sup> en compresión simple y que los datos se distribuyeran de manera que su desviación estándar fuera de 24 kg/cm<sup>2</sup>; supóngase también que se deseara trabajar con resistencias de 210 kg/cm<sup>2</sup> como mínimo. Surge entonces la necesidad de saber qué porcentaje de muestras debe esperarse que tengan una resistencia de 210 kg/cm<sup>2</sup> o menor. Aplicando la expresión de la variable estándar se ve que:

$$z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} = \frac{210 - 240}{24} = -1.2$$

Se ve que 210 kg/cm<sup>2</sup> corresponde a una desviación respecto a la media que está a  $1.2\sigma$  a la izquierda de dicha media. En las tablas de áreas bajo curvas de distribución normal correspondientes a distintas abscisas en función de  $\sigma$ , que existen en los tratados normales de estadística, puede verse que para  $z = 1.2$ , el 12% de los datos es el que queda fuera del intervalo  $x - x$ , o lo que es lo mismo, en el ejemplo que se ha venido manejando, sería de esperar que un 12% de los especímenes tuviesen un valor de resistencia menor que 210 kg/cm<sup>2</sup>.

Las tablas de áreas bajo la curva normal a que se ha hecho referencia se desprenden de la propiedad de dichas curvas que se manejó en la Fig. 3 y figuran, generalmente en función de  $z$  y no de  $x$  (como podría ser) en los tratados de estadística.

Si el 12% de muestras con resistencia igual o menor que 210 kg/cm<sup>2</sup> se considerase excesivamente peligroso, cabrían dos posibilidades de acción. Se podría incrementar por algún procedimiento la resistencia o se podría reducir la desviación estándar de los datos. Esta última línea de acción no tiene mucho sentido en el ejemplo que se ha puesto, pero sí podría tenerlo pleno si los datos provinieron de un proceso de producción como un concreto o un proceso de compactación, en los que sí pueden tomarse medidas para reducir la dispersión de los resultados logrados.

Si se tiene una población cuyo valor promedio sea  $\bar{x}'$  y cuya desviación estándar sea  $\sigma'$ , si se toman muestras al azar de cualquier tamaño  $n$ , los promedios de las muestras ( $\bar{x}$ ), cuya desviación estándar será  $\sigma$ , forman una distribución de frecuencias, que no coincide con la de la población. La dispersión de la distribución de frecuencias de los valores de  $\bar{x}$  parece depender no sólo de la dispersión de la población original, sino también del tamaño de la muestra  $n$ , de manera que cuanto mayor sea  $n$ , menor resulta la dispersión de los valores de  $\bar{x}$ .

A la larga, según crece  $n$ , número de elementos en cada muestra, el promedio de los valores  $\bar{x}$  tenderá a ser el mismo  $\bar{x}'$  y la desviación estándar de los valores  $\bar{x}$  ( $\sigma_{\bar{x}}$ ) será  $\sigma'/\sqrt{n}$  siendo  $\sigma'$  la desviación estándar de la población original. Por ejemplo, si  $n = 4$ , la desviación estándar de la distribución de frecuencia de los valores  $\bar{x}$  tiende a ser la mitad de la desviación estándar de la población original, pero si  $n = 16$ , la desviación estándar de los valores  $\bar{x}$  será solamente una cuarta parte de la de la población original.

Muchas veces se llama a  $\sigma_{\bar{x}}$  el error estándar de los promedios  $\bar{x}$ .

Independientemente de la forma de la distribución de la población original, sea normal o no, es verdadero que la  $\sigma_{\bar{x}}$  esperada es  $\sigma'/\sqrt{n}$  y que la  $\bar{x}$  esperada es la  $\bar{x}'$ . Si el universo original es normal, la estadística permite demostrar que la distribución de frecuencias esperada para los valores  $\bar{x}$  también es normal. Pero aún a partir de universos originales de forma rectangular o triangular, la distribución de los valores  $\bar{x}$  de las muestras es también aproximadamente normal.

En realidad, las afirmaciones anteriores sólo son válidas si  $n$  es grande ( $n > 30$ , en la práctica). Si  $n$  es pequeña, la discusión anterior sólo es -- aproximadamente correcta, pero puede considerarse como tal, en vista de que -- el error cometido no es de gran significación práctica.

### III. MUESTREO CON FINES DE ESTABLECER UN PROGRAMA ESTADÍSTICO DE CONTROL.

Una operación de muestreo lógica debe considerarse un requisito esencial para el planteamiento de un programa de control de calidad razonable. Este -- muestreo debe tomar en consideración tres factores esenciales. En primer lugar, debe ser suficiente para cubrir los requerimientos del programa del control, pero no más. Un muestreo que vaya más lejos costará más de lo necesario y, frecuentemente, mucho más. En segundo lugar el muestreo debe estar acorde con la homogeneidad de lo que se muestrea; los materiales u operaciones que -- tengan tendencia natural a la dispersión deberán muestrearse más que los homogéneos, de manera que el número de muestras que se obtenga, por ejemplo, en -- un material para subrasante deberá probablemente ser mayor que el que se ob -- tenga en un material triturado en planta para base. En tercer lugar el mues -- treo debe adaptarse a la importancia relativa dentro del conjunto de la obra -- del factor muestreado y a la repercusión técnica y económica de su aceptación o rechazo.

En un programa de construcción, las operaciones de muestreo se conducen -- generalmente en dos niveles. Primero, el total del material debe ser dividi -- do en un cierto número de lotes de tamaño parecido, cada uno de ellos repre -- sentativo de todo el conjunto; en la Ingeniería de carreteras, muchas veces -- ésta primera división se hace considerando tramos similares, zonas parecidas -- de bancos, etc. Después, cada uno de estos lotes debe muestrearse, para obt -- ner las muestras que serán objeto de análisis, generalmente en un laboratorio. El tamaño de los lotes originales depende mucho del valor de los materiales y su constitución depende del concepto que se desea medir. Por ejemplo, cuando se muestrean materiales térreos para la construcción, si son de bajo costo, -- pueden considerarse como primeras muestras los diferentes almacenamientos que se hagan, a veces miles de metros cúbicos cada uno; en materiales más costo -- sos, como los suelos estabilizados con cemento, por citar uno, es frecuente -- que la primera muestra sea mucho menor. El tamaño de las primeras muestras -- también podrá ser más grande cuando el material muestreado sea homogéneo. Lo -- importante será que las muestras seleccionadas, sean individualmente represen -- tativas de todo el conjunto del material que se vaya a usar en la obra. Para -- el caso de trabajos de compactación, la primera muestra sería un tramo de -- muestreo dentro del conjunto del camino.

El establecimiento del número de muestras de cada muestra inicial que ha -- de tomarse ya para hacer pruebas, también depende de la homogeneidad de lo -- probado, del costo del muestreo y de la representatividad que se pueda atri -- buir a cada muestra. Es una práctica común en la aplicación de métodos esta -- dísticos de control que el número de muestras que se seleccionan para ser pro -- badas sea lo suficientemente grande como para reflejar un rango de resultados -- que difiera de la media  $\pm 3\sigma$ , siendo  $\sigma$  la desviación estándar de la distri --

bución de dichos resultados. Esto significa (ver Fig. 3) trabajar con un nivel de confianza de 99.7%. Obviamente, cuanto mayor sea el número de muestras mayor será el rango de resultados, pero la media describirá mejor la verdadera situación promedio de la población que se muestree.

Los métodos de muestreo que se utilizan en la actualidad no siempre son razonables y no es difícil ver como se cometen errores fundamentales en este concepto. Un sencillo ejemplo puede ilustrar la afirmación anterior. Imagínese un cierto producto que sale de una planta en camiones, cada uno de los cuales lleva 100 unidades; imagínese también que se sabe que de ellas 10 son defectuosas. Un criterio de muestreo que no sería difícil ver hoy en uso sería el siguiente. Un inspector detiene cada camión y toma al azar una muestra de él (una unidad). Si la inspección es favorable, el camión pasa, pero si la muestra es defectuosa, el camión es rechazado. La lógica dice que nueve camiones pasarán y el décimo será objetado y, sin embargo, es evidente que todos los camiones están en igual condición. Un criterio de muestreo como el anterior no cumple la condición fundamental de aprobar lo que debe ser aprobado y rechazar lo que debe rechazarse.

El ejemplo anterior es elemental y un poco extremoso, pero los conceptos que involucra sí son válidos. Al fin y al cabo, no se hace algo muy diferente cuando se muestrea un camión de agregado extrayendo una pequeña cantidad - en un recipiente, un camión de concreto, uno de asfalto, un volumen de material en un banco, juzgando cada  $n$  metros cúbicos, por un metro cúbico analizado sistemáticamente, etc.

Un criterio de muestreo comúnmente empleado y que puede ser razonable, si se usa bien, es el denominado muestreo de aceptación. En este criterio se define un artículo como defectuoso cuando no se ajusta a las especificaciones previamente convenidas en una o más características de calidad. Según este criterio de muestreo se establece un plan de función de tres números,  $N$  es el número de elementos que existía en el lote o muestra original, de los que se va a extraer la muestra de prueba;  $n$  es el número de elementos extraídos del lote, que constituirá la muestra de prueba y  $c$  es el denominado número de aceptación de la muestra, que es el número máximo de elementos defectuosos o por debajo de una especificación que se permiten. Así, según este criterio, el muestreo está automáticamente ligado al criterio de rechazo, pues más de  $c$  elementos defectuosos en la muestra originarán el rechazo del lote o muestra original. En la gran mayoría de los procesos de control de calidad, tal como hoy se llevan a cabo, se utilizan procedimientos de muestreo según este criterio. Cuando se muestrean elementos discretos es muy común fijar un lote de 50, 100, etc. elementos y extraer de él, procurando llegar a una extracción al azar, un 10% de los elementos (5, 10, etc.) y estudiar esta muestra fijando un número  $c$  a criterio; muchas veces este número es cero, expresando la ilusión de que si la muestra en estudio es perfecta, el lote será perfecto y la población total a que ambos se refieren, también lo será. En trabajos de compactación, la aplicación del criterio anterior no es tan evidente, pero se hace; suele fijarse una determinada sección de muestreo de un cierto número de metros de longitud, cada determinado número de kilómetros o de metros y se acepta que los resultados de dicha sección representan al lote o tramo completo. Usualmente se mide grado de compactación y es frecuente, pero no debido,

que  $c$  sea igual a cero; es decir, que no se acepte ningún grado de compactación por abajo del valor especificado.

Al seguir un criterio como el que arriba se ha bosquejado se encontrará siempre una relación entre el porcentaje de los lotes analizados que serán aceptados (a lo que suele llamarse probabilidad de aceptación,  $P$ ) y el porcentaje de los elementos defectuosos que contenga cada lote ( $p$ ). Se suponen lotes de  $N$  elementos, de los que se tomarán sólo  $n$  para su estudio, con un número de aceptación  $c$ . Imagínese que se trata de lotes de 50 elementos, de los que se analizarán 5 con un número de aceptación = 0; imagínese también que un 4% (en promedio) de los elementos de cada lote son defectuosos; es decir, en cada lote de 50 hay en promedio dos elementos malos. Lo que expresa la relación entre la probabilidad de aceptación (porcentaje de lotes aprobados) y el porcentaje de elementos defectuosos en cada lote es el hecho de que al muestrear 5 de los 50 elementos no necesariamente se obtendrá uno de los cuatro malos, de manera que hay cierta probabilidad de que el lote pase por perfecto. La relación anterior se denomina curva característica de operación del proceso y muestra en definitiva, para cada fracción defectuosa en el lote, ( $p$ ), cual es la probabilidad de aceptación del lote ( $P$ ) al seguir el plan de muestreo. La Fig. 5 muestra la curva de operación característica correspondiente a  $N = 50$ ,  $n = 5$ ,  $c = 0$ .

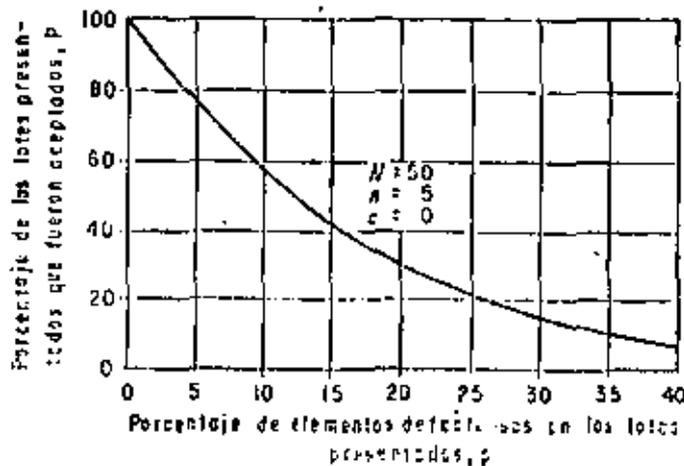


Figura 5. Curva de operación característica.

Es fácil ver como se obtienen los diferentes puntos que forman la curva. Supóngase por ejemplo que  $p = 4\%$  es el porcentaje medio de elementos defectuosos en cada lote de 50 elementos ( $N = 50$ ); supóngase también que de cada lote se toman 5 elementos para ser probados ( $n = 5$ ) y, finalmente, supóngase que la población en estudio está formada por 1000 lotes de 50 elementos, es decir, por 50000 elementos. El estudio se hará con el criterio  $c = 0$ ; es decir, hasta que un elemento de la muestra de 5 sea defectuoso para que el lote correspondiente se rechace.

Si en el lote de 50 hay dos elementos malos (4%), habrá 48 buenos y la probabilidad de extraer un elemento bueno al formar la muestra de estudio será  $48/50$ . Esta operación deberá repetirse 5 veces para que el lote sea aceptado, luego la probabilidad de aceptación será  $(48/50)^5$ , o sea 80% en números redondos, para 1000 lotes, que es la ordenada que aproximadamente se lee en la abscisa 4%, en la Fig. 5.

Un plan de muestreo como el anterior es rara vez cuestionado en la metodología actual de control de calidad y, sin embargo, debe de serlo. En el uso del criterio expuesto está incluida la ilusión de que la muestra perfecta representa al lote perfecto y a la población perfecta, lo que evidentemente no es cierto puesto que cierto número de elementos defectuosos están aleatoriamente mezclados con los buenos, en los lotes. Se ha supuesto que el promedio de elementos malos es 4% por lote, pero esto quiere decir que un lote puede tener 0% de elementos malos y otro un 6%.

En el criterio en uso está incluida además otra hipótesis; la de que la protección dada por un sistema de muestreo es constante, si la relación del tamaño de la muestra al tamaño del lote lo es también.

La Fig. 6 ilustra lo inexacto de esta última idea. En ella se comparan cuatro curvas de operación correspondientes a lotes en que se ha dividido a una población de 50000 elementos, de 50, 100, 200 y 1000 unidades. En todos los casos la muestra para estudio es el 10% del lote ( $n = 5, 10$  y  $100$  elementos).

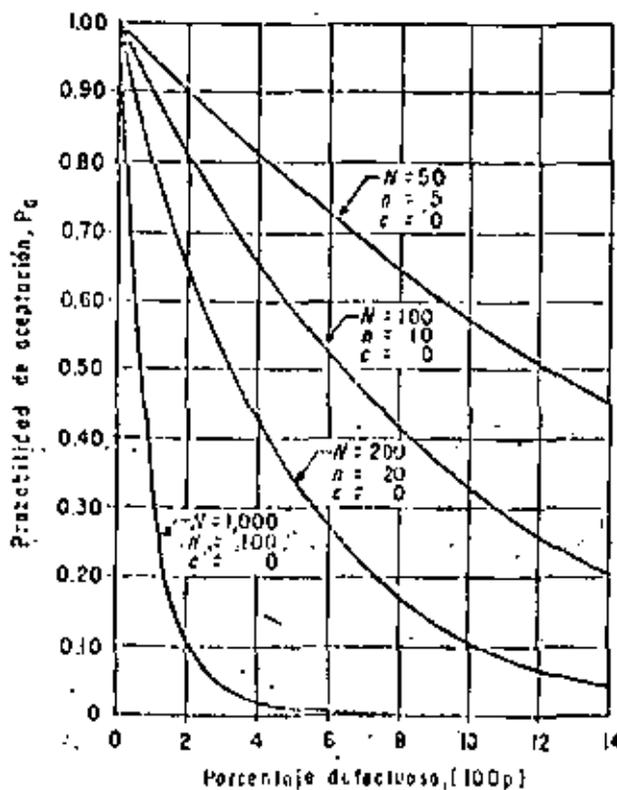


Figura 6. Comparación de curvas de operación característica de cuatro variantes de un plan de muestreo, con muestras de 10% del lote.

tos, supuestamente extraídos al azar).

Las diferencias en la protección de la calidad proporcionadas por este plan de muestreo son impresionantes. Se ve que los lotes que contienen un 4% de elementos defectuosos serán aceptados el 80% de las veces, cuando se usa una muestra de un 10% de un lote de 50; el 65% de veces cuando se use un lote de 100 elementos y menos del 2% de las veces cuando la muestra sea un 10% de 1000 elementos en cada lote. Se ve difícil confiar en un criterio de muestreo que conduce a tales variaciones simplemente por su tamaño, especialmente si se tiene en cuenta que las realidades de los procesos ingenieriles imponen constantemente cambios drásticos en los tamaños de las muestras, por problemas de disponibilidad o costo.

Otra manera interesante de interpretar las curvas de la Fig. 6 es la siguiente. Cabe preguntarse cuál será la calidad del lote que pasará un 50% de las veces en cada variante del plan de muestreo. Se ve en la figura que, con lotes de 50 elementos, un lote que contenga un 12% de elementos defectuosos será aceptado el 50% de las veces, pero si el lote es de 100 elementos ya sólo pasará la mitad de las veces un lote que contenga 6% de elementos defectuosos; este porcentaje pasa a 3 para lote de 200 y 0.65 para lotes de 1000. Nuevamente se pone de manifiesto la escasa consistencia del plan de muestreo.

En realidad, es mucho más importante el tamaño absoluto de la muestra tomada al azar que su valor relativo respecto al tamaño del lote. Este hecho, que se desprende fácilmente de la Fig. 6, se ve todavía con mayor claridad al considerar la información contenida en la Fig. 7. En ella se vuelven a presentar cuatro variantes del plan de muestreo que se comenta ( $N = 50, 100, 200$  y 1000), pero extrayendo en todos los casos una muestra de  $n = 20$  elementos.

Es de notar, en primer lugar, como las cuatro curvas se desarrollan ahora en forma similar, desapareciendo las grandes divergencias atrás analizadas.

Lo anterior lleva a conducir como criterio práctico que, un procedimiento de muestreo, como el que se ha venido discutiendo puede aplicarse en aquellos casos en que el número de elementos de la muestra por analizar sea constante en todos los casos, en tanto que conduce a una operación de control no protegida cuando se adopta el criterio de trabajar siempre con una fracción fija del número de elementos de los lotes muestreados. En vías terrestres hay casos en que es fácil trabajar con muestras de número fijo, como podría ocurrir en plantas de trituración, de asfalto o aun muchos trabajos de compactación, pero hay otros casos en que, por disponibilidad de elementos o por razones de costo, ha de trabajarse con muestra de diferente población. De todo lo anterior se sigue que, en el primer caso, el simple muestreo de aceptación puede conducir a condiciones de control razonables, pero en el segundo caso, la operación de muestreo ha de planearse con otras bases:

El número de aceptación ( $c$ ) no necesita ser cero; si se observan las Figs. 6 y 7 se destacará el hecho de que una muestra perfecta no asegura un lote perfecto. Esta conclusión hace ver la falta de fundamento de las objeciones presentadas al no permitir elementos defectuosos dentro de un lote.

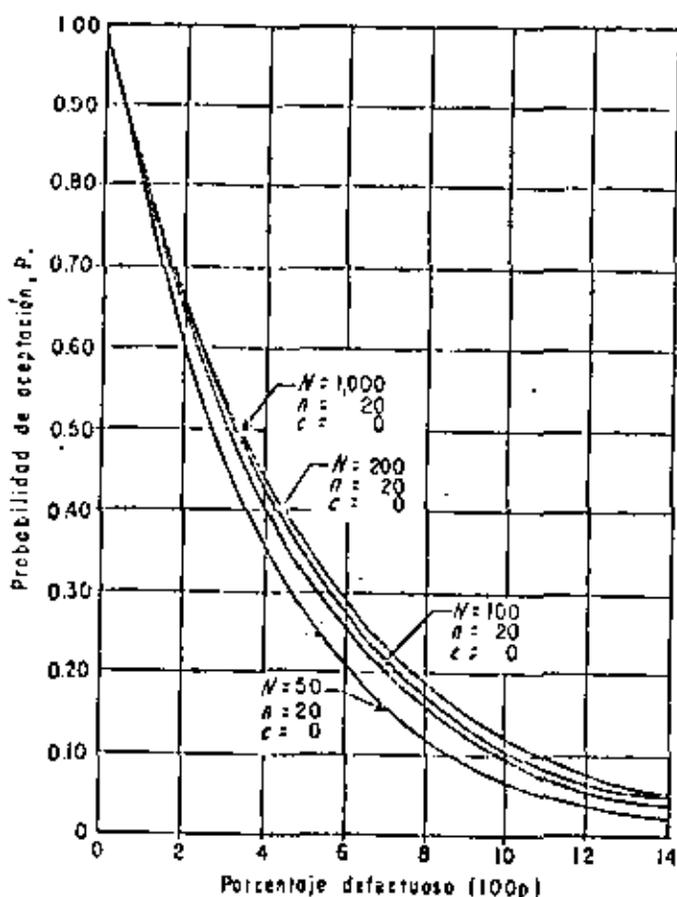


Figura 7. Comparación de curvas OC para cuatro variantes de un plan de muestreo con muestras de veinte elementos.

Lo anterior conduce a que la protección deseada, contra aceptación de lotes con elementos defectuosos, tomará en cuenta tamaños más grandes de muestras, ya que éstas tienen mayores posibilidades de discriminar entre lotes satisfactorios y no satisfactorios.

La Fig. 8 muestra tres variantes de muestreo; el primero para  $N = 1000$ ,  $n = 100$  y  $c = 0$ ; el segundo para  $N = 1000$ ,  $n = 170$  y  $c = 1$  y el tercero para  $N = 1000$ ,  $n = 240$  y  $c = 2$ . Se notará de inmediato que las tres curvas consideradas, dan igual protección contra la aceptación de un lote con 2.2% de elementos defectuosos. Las variantes con  $c = 1$  y  $c = 2$ , dan algo mejor protección contra el rechazo de lotes satisfactorios.

Los anteriores esquemas, se denominan de muestreo sencillo, puesto que el criterio para la aceptación o el rechazo de un lote representativo de una población se basa en el análisis de una muestra de dicho lote. No es frecuente, sobre todo en problemas de control de calidad industrial, el denominado muestreo doble, que implica la posibilidad de posponer la decisión de aceptación o rechazo del lote hasta haber analizado una segunda muestra. General-

mente el muestreo doble se implica aceptando de inmediato un lote cuya primera muestra haya sido muy buena y rechazándolo cuando haya sido muy mala. Si no ocurre ninguno de estos dos extremos, la decisión se basa en el análisis de la primera y la segunda muestra combinadas. Un plan de muestreo doble se esquematizaría por medio de los siguientes números, cuyo sentido se estima evidente.  $N = 1000$ ,  $n = 36$ ,  $c_1 = 0$ ,  $n_2 = 59$  y  $c_2 = 3$ . Puede interpretarse como sigue.

-Inspecciónese una primera muestra con 36 elementos de un lote que tiene una población de 1000.

-Acéptese el lote sobre la base de la primera muestra, si ésta tiene cero elementos defectuosos.

-Recházese el lote, basado en la inspección de la primera muestra, si dicha muestra contiene más de 3 defectuosos.

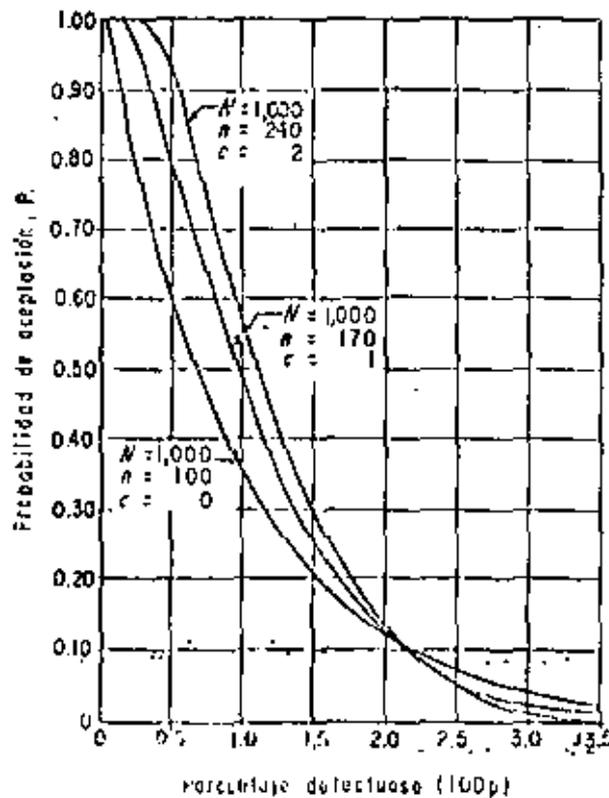


Figura 8. Curvas de operación para tres variantes de muestreo de aceptación con  $P = 10\%$  de aceptar un lote con 22% de elementos defectuosos.

-Inspecciónese una segunda muestra, de 59 elementos, si la primera muestra contiene 1, 2 ó 3 defectuosos.

-Aceptese el lote sobre la base de la muestra combinada de 95 elementos (36 + 59), si la muestra combinada contiene 3 defectuosos o menos.

-Recházese el lote sobre la base de la muestra combinada si dicha muestra contiene más de 3 elementos defectuosos.

En la Fig. 9 se muestran 3 curvas de operación característica relacionadas con el análisis del plan de muestreo señalado. El resultado del proceso de muestreo debe ser alguno de los siguientes:

-Aceptación del lote después de la primera muestra, si en ésta no se encontró ningún elemento defectuoso.

-Recházese el lote, si la primera muestra obtenida contiene más de 3 elementos defectuosos.

-Aceptar el lote después de inspeccionar la segunda muestra, si se obtienen 3 elementos defectuosos o menos en el total de 95, contenidos en ambas muestras.

-Rechazar el lote, si en la muestra combinada se obtienen más de 3 elementos defectuosos.

La curva A ( $N = 1000$ ,  $n = 36$ ,  $c = 0$ ) de la Fig. 9 corresponde a las probabilidades de aceptación del lote con base en la primera muestra, para diferentes porcentajes de elementos defectuosos. La curva C ( $N = 1000$ ,  $n = 36$ ,  $c = 3$ ) representa la probabilidad de que el lote no sea rechazado después del análisis de la primera muestra, en cuyo caso deberá procederse a la obtención de una segunda muestra. Las dos curvas mencionadas pueden ser trazadas de la manera que se discutió para el caso de muestreo sencillo. Para cualquier valor dado de porcentaje de elementos defectuosos en el lote, la diferencia de ordenadas entre las curvas A y C corresponde a la probabilidad de que se requiera obtener una segunda muestra. La curva B exhibe el comportamiento del plan de muestreo doble. Para determinar las ordenadas de los puntos de esta curva (las abscisas están determinadas por el porcentaje de elementos defectuosos), se requiere calcular la probabilidad de que el lote sea aceptado al obtener una segunda muestra, que en el caso que se ejemplifica puede ocurrir en cualquiera de las siguientes formas:

-Cero defectuosos en la primera muestra.

-Un defectuoso en la primera muestra y cero, uno o dos defectuosos en la segunda muestra.

-Dos defectuosos en la primera muestra y cero o un defectuoso en la segunda muestra.

-Tres defectuosos en la primera muestra y ningún defectuoso en la segunda muestra.

La probabilidad de aceptar el lote resulta ser la suma de las probabilidades de que ocurran por separado cada uno de los cuatro eventos arriba señalados. Dicho cálculo pertenece ya al dominio del análisis probabilístico y sale por completo de los límites asignados a este capítulo, que debe quedar íntegramente en el terreno conceptual. No debe olvidarse que el control de calidad es, como ya se dijo, un campo especial dentro de la tecnología de carreteras, con metodología propia, por cierto muy compleja, la cual debe ser dominada por ingenieros que actúen específicamente dentro del campo del control, pero cuyos detalles quedan fuera de la atención del ingeniero que atiende de los aspectos a que se refiere esta obra.

La curva B de la Fig. 9 es el resultado del cálculo arriba mencionado y divide al espacio comprendido entre las curvas A y C en la forma que en la propia figura se señala.

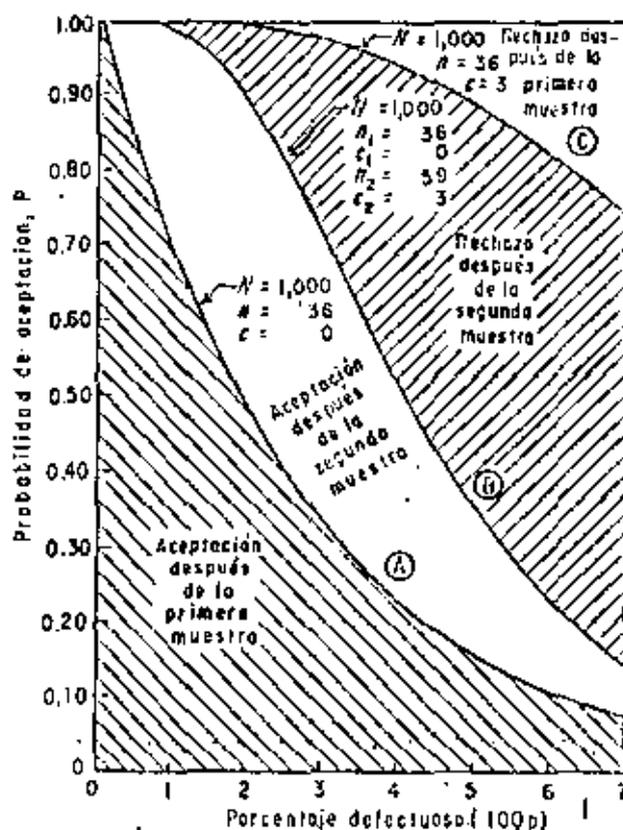


Figura 9. Curvas características de operación en un plan de muestreo doble.

Todavía existen planes de muestreo múltiple, en que la decisión de la aceptación o el rechazo se basa en el análisis de más de dos muestras.

Un hecho, sin embargo, parece no ser suficientemente reconocido por los métodos tradicionales de muestreo, aún por aquellos que van más allá de la

ma simple de un porcentaje fijo de los elementos del lote muestreado y hacen uso de mejoras racionales, del estilo de las que más atrás se han discutido o de otras que existen. Este hecho es la variabilidad de los resultados de cualesquiera pruebas a que se sometan los elementos de las muestras individuales que se analizan. Esta variabilidad es debida, como se dijo, tanto a problemas derivados del procedimiento de prueba como a otros que amanan del material o de los propios procesos de muestreo. Todos estos factores son variables aleatorias y, por lo tanto, los valores que derivan de cualquier conjunto de pruebas lo son también, por lo que todo el proceso de muestreo ha de ser tratado, en sentido estricto, como un proceso estadístico. Esto requiere que la obtención de muestras se haga realmente al azar, siguiendo las reglas que la estadística científica ha desarrollado para el caso. Pruebas realizadas a partir de lo que, un inspector considere muestras buenas o malas o indicativas de la situación promedio, no pueden ser consideradas muestras al azar; sólo muestras obtenidas siguiendo las reglas estrictas de la estadística pueden dar una verdadera indicación de la calidad de los materiales o de los trabajos que se estén estudiando.

Es sabido que, en los trabajos conectados con el control de calidad de las vías terrestres, es muy común que la confrontación del resultado de una cierta actividad o de la calidad de un material con los límites previamente especificados haya de hacerse con base en unos cuantos valores probados. Generalmente, cuando no se usan métodos de control estadístico esto hace que se establezca un requerimiento de carácter absolutista, exigiendo que todos los valores encontrados satisfagan los límites especificados. Ya se comentaron algunos inconvenientes importantes de esta actitud. La alternativa es establecer criterios de aceptación que reconozcan que los valores de pruebas realizadas en muestras obtenidas al azar pueden variar. Un requerimiento absoluto puede necesitar, si ha de aspirar a tener algún sentido, un gran número de valores de control; por ejemplo, si se establece la norma de que el 95% de todos los valores probados satisfagan una cierta especificación y se toman 20 muestras de 100 elementos, lo cual es un número muy elevado, bastará que una prueba en las 20 falle para que se rechace todo el lote. El muestreo estadístico, en cambio puede proporcionar criterios razonables de aceptación en casos como el anterior con no más de 4 ó 5 pruebas.

Un plan de muestreo estadístico debe tener las siguientes características:

-Debe poseer un procedimiento objetivo para la selección de la muestra, fundado en el uso de una tabla de números aleatorios.

-Debe incluir un procedimiento claro para la estimación cuantitativa de las características de la muestra y del error estándar de dicha estimación. Si el resultado del análisis de la muestra se utiliza para un juicio de decisión, las reglas que rijan dicho juicio también deberán estar claramente incluidas. En muestreo para aceptación o rechazo, el plan deberá señalar muy claramente los niveles en que tales acciones se deberán ejercer.

### III. MUESTREO CON BASE EN TABLAS DE NUMEROS ALEATORIOS.

Una tabla de números aleatorios es una disposición estrictamente al azar de números de un cierto número prefijado de cifras. La tabla 2 es una de ellas, en este caso números de dos cifras. Pueden formarse introduciendo en una urna los nueve dígitos y el cero, sacándolos al azar de uno en uno, reintegrando de inmediato el número extraído y anotando cada una de las parejas como un número en la tabla.

Una vez formada la tabla puede funcionar como de mayor número de cifras. Por ejemplo, la tabla 2 como de números de cuatro cifras simplemente considerando dos columnas adyacentes en cada lectura. En vías terrestres es común en muchos casos referir los muestreos al kilometraje de una línea de trazo, para señalar el lugar donde se extraerá una muestra (se dice, por ejemplo, km 105+286 para señalar una estación). Este orden de muestreo puede señalarse dentro de un cierto tramo recorriendo la tabla desde el principio y seleccionando todos los números aleatorios que vayan surgiendo y que estén comprendidos dentro del tramo. La selección de las estaciones del muestreo ha de hacerse después de seleccionar a criterio el número de muestras que se desea tomar dentro del tramo.

Imagínese que en el tramo comprendido entre los kms 125+250 y 142+300 se desea señalar cinco estaciones para muestreo de compactación, eligiéndolas aleatoriamente. Se usará la tabla con tres columnas, puesto que se manejan seis cifras. Viendo la tabla, las estaciones de muestreo serían; 128+079, 125+507, 140+620, 131+165 y 135+462. Naturalmente, en un muestreo aleatorio las ubicaciones de las estaciones de muestreo no resultan equidistantes, ni su ubicación sigue ninguna de las leyes que son usuales en otros tipos de plan.

El procedimiento está basado en la utilización de la Tabla 3 que es otro ejemplo, de una tabla de números aleatorios. Para la determinación de las estaciones de muestreo se requiere seguir los siguientes puntos.

- Determinar la distancia promedio a que se desea tomar las muestras para su análisis; así, si se tiene un tramo de 5500 m y se desea una distancia promedio de 500 m, el número de muestras requerido resultará igual a 11.

Para seleccionar la columna correspondiente de la tabla de números aleatorios se requerirá colocar en una urna tarjetas numeradas del número 1 al número 28 y extraer una de ellas al azar. Debe observarse que este número de tarjetas es en realidad arbitrario y siempre estará en función del número de columnas con que se cuente en la tabla de números aleatorios. Para este caso son 28 las columnas.

Una vez que se ha seleccionado, por el procedimiento del punto anterior, una de las columnas de la tabla, deberá localizarse en la subcolumna A correspondiente, todos los números menores o iguales en el número de muestras requerido determinado en el primer punto. Considérese por ejemplo que se ha elegido aleatoriamente la columna No. 20 y que el número de muestras requerido será de 11. En la subcolumna B se encontrará el factor por el cual debe multiplicarse la longitud del tramo para determinar la distancia al origen de todas las estaciones de muestreo. Para el caso que se ejemplifica se tendrá:

T A B L A 2

Tabla de números aleatorios para localización longitudinal y transversal de puntos de muestreo.

| Col. No. 1 |      |      | Col. No. 2 |      |      | Col. No. 3 |      |      | Col. No. 4 |      |      | Col. No. 5 |      |      | Col. No. 6 |      |      | Col. No. 7 |      |      |
|------------|------|------|------------|------|------|------------|------|------|------------|------|------|------------|------|------|------------|------|------|------------|------|------|
| A          | B    | C    | A          | B    | C    | A          | B    | C    | A          | B    | C    | A          | B    | C    | A          | B    | C    | A          | B    | C    |
| 15         | .033 | .576 | 05         | .048 | .879 | 21         | .013 | .220 | 18         | .089 | .716 | 17         | .024 | .863 | 30         | 0.30 | .901 | 12         | 0.29 | .386 |
| 2          | .101 | .300 | 17         | .074 | .156 | 30         | .036 | .853 | 10         | .102 | .330 | 24         | .050 | .032 | 21         | .096 | .133 | 18         | .112 | .284 |
| 23         | .129 | .915 | 18         | .102 | .191 | 10         | .052 | .746 | 14         | .111 | .925 | 26         | .074 | .639 | 10         | .100 | .161 | 20         | .114 | .843 |
| 30         | .163 | .434 | 06         | .105 | .257 | 25         | .061 | .954 | 28         | .127 | .840 | 07         | .167 | .512 | 29         | .133 | .383 | 03         | .121 | .655 |
| 24         | .177 | .397 | 28         | .179 | .447 | 29         | .062 | .507 | 24         | .132 | .271 | 28         | .194 | .776 | 24         | .139 | .062 | 13         | .178 | .640 |
| 11         | .202 | .271 | 26         | .179 | .844 | 13         | .037 | .887 | 19         | .285 | .899 | 03         | .219 | .166 | 20         | .168 | .554 | 22         | .209 | .421 |
| 16         | .204 | .012 | 04         | .183 | .482 | 24         | .105 | .849 | 01         | .326 | .037 | 29         | .264 | .284 | 22         | .232 | .953 | 16         | .221 | .311 |
| 08         | .208 | .418 | 02         | .208 | .577 | 07         | .139 | .159 | 30         | .334 | .938 | 11         | .282 | .262 | 14         | .259 | .217 | 29         | .235 | .356 |
| 19         | .211 | .798 | 03         | .214 | .402 | 01         | .175 | .641 | 22         | .405 | .295 | 14         | .379 | .994 | 01         | .275 | .195 | 28         | .264 | .941 |
| 29         | .233 | .070 | 07         | .245 | .030 | 33         | .196 | .873 | 05         | .421 | .282 | 13         | .394 | .405 | 06         | .277 | .475 | 11         | .287 | .199 |
| 07         | .260 | .073 | 15         | .248 | .831 | 26         | .240 | .981 | 13         | .451 | .212 | 06         | .410 | .157 | 02         | .296 | .497 | 02         | .336 | .992 |
| 17         | .262 | .308 | 29         | .261 | .087 | 14         | .255 | .374 | 02         | .461 | .023 | 15         | .438 | .700 | 26         | .311 | .144 | 15         | .393 | .488 |
| 25         | .271 | .180 | 30         | .302 | .883 | 06         | .310 | .043 | 06         | .487 | .539 | 22         | .453 | .635 | 05         | .351 | .141 | 19         | .437 | .655 |
| 06         | .302 | .672 | 21         | .318 | .088 | 11         | .316 | .653 | 08         | .497 | .396 | 21         | .472 | .824 | 17         | .370 | .811 | 24         | .466 | .773 |
| 01         | .409 | .406 | 11         | .376 | .936 | 13         | .324 | .585 | 25         | .503 | .893 | 05         | .488 | .118 | 09         | .388 | .484 | 14         | .531 | .014 |
| 13         | .507 | .693 | 14         | .430 | .814 | 12         | .351 | .275 | 15         | .594 | .603 | 01         | .525 | .222 | 04         | .410 | .073 | 09         | .562 | .678 |
| 02         | .575 | .654 | 27         | .438 | .676 | 20         | .371 | .535 | 27         | .620 | .894 | 12         | .561 | .980 | 25         | .471 | .530 | 06         | .601 | .675 |
| 13         | .591 | .318 | 03         | .467 | .205 | 08         | .409 | .495 | 21         | .629 | .841 | 08         | .652 | .508 | 13         | .486 | .779 | 10         | .612 | .859 |
| 20         | .610 | .321 | 09         | .474 | .138 | 16         | .445 | .740 | 17         | .691 | .580 | 18         | .668 | .271 | 15         | .515 | .867 | 26         | .673 | .112 |
| 12         | .631 | .597 | 10         | .492 | .474 | 03         | .494 | .929 | 09         | .708 | .689 | 30         | .736 | .634 | 23         | .567 | .798 | 23         | .738 | .770 |
| 27         | .651 | .281 | 13         | .499 | .892 | 27         | .543 | .387 | 07         | .709 | .012 | 02         | .763 | .253 | 11         | .518 | .502 | 21         | .753 | .614 |
| 04         | .661 | .953 | 19         | .511 | .520 | 17         | .625 | .171 | 11         | .714 | .049 | 23         | .804 | .140 | 28         | .636 | .148 | 30         | .758 | .851 |
| 22         | .692 | .089 | 23         | .591 | .770 | 02         | .699 | .073 | 23         | .720 | .695 | 25         | .828 | .425 | 27         | .650 | .741 | 27         | .765 | .563 |
| 05         | .779 | .346 | 20         | .604 | .730 | 19         | .702 | .934 | 03         | .748 | .413 | 10         | .843 | .627 | 16         | .711 | .508 | 07         | .780 | .534 |
| 09         | .787 | .173 | 24         | .554 | .330 | 22         | .816 | .802 | 20         | .781 | .603 | 16         | .858 | .849 | 19         | .778 | .812 | 04         | .818 | .187 |
| 10         | .818 | .837 | 12         | .729 | .523 | 04         | .838 | .166 | 26         | .830 | .384 | 04         | .903 | .327 | 07         | .804 | .675 | 17         | .837 | .353 |
| 14         | .895 | .631 | 16         | .753 | .344 | 15         | .904 | .116 | 04         | .843 | .002 | 09         | .912 | .382 | 08         | .806 | .952 | 05         | .854 | .818 |
| 26         | .912 | .375 | 01         | .806 | .134 | 28         | .959 | .742 | 12         | .884 | .582 | 27         | .935 | .162 | 18         | .841 | .414 | 01         | .867 | .133 |
| 28         | .920 | .163 | 22         | .878 | .834 | 09         | .974 | .046 | 29         | .926 | .700 | 20         | .970 | .582 | 12         | .918 | .114 | 08         | .915 | .538 |
| 03         | .945 | .140 | 25         | .939 | .162 | 05         | .977 | .494 | 16         | .951 | .601 | 19         | .975 | .327 | 03         | .992 | .399 | 25         | .975 | .584 |

| Col. No. 8 |      |      | Col. No. 9 |      |      | Col. No. 10 |      |      | Col. No. 11 |      |      | Col. No. 12 |      |      | Col. No. 13 |      |      | Col. No. 14 |      |      |
|------------|------|------|------------|------|------|-------------|------|------|-------------|------|------|-------------|------|------|-------------|------|------|-------------|------|------|
| A          | B    | C    | A          | B    | C    | A           | B    | C    | A           | B    | C    | A           | B    | C    | A           | B    | C    | A           | B    | C    |
| 09         | .042 | .071 | 14         | .061 | .935 | 26          | .038 | .023 | 27          | .074 | .779 | 16          | .073 | .987 | 03          | .033 | .091 | 26          | .035 | .175 |
| 17         | .141 | .411 | 02         | .065 | .097 | 30          | .066 | .371 | 06          | .084 | .396 | 23          | .078 | .056 | 07          | .047 | .391 | 17          | .069 | .363 |
| 02         | .143 | .221 | 03         | .094 | .223 | 27          | .073 | .876 | 24          | .098 | .524 | 17          | .096 | .076 | 28          | .064 | .113 | 10          | .149 | .681 |
| 05         | .152 | .899 | 16         | .122 | .945 | 09          | .095 | .568 | 10          | .133 | .919 | 04          | .153 | .163 | 12          | .066 | .360 | 28          | .238 | .075 |
| 03         | .285 | .016 | 18         | .158 | .430 | 05          | .180 | .741 | 15          | .187 | .079 | 10          | .254 | .834 | 26          | .076 | .552 | 13          | .244 | .767 |
| 28         | .291 | 0.34 | 25         | .193 | .469 | 12          | .200 | .851 | 17          | .227 | .767 | 06          | .234 | .623 | 30          | .087 | .101 | 24          | .262 | .366 |
| 08         | .359 | .557 | 24         | .224 | .572 | 13          | .259 | .327 | 20          | .236 | .571 | 12          | .305 | .615 | 02          | .127 | .187 | 08          | .264 | .651 |
| 01         | .435 | .325 | 10         | .225 | .223 | 21          | .264 | .681 | 01          | .245 | .988 | 25          | .319 | .901 | 06          | .144 | .068 | 18          | .255 | .311 |
| 20         | .450 | .289 | 09         | .253 | .838 | 17          | .283 | .645 | 04          | .317 | .291 | 01          | .320 | .212 | 25          | .202 | .674 | 02          | .340 | .131 |
| 18         | .455 | .769 | 20         | .290 | .120 | 23          | .363 | .063 | 29          | .350 | .911 | 08          | .416 | .372 | 01          | .247 | .025 | 29          | .353 | .478 |
| 23         | .438 | .715 | 01         | .297 | .242 | 20          | .364 | .366 | 26          | .380 | .104 | 13          | .432 | .556 | 23          | .253 | .323 | 06          | .359 | .270 |
| 14         | .496 | .276 | 11         | .337 | .760 | 16          | .395 | .363 | 28          | .425 | .864 | 02          | .489 | .827 | 24          | .320 | .651 | 20          | .387 | .248 |
| 15         | .503 | .342 | 19         | .325 | .064 | 02          | .423 | .540 | 22          | .487 | .526 | 29          | .503 | .787 | 10          | .328 | .365 | 14          | .392 | .694 |
| 04         | .515 | .693 | 13         | .411 | .474 | 08          | .432 | .736 | 05          | .552 | .511 | 15          | .518 | .717 | 27          | .338 | .412 | 03          | .408 | .077 |
| 16         | .532 | .112 | 20         | .447 | .393 | 10          | .476 | .468 | 14          | .564 | .357 | 28          | .524 | .998 | 13          | .355 | .991 | 27          | .440 | .260 |
| 22         | .557 | .357 | 22         | .478 | .321 | 03          | .508 | .774 | 11          | .572 | .306 | 03          | .542 | .352 | 16          | .401 | .792 | 22          | .461 | .830 |
| 11         | .559 | .620 | 29         | .481 | .993 | 01          | .601 | .417 | 21          | .594 | .197 | 19          | .585 | .462 | 17          | .423 | .117 | 16          | .527 | .003 |
| 12         | .650 | .216 | 27         | .562 | .403 | 22          | .687 | .917 | 09          | .607 | .524 | 05          | .695 | .111 | 21          | .481 | .838 | 30          | .531 | .486 |
| 21         | .672 | .320 | 04         | .566 | .179 | 29          | .697 | .862 | 19          | .650 | .572 | 07          | .733 | .838 | 08          | .560 | .401 | 25          | .678 | .360 |
| 13         | .709 | .273 | 08         | .603 | .753 | 11          | .701 | .605 | 18          | .664 | .101 | 11          | .744 | .948 | 19          | .564 | .190 | 21          | .725 | .014 |
| 07         | .745 | .687 | 15         | .632 | .927 | 07          | .728 | .498 | 25          | .674 | .428 | 18          | .793 | .748 | 05          | .571 | .054 | 05          | .797 | .595 |
| 30         | .780 | .285 | 06         | .707 | .107 | 14          | .745 | .679 | 02          | .697 | .674 | 27          | .802 | .967 | 18          | .587 | .584 | 15          | .801 | .927 |
| 19         | .845 | .097 | 28         | .737 | .161 | 24          | .819 | .444 | 03          | .767 | .926 | 21          | .826 | .487 | 15          | .604 | .145 | 12          | .836 | .294 |
| 26         | .846 | .365 | 17         | .846 | .130 | 15          | .840 | .823 | 16          | .809 | .529 | 24          | .835 | .832 | 11          | .641 | .298 | 04          | .854 | .982 |
| 29         | .861 | .307 | 07         | .874 | .491 | 25          | .863 | .568 | 30          | .838 | .294 | 26          | .855 | .142 | 22          | .672 | .156 | 11          | .884 | .928 |
| 25         | .906 | .874 | 05         | .890 | .828 | 06          | .878 | .215 | 13          | .845 | .470 | 14          | .861 | .462 | 20          | .674 | .887 | 19          | .886 | .832 |
| 24         | .919 | .809 | 23         | .931 | .659 | 18          | .930 | .601 | 08          | .855 | .524 | 20          | .374 | .625 | 14          | .752 | .281 | 07          | .929 | .932 |
| 10         | .919 | .809 | 26         | .960 | .365 | 04          | .954 | .827 | 07          | .867 | .718 | 30          | .929 | .056 | 09          | .774 | .560 | 09          | .932 | .206 |
| 06         | .961 | .504 | 21         | .978 | .194 | 28          | .965 | .004 | 12          | .881 | .722 | 09          | .935 | .582 | 29          | .921 | .752 | 01          | .970 | .692 |
| 27         | .969 | .811 | 12         | .982 | .183 | 19          | .983 | .020 | 23          | .937 | .872 | 22          | .947 | .797 | 04          | .959 | .099 | 23          | .973 | .062 |

| Col. No. 15 |      |      | Col. No. 16 |      |      | Col. No. 17 |      |      | Col. No. 18 |      |      | Col. No. 19 |      |      | Col. No. 20 |      |      | Col. No. 21 |      |      |
|-------------|------|------|-------------|------|------|-------------|------|------|-------------|------|------|-------------|------|------|-------------|------|------|-------------|------|------|
| A           | B    | C    | A           | B    | C    | A           | B    | C    | A           | B    | C    | A           | B    | C    | A           | B    | C    | A           | B    | C    |
| 15          | .023 | .979 | 19          | .062 | .588 | 13          | .045 | .004 | 25          | .027 | .290 | 12          | .052 | .075 | 20          | .030 | .881 | 01          | .010 | .946 |
| 11          | .118 | .455 | 25          | .080 | .218 | 18          | .086 | .878 | 06          | .057 | .571 | 30          | .075 | .493 | 12          | .034 | .291 | 10          | .014 | .939 |
| 07          | .134 | .172 | 09          | .131 | .295 | 26          | .125 | .990 | 26          | .069 | .026 | 28          | .120 | .341 | 22          | .043 | .823 | 07          | .032 | .346 |
| 01          | .139 | .230 | 18          | .135 | .381 | 12          | .123 | .661 | 07          | .105 | .176 | 27          | .145 | .689 | 28          | .143 | .073 | 06          | .093 | .180 |
| 16          | .145 | .122 | 05          | .147 | .864 | 30          | .146 | .337 | 18          | .107 | .358 | 02          | .209 | .957 | 03          | .150 | .937 | 15          | .151 | .012 |
| 20          | .165 | .520 | 12          | .158 | .365 | 05          | .159 | .470 | 22          | .128 | .827 | 26          | .272 | .818 | 04          | .154 | .867 | 16          | .185 | .455 |
| 06          | .185 | .431 | 28          | .214 | .184 | 21          | .244 | .433 | 23          | .156 | .440 | 22          | .299 | .317 | 19          | .158 | .359 | 07          | .227 | .277 |
| 09          | .211 | .316 | 14          | .215 | .757 | 23          | .270 | .849 | 15          | .171 | .157 | 18          | .306 | .475 | 29          | .304 | .615 | 02          | .304 | .400 |
| 14          | .242 | .348 | 13          | .224 | .846 | 25          | .274 | .407 | 08          | .220 | .097 | 20          | .311 | .653 | 06          | .369 | .633 | 39          | .316 | .074 |
| 25          | .249 | .890 | 15          | .227 | .809 | 10          | .290 | .925 | 20          | .252 | .066 | 15          | .348 | .156 | 18          | .390 | .536 | 18          | .328 | .799 |
| 13          | .252 | .577 | 11          | .220 | .890 | 01          | .323 | .490 | 04          | .268 | .576 | 16          | .381 | .710 | 17          | .403 | .392 | 20          | .352 | .288 |
| 30          | .273 | .088 | 01          | .331 | .925 | 24          | .352 | .291 | 14          | .275 | .302 | 01          | .411 | .607 | 23          | .404 | .182 | 26          | .371 | .216 |
| 19          | .277 | .639 | 10          | .399 | .992 | 15          | .361 | .155 | 11          | .297 | .589 | 13          | .417 | .715 | 01          | .415 | .457 | 19          | .448 | .754 |
| 22          | .372 | .958 | 30          | .417 | .757 | 29          | .374 | .882 | 01          | .358 | .305 | 21          | .472 | .484 | 07          | .437 | .696 | 13          | .487 | .593 |
| 10          | .481 | .075 | 08          | .439 | .921 | 08          | .432 | .139 | 09          | .412 | .689 | 04          | .478 | .885 | 24          | .446 | .546 | 12          | .546 | .640 |
| 26          | .519 | .536 | 20          | .472 | .484 | 04          | .467 | .266 | 16          | .429 | .834 | 25          | .479 | .080 | 26          | .435 | .768 | 24          | .550 | .035 |
| 17          | .520 | .090 | 24          | .498 | .712 | 22          | .508 | .880 | 10          | .491 | .200 | 11          | .566 | .104 | 15          | .511 | .313 | 03          | .604 | .780 |
| 03          | .523 | .519 | 04          | .516 | .396 | 27          | .632 | .191 | 28          | .542 | .306 | 10          | .576 | .659 | 10          | .517 | .290 | 22          | .621 | .930 |
| 25          | .573 | .502 | 03          | .548 | .688 | 16          | .661 | .836 | 12          | .563 | .091 | 29          | .665 | .397 | 30          | .556 | .853 | 21          | .629 | .154 |
| 19          | .604 | .206 | 23          | .597 | .508 | 19          | .675 | .629 | 02          | .593 | .321 | 19          | .739 | .298 | 25          | .561 | .837 | 11          | .634 | .905 |
| 24          | .635 | .810 | 21          | .641 | .114 | 14          | .680 | .890 | 30          | .692 | .198 | 14          | .749 | .759 | 09          | .574 | .599 | 05          | .696 | .459 |
| 21          | .679 | .841 | 02          | .739 | .293 | 23          | .714 | .508 | 19          | .705 | .445 | 08          | .756 | .919 | 13          | .613 | .762 | 23          | .710 | .078 |
| 27          | .712 | .366 | 29          | .792 | .058 | 06          | .719 | .441 | 24          | .709 | .717 | 07          | .793 | .183 | 11          | .698 | .783 | 29          | .725 | .585 |
| 05          | .730 | .497 | 22          | .829 | .324 | 09          | .735 | .040 | 13          | .820 | .739 | 23          | .834 | .647 | 14          | .715 | .179 | 17          | .749 | .916 |
| 23          | .861 | .106 | 17          | .834 | .647 | 17          | .741 | .906 | 05          | .848 | .866 | 06          | .837 | .978 | 16          | .770 | .128 | 04          | .802 | .185 |
| 12          | .855 | .377 | 16          | .909 | .602 | 11          | .747 | .205 | 27          | .857 | .633 | 03          | .849 | .964 | 08          | .815 | .385 | 14          | .835 | .319 |
| 29          | .882 | .635 | 06          | .914 | .420 | 20          | .850 | .047 | 03          | .883 | .333 | 24          | .851 | .109 | 05          | .872 | .490 | 08          | .870 | .546 |
| 08          | .902 | .020 | 27          | .958 | .656 | 02          | .859 | .356 | 17          | .900 | .443 | 05          | .859 | .935 | 21          | .885 | .999 | 28          | .871 | .539 |
| 04          | .951 | .482 | 26          | .981 | .976 | 07          | .870 | .612 | 21          | .914 | .483 | 17          | .863 | .220 | 02          | .958 | .177 | 25          | .971 | .369 |
| 02          | .977 | .172 | 07          | .983 | .624 | 08          | .917 | .463 | 29          | .950 | .750 | 09          | .863 | .147 | 27          | .961 | .980 | 27          | .924 | .252 |

| Col. No. 22 |      |      | Col. No. 23 |      |      | Col. No. 24 |      |      | Col. No. 25 |      |      | Col. No. 26 |      |      | Col. No. 27 |      |      | Col. No. 28 |      |      |
|-------------|------|------|-------------|------|------|-------------|------|------|-------------|------|------|-------------|------|------|-------------|------|------|-------------|------|------|
| A           | B    | C    | A           | B    | C    | A           | B    | C    | A           | B    | C    | A           | B    | C    | A           | B    | C    | A           | B    | C    |
| 12          | .051 | .032 | 26          | .051 | .187 | 08          | .015 | .521 | 02          | .039 | .006 | 16          | .026 | .102 | 21          | .050 | .952 | 29          | .042 | .039 |
| 11          | .068 | .980 | 03          | .053 | .256 | 16          | .068 | .994 | 16          | .061 | .599 | 01          | .033 | .886 | 17          | .085 | .403 | 07          | .105 | .293 |
| 17          | .089 | .309 | 29          | .100 | .159 | 11          | .118 | .400 | 26          | .068 | .054 | 04          | .088 | .686 | 10          | .141 | .624 | 25          | .115 | .420 |
| 1           | .091 | .371 | 13          | .102 | .465 | 21          | .124 | .565 | 11          | .073 | .812 | 22          | .090 | .602 | 05          | .154 | .157 | 09          | .126 | .612 |
| 0           | .100 | .709 | 24          | .110 | .316 | 18          | .153 | .158 | 07          | .123 | .649 | 13          | .114 | .614 | 06          | .164 | .841 | 10          | .205 | .144 |
| 30          | .121 | .744 | 18          | .114 | .300 | 17          | .190 | .159 | 05          | .126 | .658 | 20          | .136 | .576 | 07          | .197 | .013 | 03          | .210 | .054 |
| 02          | .165 | .056 | 11          | .123 | .208 | 26          | .192 | .676 | 14          | .161 | .189 | 05          | .138 | .228 | 16          | .215 | .363 | 23          | .234 | .533 |
| 23          | .179 | .529 | 09          | .138 | .182 | 01          | .237 | .030 | 18          | .166 | .040 | 10          | .216 | .565 | 08          | .222 | .520 | 13          | .266 | .799 |
| 21          | .187 | .051 | 06          | .194 | .115 | 12          | .283 | .077 | 28          | .243 | .171 | 02          | .233 | .610 | 13          | .269 | .477 | 20          | .305 | .603 |
| 22          | .205 | .543 | 22          | .234 | .480 | 03          | .236 | .318 | 06          | .255 | .117 | 07          | .278 | .357 | 02          | .288 | .012 | 05          | .372 | .223 |
| 28          | .230 | .688 | 20          | .274 | .107 | 10          | .317 | .734 | 15          | .261 | .928 | 30          | .405 | .273 | 25          | .333 | .633 | 26          | .335 | .111 |
| 19          | .243 | .001 | 21          | .331 | .292 | 05          | .337 | .844 | 10          | .301 | .811 | 06          | .421 | .807 | 28          | .348 | .710 | 30          | .422 | .515 |
| 27          | .267 | .990 | 08          | .346 | .085 | 25          | .441 | .336 | 24          | .363 | .025 | 12          | .426 | .583 | 20          | .362 | .961 | 17          | .453 | .783 |
| 15          | .283 | .440 | 27          | .382 | .979 | 27          | .469 | .786 | 22          | .378 | .792 | 08          | .471 | .708 | 14          | .511 | .929 | 02          | .460 | .916 |
| 16          | .352 | .089 | 07          | .387 | .855 | 27          | .469 | .786 | 27          | .379 | .959 | 13          | .473 | .738 | 26          | .540 | .903 | 27          | .461 | .841 |
| 03          | .377 | .648 | 28          | .411 | .776 | 20          | .475 | .761 | 19          | .420 | .557 | 19          | .510 | .207 | 27          | .587 | .643 | 14          | .483 | .095 |
| 06          | .397 | .769 | 16          | .444 | .999 | 06          | .557 | .001 | 21          | .467 | .943 | 03          | .512 | .329 | 12          | .603 | .745 | 12          | .507 | .375 |
| 09          | .409 | .428 | 04          | .515 | .993 | 07          | .610 | .238 | 17          | .494 | .225 | 15          | .640 | .329 | 29          | .619 | .895 | 28          | .509 | .748 |
| 14          | .455 | .406 | 17          | .518 | .827 | 09          | .617 | .041 | 09          | .620 | .081 | 09          | .665 | .354 | 23          | .623 | .333 | 21          | .583 | .804 |
| 13          | .499 | .651 | 05          | .539 | .620 | 13          | .641 | .648 | 30          | .623 | .106 | 14          | .680 | .884 | 22          | .624 | .076 | 22          | .587 | .993 |
| 04          | .539 | .972 | 02          | .623 | .272 | 22          | .664 | .291 | 03          | .625 | .777 | 26          | .703 | .622 | 18          | .670 | .904 | 16          | .689 | .339 |
| 18          | .560 | .747 | 30          | .637 | .374 | 19          | .717 | .232 | 03          | .651 | .790 | 29          | .739 | .394 | 11          | .711 | .253 | 06          | .727 | .298 |
| 26          | .575 | .892 | 14          | .714 | .364 | 02          | .776 | .504 | 12          | .715 | .599 | 25          | .759 | .386 | 01          | .790 | .392 | 04          | .731 | .814 |
| 29          | .756 | .712 | 15          | .730 | .107 | 02          | .775 | .504 | 23          | .782 | .093 | 24          | .803 | .602 | 04          | .813 | .611 | 08          | .807 | .983 |
| 20          | .760 | .920 | 19          | .771 | .552 | 29          | .777 | .548 | 20          | .810 | .371 | 27          | .842 | .491 | 19          | .843 | .732 | 15          | .833 | .757 |
| 05          | .847 | .925 | 23          | .780 | .662 | 14          | .823 | .223 | 01          | .841 | .726 | 21          | .870 | .435 | 03          | .844 | .511 | 19          | .896 | .464 |
| 25          | .972 | .891 | 10          | .924 | .888 | 23          | .848 | .264 | 29          | .862 | .009 | 28          | .906 | .367 | 30          | .858 | .299 | 18          | .916 | .384 |
| 24          | .874 | .135 | 12          | .929 | .204 | 30          | .892 | .817 | 25          | .891 | .873 | 23          | .948 | .367 | 09          | .929 | .199 | 01          | .948 | .610 |
| 08          | .911 | .215 | 01          | .937 | .714 | 28          | .943 | .190 | 04          | .917 | .264 | 11          | .956 | .142 | 24          | .931 | .263 | 11          | .975 | .799 |
| 07          | .946 | .065 | 25          | .974 | .392 | 15          | .975 | .962 | 13          | .958 | .990 | 17          | .993 | .989 | 15          | .939 | .947 | 24          | .978 | .633 |

Para determinar la localización en el sentido del eje transversal del camino será necesario multiplicar el ancho total de la sección, por el coeficiente decimal de la subcolumna C del renglón correspondiente al número de cada una de las muestras; a este producto deberá restarse el semi-ancho de la sección; si esta diferencia resulta positiva, el punto de muestreo deberá situarse a la derecha del centro de línea del camino y si resulta negativa, este punto se situará a la izquierda. En el caso que se ejemplifica se considerará un ancho de la sección de 12 cm. (TABLA No. 4).

TABLA 3

Determinación de la posición de las estaciones y de muestreo en la sección transversal.

| Número de Muestra | Factor | Distancia de Origen             |
|-------------------|--------|---------------------------------|
| 01                | 0.415  | $5500 \times 0.415 = 2 + 282.5$ |
| 02                | 0.958  | $5500 \times 0.958 = 5 + 169.0$ |
| 03                | 0.150  | $5500 \times 0.150 = 0 + 825.0$ |
| 04                | 0.154  | $5500 \times 0.154 = 0 + 847.0$ |
| 05                | 0.872  | $5500 \times 0.872 = 4 + 796.0$ |
| 06                | 0.369  | $5500 \times 0.369 = 2 + 029.5$ |
| 07                | 0.437  | $5500 \times 0.437 = 2 + 403.5$ |
| 08                | 0.815  | $5500 \times 0.815 = 4 + 482.5$ |
| 09                | 0.574  | $5500 \times 0.574 = 3 + 157.0$ |
| 10                | 0.517  | $5500 \times 0.517 = 2 + 843.5$ |
| 11                | 0.698  | $5500 \times 0.698 = 3 + 839.0$ |

En la figura 10 se ilustra el plan de muestreo para el ejemplo que se ha descrito.

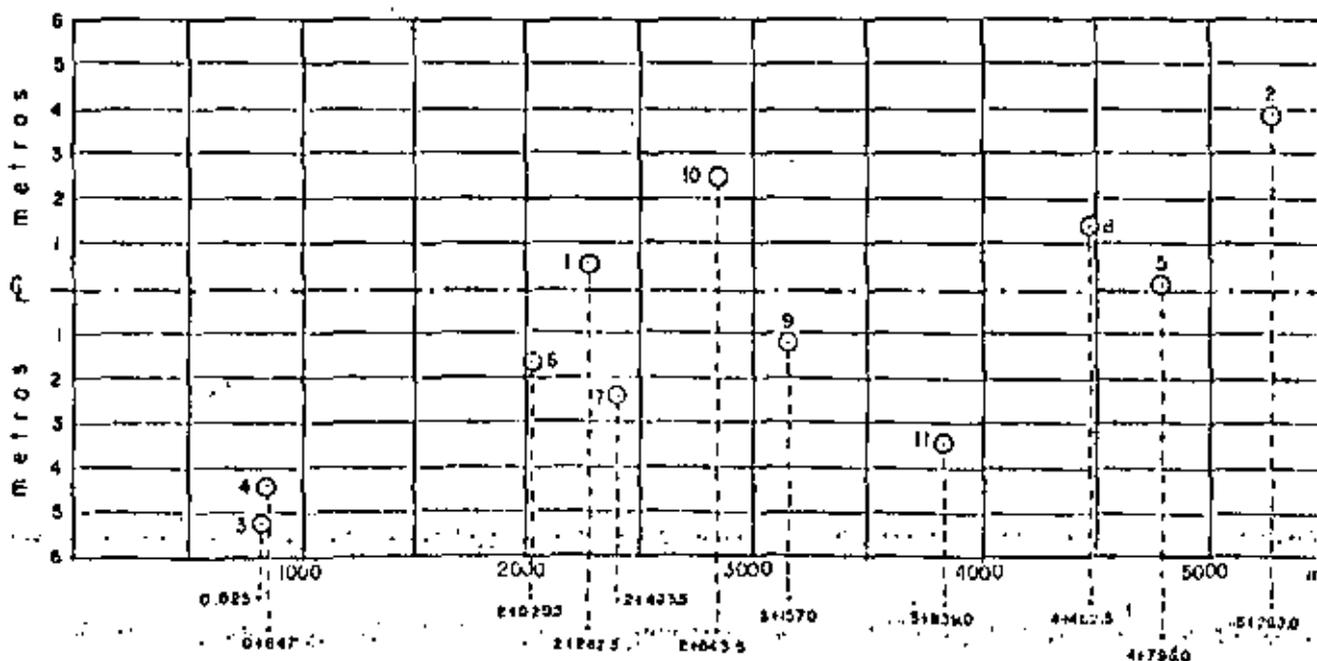
El procedimiento que se ha presentado podría ser utilizado en el caso muy frecuente de determinación de un valor representativo de los parámetros de resistencia de subrasantes para el diseño de pavimentos; otra aplicación, podría encontrarse en la elaboración de un plan de muestreo para el control de compactación de las diferentes capas de suelo que constituyen la sección estructural de una vía terrestre.

Puede verse que la gran ventaja del muestreo aleatorio estriba en que todos los elementos de la población tienen la misma oportunidad de ser extraídos y probados. Cualquier otro procedimiento de muestreo tiene el riesgo de caer en algún "criterio" ejercido por el inspector, que haga diferente la oportunidad de los elementos de la población para ser probados. Por lo demás, al

TABLA 4

Determinación de la posición de las estaciones de muestreo según el eje longitudinal.

| Número de muestra | Factor | Producto                 | Distancia del centro de línea |
|-------------------|--------|--------------------------|-------------------------------|
| 01                | 0.457  | $12 \times 0.457 = 5.5$  | 0.5 Izquierda                 |
| 02                | 0.177  | $12 \times 0.177 = 2.1$  | 3.9 Izquierda                 |
| 03                | 0.937  | $12 \times 0.937 = 11.2$ | 5.2 Derecha                   |
| 04                | 0.867  | $12 \times 0.867 = 10.4$ | 4.4 Derecha                   |
| 05                | 0.490  | $12 \times 0.490 = 5.9$  | 0.1 Izquierda                 |
| 06                | 0.633  | $12 \times 0.633 = 7.6$  | 1.6 Derecha                   |
| 07                | 0.696  | $12 \times 0.696 = 8.4$  | 2.4 Derecha                   |
| 08                | 0.385  | $12 \times 0.385 = 4.6$  | 1.4 Izquierda                 |
| 09                | 0.599  | $12 \times 0.599 = 7.2$  | 1.2 Derecha                   |
| 10                | 0.290  | $12 \times 0.290 = 3.5$  | 2.5 Izquierda                 |
| 11                | 0.783  | $12 \times 0.783 = 9.4$  | 3.4 Derecha                   |



muestreo aleatorio le son aplicables los principios básicos discutidos en - - otras partes de este párrafo, de manera que, por ejemplo, cuanto mayor sea el tamaño de la muestra que se pruebe a fin de cuentas, mayor será la probabilidad de que se detecte lo que debe ser rechazado o lo que es defectuoso.

#### IV. METODOS ESTADISTICOS DE CONTROL DE CALIDAD.

##### A) Métodos basados en el uso de gráficas de control.

##### A-1) Gráficas de control.

Imagínese que se tienen 20 estaciones con muestreo de compactación (peso volumétrico seco máximo) en un tramo de un camino, contando cada una de las - estaciones de 5 puntos distribuidos transversalmente. Supóngase que la tabla 5 resume los resultados de todas las medidas efectuadas.

Con los datos de la tabla 5 podría ocurrirse dibujar las dos gráficas - que se muestran en la Fig. 11. En la parte (a) de dicha figura aparecen las mediciones individuales graficadas para cada muestra; también se señala el valor nominal o pretendido para el peso volumétrico seco máximo y los límites - de tolerancias superior e inferior que se suponen aceptables para el problema en estudio (en realidad, como se verá, estos límites no son arbitrarios, sino que quedan dados por las leyes de la estadística para un proceso de produc -- ción dado. Es muy común que en prácticas viciosas se fijen arbitrariamente - por un criterio experimental o por cualquier otro, pero al hacer eso se vio - lan leyes de la estadística y el proceso de control deja de ser un proceso - realmente estadístico).

En la parte b de la figura 11 se han dibujado los promedios de las 5 medidas en cada una de las 20 muestras.

Ambas gráficas pueden mostrar ciertas tendencias en los resultados obtenidos y si éstos se salen o no de las tolerancias especificadas; sin embargo, como se verá, distan de ser gráficas útiles en un verdadero control de cali - dad.

La Fig. 12 muestra dos gráficas de control que es posible realizar a par - tir de los datos de la tabla 5. En la parte a de la figura se han dibujado - los promedios  $\bar{x}$ ; se trata de la misma gráfica lib, pero con los límites supe - rior e inferior de aceptación y sin dibujar la línea quebrada que une los pun - tos anotados. En un proceso sujeto a control estadístico la posición de los límites superior e inferior en la gráfica de las  $\bar{x}$  no es arbitraria; es decir, dada la población de los límites superior e inferior correspondientes a dicha población puede ser calculada por los propios métodos estadísticos o, lo que es lo mismo, a un cierto proceso de producción de datos o de medidas le corres - ponden unos límites superior e inferior de aceptación y rechazo, en lo que se refiere a las variaciones resultado del azar o inherentes al propio proceso - de producción, de manera que si ciertos datos de los graficados en las cartas de control se salen de unos límites estadísticamente seleccionados puede afir - marse que su variación es debida a razones externas a aquellas que son inheren

T A B L A 5

Medidas del peso volumétrico seco máximo en 20  
estaciones de verificación de compactación  
(kg/m<sup>3</sup>)

| Muestra No. | Valor en cada punto sobre la sección transversal |      |      |      |      | Promedio ( $\bar{x}$ ) |       | Amplitud R |
|-------------|--|------|------|------|------|------------------------|-------|------------|
| 1           | 1800   | 1750 | 1700 | 1650 | 1600 | 1700                   | 70.7  | 200        |
| 2           | 1550   | 1550 | 1700 | 1600 | 1500 | 1580                   | 67.8  | 200        |
| 3           | 1500   | 1500 | 1600 | 1500 | 1600 | 1540                   | 49.0  | 100        |
| 4           | 1600   | 1650 | 1650 | 1600 | 1750 | 1650                   | 54.8  | 150        |
| 5           | 1600   | 1700 | 1850 | 1850 | 1750 | 1750                   | 94.9  | 250        |
| 6           | 1600   | 1500 | 1550 | 1650 | 1650 | 1610                   | 37.4  | 100        |
| 7           | 1650   | 1650 | 1800 | 1600 | 1550 | 1650                   | 83.7  | 250        |
| 8           | 1150   | 1650 | 1800 | 1750 | 1800 | 1630                   | 243.5 | 650        |
| 9           | 2150   | 1800 | 1750 | 1200 | 1550 | 1690                   | 312.1 | 950        |
| 10          | 1800   | 1750 | 1800 | 2050 | 2050 | 1890                   | 131.9 | 300        |
| 11          | 1700   | 1900 | 1750 | 1700 | 1900 | 1790                   | 91.7  | 200        |
| 12          | 1800   | 1900 | 1950 | 1950 | 2000 | 1920                   | 67.8  | 200        |
| 13          | 1800   | 2000 | 1750 | 1300 | 1650 | 1700                   | 230.2 | 700        |
| 14          | 1800   | 1750 | 1850 | 1700 | 1650 | 1750                   | 70.07 | 200        |
| 15          | 1500   | 1850 | 1650 | 1700 | 1750 | 1690                   | 115.7 | 350        |
| 16          | 1400   | 1550 | 1650 | 1650 | 1650 | 1580                   | 124.9 | 250        |
| 17          | 1650   | 1700 | 1700 | 1650 | 1750 | 1650                   | 83.7  | 250        |
| 18          | 1350   | 1400 | 1450 | 1350 | 1500 | 1410                   | 58.3  | 150        |
| 19          | 1750   | 1800 | 1450 | 1350 | 1600 | 1590                   | 171.5 | 450        |
| 20          | 1650   | 1750 | 1750 | 1950 | 1800 | 1780                   | 69.3  | 300        |

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n} = 1677.5 \text{ kg/m}^3$$

$$\bar{R} = \frac{\sum R}{n} = 312.5 \text{ kg/m}^3$$

$$\sigma = 111.48 \text{ kg/m}^3$$

$$\sigma_{\bar{x}} = 115.15 \text{ kg/m}^3$$

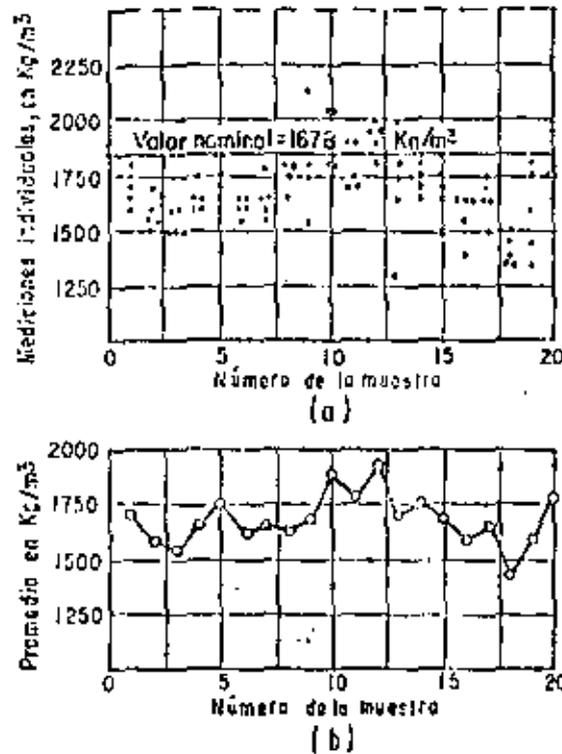


Figura 11. Gráficas de resultados de pruebas individuales y sus promedios de un proceso.

tes al proceso y, por ende, inevitables; estas segundas razones, debidas a -- causas ajenas al desarrollo del proceso pueden y deben ser corregidas. Este señalamiento es la información fundamental que una gráfica de control puede -- proporcionar y podría enunciarse diciendo que una gráfica de control estadísticamente construida permite diferenciar las variaciones inevitables de un -- proceso cualquiera de producción de medidas y datos, de aquellas que, por el -- contrario, podrían evitarse. Se señala así, por la simple presencia de estas últimas variaciones, en qué momento el proceso en estudio se sale de control -- y há de ser modificado o ajustado; además, las gráficas de control señalan -- cuántas y qué muestras presentan variaciones que deben ser objeto de correc -- ción.

La parte (b) de la figura 12 muestra la gráfica de control construida -- con base en las amplitudes de cada muestra.

#### A-1.1 Gráficas de control de medias ( $\bar{x}$ ).

Los límites de control pueden calcularse con base en diferentes paráme -- tros.

##### A-1.1-a Con base en el promedio de las amplitudes.

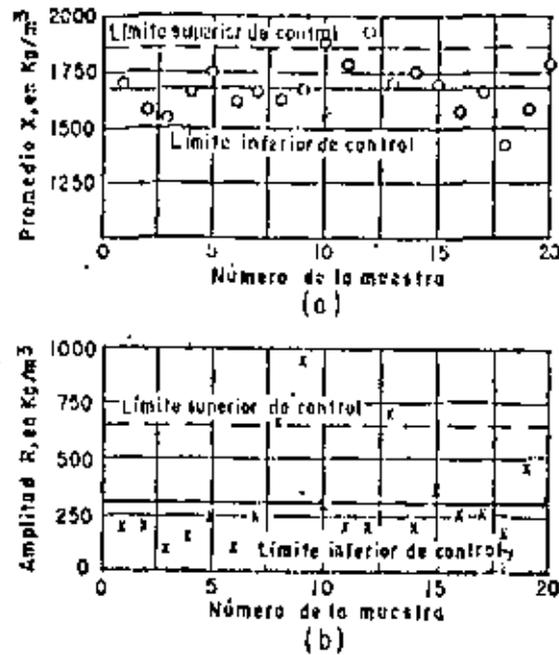


Figura 12. Gráficas de control de un proceso de compactación.  
 a.- Gráfica de promedios.  
 b.- Gráfica de amplitudes.

Las fórmulas a aplicar son las siguientes:

$$LS = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R}$$

$$LI = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R}$$

Donde LS y LI son los límites superior e inferior de control,  $\bar{R}$  es el promedio de las amplitudes que se tengan en cada muestra analizada  $\bar{x}$  es el promedio de las medias de las muestras analizadas y  $A_2$  es un coeficiente que puede calcularse en la tabla 6.

Con referencia al ejemplo presentado en la Tabla 5,  $\bar{\bar{x}}$  sería el promedio de todas las  $\bar{x}$ , obtenido dividiendo entre 20 la suma de todas ellas y  $\bar{R}$  sería el promedio de todas las R, calculado de la misma manera. En este caso:

$$\bar{\bar{x}} = 1677.5$$

$$\bar{R} = 312.5$$

Para  $n = 5$ , la Tabla 6 proporciona un valor  $A_2 = 0.58$ . Con todos estos datos resulta:

$$LS = 1858.9$$

$$LI = 1496.25$$

TABLA 6  
Factores para determinar los límites de control a partir de R para gráficas  $\bar{X}$  y R

| Número de observaciones en el subgrupo | Factor para la gráfica $\bar{X}$ | Factores para la gráfica R |                            |
|--|----------------------------------|----------------------------|----------------------------|
|  |                                  | Límite inferior de control | Límite superior de control |
| $n$                                    | $A_2$                            | $D_3$                      | $D_4$                      |
| 2                                      | 1.88                             | 0                          | 3.27                       |
| 3                                      | 1.02                             | 0                          | 2.57                       |
| 4                                      | 0.73                             | 0                          | 2.28                       |
| 5                                      | 0.58                             | 0                          | 2.11                       |
| 6                                      | 0.48                             | 0                          | 2.00                       |
| 7                                      | 0.42                             | 0.08                       | 1.92                       |
| 8                                      | 0.37                             | 0.14                       | 1.86                       |
| 9                                      | 0.34                             | 0.18                       | 1.82                       |
| 10                                     | 0.31                             | 0.22                       | 1.78                       |
| 11                                     | 0.29                             | 0.26                       | 1.74                       |
| 12                                     | 0.27                             | 0.28                       | 1.72                       |
| 13                                     | 0.25                             | 0.31                       | 1.69                       |
| 14                                     | 0.24                             | 0.33                       | 1.67                       |
| 15                                     | 0.22                             | 0.35                       | 1.65                       |
| 16                                     | 0.21                             | 0.36                       | 1.64                       |
| 17                                     | 0.20                             | 0.38                       | 1.62                       |
| 18                                     | 0.19                             | 0.39                       | 1.61                       |
| 19                                     | 0.19                             | 0.40                       | 1.60                       |
| 20                                     | 0.18                             | 0.41                       | 1.59                       |

Resultan los dos límites equidistantes de la media, uno por arriba y otro por abajo, y a una distancia de 181.3 de dicha media.

Estos límites están obtenidos supuesto que sea cual sea la distribución del universo original, todas las demás distribuciones que se manejan son normales (lo cual es sólo aproximadamente cierto, como se mencionó, a no ser que la distribución original del universo sea también normal). Además se han considerado en todas las distribuciones normales de niveles de aceptación de  $\bar{X} \pm 3\sigma$ , lo que corresponde a 99.7% del área bajo la curva de Gauss (Fig. 3).

A-1.1.b Con base en el promedio de desviaciones estándar.

Con esta técnica, se proponen las siguientes fórmulas.

$$LS = \bar{x} + A_1 \bar{\sigma}$$

$$LI = \bar{x} - A_1 \bar{\sigma}$$

Donde todas las letras tienen los sentidos ya señalados,  $\bar{x}$  es el promedio de las desviaciones estándar de las muestras que se manejan y  $A_1$  es un factor que puede obtenerse de la Tabla 7 para diferentes tamaños de la muestra ( $n$ ).

En el caso del ejemplo que se viene manejando (Tabla 5),  $n = 5$  y  $A_1 = 1.6$ . El promedio de las  $\bar{\sigma}$  resulta ser 111.48, por lo que:

$$LS = 1855.9$$

Los límites resultan en el cálculo arriba y abajo de la media ( $\bar{x}$ ) y a una distancia 178.4 de ella.

A-1.1-c Con base en la media ( $\bar{x}'$ ) y la desviación estándar ( $\sigma'$ ) del universo original.

Las fórmulas en este caso son:

$$LS = \bar{x}' + A \sigma'$$

$$LI = \bar{x}' - A \sigma'$$

La aplicación de las fórmulas anteriores exige la estimación de  $\bar{x}'$  y de  $\sigma'$ , pero ya se vio que si la muestra es suficientemente grande:

$$\bar{x} = \bar{x}'$$

$$\bar{\sigma} = \sigma' / \sqrt{n}$$

En la práctica frecuentemente  $n$  es pequeña, por lo que conviene afinar -- algo los cálculos anteriores. Resulta suficiente considerar  $\bar{x} = \bar{x}'$  y:

$$\sigma' = \frac{\sigma}{c_2}$$

T A B L A 7

Factores para determinar los límites de control para gráficas de  $\bar{x}$  y  $\sigma$  a partir de  $\bar{\bar{x}}$

| Número de Observaciones en el subgrupo<br>n | Factor para la gráfica $\bar{x}$<br>$A_1$ | Factor para la gráfica              |                                     |
|---|---|-------------------------------------|-------------------------------------|
|   |   | Límite inferior de control<br>$B_3$ | Límite superior de control<br>$B_4$ |
| 2   | 3.76                                      | 0                                   | 3.27                                |
| 3   | 2.39                                      | 0                                   | 2.57                                |
| 4   | 1.88                                      | 0                                   | 2.27                                |
| 5   | 1.60                                      | 0                                   | 2.09                                |
| 6   | 1.41                                      | 0.03                                | 1.97                                |
| 7   | 1.28                                      | 0.12                                | 1.88                                |
| 8   | 1.17                                      | 0.19                                | 1.81                                |
| 9   | 1.09                                      | 0.24                                | 1.76                                |
| 10  | 1.03                                      | 0.28                                | 1.72                                |
| 11  | 0.97                                      | 0.32                                | 1.68                                |
| 12  | 0.93                                      | 0.35                                | 1.65                                |
| 13  | 0.88                                      | 0.38                                | 1.62                                |
| 14  | 0.85                                      | 0.41                                | 1.59                                |
| 15  | 0.82                                      | 0.43                                | 1.57                                |
| 16  | 0.79                                      | 0.45                                | 1.55                                |
| 17  | 0.76                                      | 0.47                                | 1.53                                |
| 18  | 0.74                                      | 0.48                                | 1.52                                |
| 19  | 0.72                                      | 0.50                                | 1.50                                |
| 20  | 0.70                                      | 0.51                                | 1.49                                |
| 21  | 0.68                                      | 0.52                                | 1.48                                |
| 22  | 0.66                                      | 0.53                                | 1.47                                |
| 23  | 0.65                                      | 0.54                                | 1.46                                |
| 24  | 0.63                                      | 0.55                                | 1.45                                |
| 25  | 0.62                                      | 0.56                                | 1.44                                |
| 30  | 0.56                                      | 0.60                                | 1.40                                |
| 35  | 0.52                                      | 0.63                                | 1.37                                |
| 40  | 0.48                                      | 0.66                                | 1.34                                |
| 45  | 0.45                                      | 0.68                                | 1.32                                |
| 50  | 0.43                                      | 0.70                                | 1.30                                |
| 55  | 0.41                                      | 0.71                                | 1.29                                |
| 60  | 0.39                                      | 0.72                                | 1.28                                |
| 65  | 0.38                                      | 0.73                                | 1.27                                |
| 70  | 0.36                                      | 0.74                                | 1.26                                |
| 75  | 0.35                                      | 0.75                                | 1.25                                |
| 80  | 0.34                                      | 0.76                                | 1.24                                |
| 85  | 0.33                                      | 0.77                                | 1.23                                |
| 90  | 0.32                                      | 0.77                                | 1.23                                |
| 95  | 0.31                                      | 0.78                                | 1.22                                |
| 100   | 0.30                                      | 0.79                                | 1.21                                |

T A B L A 8  
Factores para estimar  $\Delta'$  a partir  
de  $\bar{R}$  o  $\bar{c}_2$

| Número de observaciones<br>en el subgrupo. | Factor para estimar<br>a partir de $\bar{R}$ | Factor para estimar<br>a partir de $\bar{c}_2$ |
|--|--|--|
| $n$  | $d_2 = R/$                                   | $c_2 = /$                                      |
| 2  | 1.128  | 0.5642   |
| 3  | 1.693  | 0.7236   |
| 4  | 2.059  | 0.7979   |
| 5  | 2.326  | 0.8407   |
| 6  | 2.534  | 0.8686   |
| 7  | 2.704  | 0.8882   |
| 8  | 2.847  | 0.9027   |
| 9  | 2.970  | 0.9139   |
| 10   | 3.078  | 0.9227   |
| 11   | 3.173  | 0.9300   |
| 12   | 3.258  | 0.9359   |
| 13   | 3.336  | 0.9410   |
| 14   | 3.407  | 0.9453   |
| 15   | 3.472  | 0.9490   |
| 16   | 3.532  | 0.9523   |
| 17   | 3.588  | 0.9551   |
| 18   | 3.640  | 0.9576   |
| 19   | 3.689  | 0.9599   |
| 20   | 3.735  | 0.9619   |
| 21   | 3.778  | 0.9638   |
| 22   | 3.819  | 0.9655   |
| 23   | 3.858  | 0.9670   |
| 24   | 3.895  | 0.9684   |
| 25   | 3.931  | 0.9696   |
| 30   | 4.086  | 0.9748   |
| 35   | 4.213  | 0.9786   |
| 40   | 4.322  | 0.9811   |
| 45   | 4.415  | 0.9832   |
| 50   | 4.498  | 0.9849   |
| 55   | 4.572  | 0.9863   |
| 60   | 4.639  | 0.9874   |
| 65   | 4.699  | 0.9884   |
| 70   | 4.755  | 0.9892   |
| 75   | 4.806  | 0.9900   |
| 80   | 4.854  | 0.9906   |
| 85   | 4.898  | 0.9912   |
| 90   | 4.939  | 0.9916   |
| 95   | 4.978  | 0.9921   |
| 100  | 5.015  | 0.9925   |

$$C' = \frac{\bar{R}}{d_2}$$

El coeficiente  $c_2$  permite valorar  $C'$  en función de  $\bar{C}$ , que es un dato más fácil de obtener que  $\bar{C}'$ .

Los factores  $c_2$  y  $d_2$  pueden obtenerse de la Tabla 8.

El coeficiente  $A$  de las fórmulas del párrafo A-1.1-c puede obtenerse de la Tabla 9. Se deja al lector la aplicación de las mismas fórmulas al ejemplo que se ha venido considerando.

La utilización de las fórmulas anteriores conduce a resultados similares y su uso es cuestión de preferencia o de comodidad.

#### A-1.2 Gráficas de control de amplitud (R).

En este caso los límites de control, quedan dados por las expresiones:

$$LS = D_4 \bar{R}$$

$$LI = D_3 \bar{R}$$

Los valores de los factores  $D_3$  y  $D_4$  pueden obtenerse de la Tabla 6.

En el caso del ejemplo contenido en la Tabla 5, se recordará que:

$$\bar{R} = 312.5$$

En la Tabla 6 se ve que para  $n = 5$  resulta  $D_3 = 0$  y  $D_4 = 2.11$ , por lo que aplicando las fórmulas del párrafo A-1.2 se llega a los límites:

$$LS = 659.30$$

$$LI = 0$$

Estos límites son los que se han dibujado en la parte b de la Fig. 12. Las amplitudes que quedan dentro de los límites de control arriba obtenidos y marcados en dicha figura corresponden a variaciones inevitables, inherentes al proceso que se esté efectuando; si tales variaciones exceden los límites de tolerancia impuestos al proceso o éstos no son realistas, deben ser cambiados o el proceso en sí debe ajustarse o substituirse por otro que esté en po-

sibilidad de producir las desviaciones deseadas. Las desviaciones que se salgan de los límites de control obtenidos no son inevitables y el ingeniero debe de emprender la tarea de intentar mejorar la aplicación de su proceso, para disminuir hasta los límites señalados por la gráfica de control.

Se da otra alternativa de cálculo de los límites de control en la gráfica de amplitudes, en función de la media y la desviación estándar del universo original ( $\bar{x}$ ,  $\sigma$ ); para ello deberán usarse las fórmulas:

$$LS = D_2 \bar{x}$$

$$LI = D_1 \bar{x}$$

En donde  $\bar{x}$  se obtiene como ya se indicó y  $D_1$  y  $D_2$  pueden obtenerse de la Tabla 9.

#### A-1.3 Gráficas de control de desviación estándar

En este caso, los límites de control, quedan dados por las expresiones:

$$LS = B_4 \bar{\sigma}$$

$$LI = B_3 \bar{\sigma}$$

Donde  $\bar{\sigma}$  se obtiene como ya se ha indicado, a partir de los datos de la Tabla 5 ( $\bar{\sigma} = \sqrt{\sum \sigma^2/n}$ ) y los factores  $B_3$  y  $B_4$  salen de la Tabla 7.

En la Fig. 12 no se ha dibujado la gráfica de control para las desviaciones estándar de los datos de la Tabla 5; el lector podrá realizar esta tarea. Los límites de control a obtener son, considerando que,  $\bar{\sigma} = 111.48$  en este caso:

$$LS = 2.09 \times 111.48 = 232.99$$

$$LI = 0$$

También se proporcionan fórmulas para el cálculo de estos límites de control en términos de los valores  $\bar{x}$  y  $\sigma$ , que son:

$$LS' = B_1 \bar{x}$$

$$LI' = B_2 \bar{x}$$

T A B L A 9

Factores para determinar límites de control de 3  
para gráficas  $\bar{x}$ , R y  $\sigma$  a partir de  $\sigma'$

| Número de<br>observaciones<br>en el subgrupo<br>n | factor<br>para la<br>gráfica $\bar{x}$<br>A | Factores para la gráfica R                |   | Factores para la gráfica $\sigma$         |   |
|---|---|---|---|---|---|
|   |   | Límite<br>inferior<br>de control<br>$D_1$ | Límite<br>superior<br>de control<br>$D_2$ | Límite<br>inferior<br>de control<br>$B_1$ | Límite<br>superior<br>de control<br>$B_2$ |
| 2   | 2.12  | 0   | 3.69                                      | 0   | 1.84                                      |
| 3   | 1.73  | 0   | 4.36                                      | 0   | 1.86                                      |
| 4   | 1.50  | 0   | 4.70                                      | 0   | 1.81                                      |
| 5   | 1.34  | 0   | 4.92                                      | 0   | 1.76                                      |
| 6   | 1.22  | 0   | 5.08                                      | 0.03                                      | 1.71                                      |
| 7   | 1.13  | 0.20                                      | 5.20                                      | 0.10                                      | 1.67                                      |
| 8   | 1.06  | 0.30                                      | 5.31                                      | 0.17                                      | 1.64                                      |
| 9   | 1.00  | 0.55                                      | 5.39                                      | 0.22                                      | 1.61                                      |
| 10  | 0.95  | 0.69                                      | 5.47                                      | 0.26                                      | 1.58                                      |
| 11  | 0.90  | 0.81                                      | 5.53                                      | 0.30                                      | 1.56                                      |
| 12  | 0.87  | 0.92                                      | 5.59                                      | 0.33                                      | 1.54                                      |
| 13  | 0.83  | 1.03                                      | 5.65                                      | 0.36                                      | 1.52                                      |
| 14  | 0.80  | 1.12                                      | 5.69                                      | 0.38                                      | 1.51                                      |
| 15  | 0.77  | 1.21                                      | 5.69                                      | 0.38                                      | 1.51                                      |
| 16  | 0.75  | 1.28                                      | 5.78                                      | 0.43                                      | 1.48                                      |
| 17  | 0.73  | 1.36                                      | 5.82                                      | 0.44                                      | 1.47                                      |
| 18  | 0.71  | 1.43                                      | 5.85                                      | 0.46                                      | 1.45                                      |
| 19  | 0.69  | 1.49                                      | 5.89                                      | 0.48                                      | 1.44                                      |
| 20  | 0.67  | 1.55                                      | 5.92                                      | 0.49                                      | 1.43                                      |
| 21  | 0.65  |   |   | 0.50                                      | 1.42                                      |
| 22  | 0.64  |   |   | 0.52                                      | 1.41                                      |
| 23  | 0.63  |   |   | 0.53                                      | 1.41                                      |
| 24  | 0.61  |   |   | 0.54                                      | 1.40                                      |
| 25  | 0.60  |   |   | 0.55                                      | 1.39                                      |
| 30  | 0.55  |   |   | 0.59                                      | 1.36                                      |
| 35  | 0.51  |   |   | 0.62                                      | 1.33                                      |
| 40  | 0.47  |   |   | 0.65                                      | 1.31                                      |
| 45  | 0.45  |   |   | 0.67                                      | 1.30                                      |
| 50  | 0.42  |   |   | 0.68                                      | 1.28                                      |
| 55  | 0.40  |   |   | 0.70                                      | 1.27                                      |
| 60  | 0.39  |   |   | 0.71                                      | 1.26                                      |
| 65  | 0.37  |   |   | 0.72                                      | 1.25                                      |
| 70  | 0.36  |   |   | 0.74                                      | 1.24                                      |
| 75  | 0.35  |   |   | 0.75                                      | 1.23                                      |
| 80  | 0.34  |   |   | 0.75                                      | 1.23                                      |
| 85  | 0.33  |   |   | 0.76                                      | 1.22                                      |
| 90  | 0.32  |   |   | 0.77                                      | 1.22                                      |
| 95  | 0.31  |   |   | 0.77                                      | 1.21                                      |
| 100   | 0.30  |   |   | 0.78                                      | 1.20                                      |

Los coeficientes  $B_1$  y  $B_2$  se obtienen de la Tabla 9.

Las fórmulas anteriores para los límites de control en las diferentes gráficas, no se han deducido detalladamente, por considerar que éste no es el lugar apropiado para ello; pueden consultarse en muchos tratados de estadística matemática que incluyan aplicaciones de control de calidad. Por otra parte, la deducción en cuestión resultaría muy sencilla con base en los conceptos -- que se le ha presentado en el párrafo 2 de este trabajo. Haciéndola se vería -- que los factores que se han manejado y que se obtienen de tablas no son sino la interrelación entre parámetros estadísticos ya mencionados, simple de plantear y comprender.

#### A-2 Comentarios en torno al uso de las gráficas de control.

Cuando se maneja un cierto proceso constructivo o se investiga la dispersión, con que un laboratorio o un conjunto de ellos realizan una cierta prueba, siempre es posible y fácil en la práctica llegar a plantear una tabla de valores como la 5. Igualmente fácil será calcular los promedios, las desviaciones estándar y las amplitudes de dichos valores. Como requisito previo, -- estos últimos deberán proceder de una operación de muestreo adecuado, bien -- sea con base en el uso de curvas características de operación o bien con base en plan aleatorio.

Una vez obtenida una tabla como la 5, resultará igualmente práctico y sencillo dibujar las gráficas de control de las medias, de las amplitudes y de -- las desviaciones estándar de los datos, así como calcular los límites de control de dichas gráficas. De esta manera, el ingeniero estará en una posibilidad definitivamente práctica de saber si los valores que está manejando tienen variaciones o dispersiones razonables (o inevitables) o sí, por el contrario, se le presentan algunas susceptibles de ser eliminadas.

La comparación de las tolerancias que el ingeniero considere deseables -- en su trabajo y los límites de control orientará su criterio acerca de lo realistas que sean dichas tolerancias o de lo apropiados que sean sus métodos de trabajo, en el sentido de que si las tolerancias resultan más estrechas que -- los límites de control, el recurso será ejecutar la tarea con un método de mayor precisión, a no ser que como probablemente sucedería en muchos casos de -- la tecnología usual de las vías terrestres, el ingeniero llegara a comprender que sin perjuicio para la obra, sus tolerancias, probablemente fijadas al arbitrio o a la experiencia, pudieran ampliarse hasta los límites de control del proceso.

También debe notarse que la tecnología que se ha dado para el cálculo de -- los límites de control incluye un nivel de aceptación  $\bar{x} \pm 3\sigma$ , lo que representa un criterio muy rígido. En un control de calidad debidamente planeado, no debe ejercerse la misma exigencia en todos los tipos de vías terrestres o en todas las operaciones involucradas en la construcción de una de ellas. -- Resultaría muy simple para cualquier conocedor de estadística elemental transformar todas las fórmulas anteriores a un nivel de aceptación menos exigente, por ejemplo,  $\bar{x} \pm 2\sigma$  (95%) o aún  $\bar{x} \pm \sigma$  (68%). La selección de un criterio

particular está ligada no sólo a la importancia de la obra, sino también al riesgo de falla al costo de la operación que se estudie y a consideraciones de otra índole; por ejemplo, si en una carretera modesta se ha sido muy poco exigente en el uso de materiales, para evitar acarreos, seguramente habrá que ser mucho más exigentes en problemas relativos al drenaje. El balance de todos estos criterios define un buen control de calidad a base de gráficas de control y, en última instancia, un buen trabajo de equipo humano.

Podría decirse que un uso rutinario de las gráficas de control en cualquier proceso ingenieril indicaría en todo momento al ingeniero si su proceso se mantiene "bajo control"; esto ocurriría en tanto los valores auscultados se mantuvieran dentro de los límites de control. Una salida fuera de dichos límites indicaría un proceso que "se ha salido de control", señalando el momento en que el ingeniero ha de actuar sobre el proceso en estudio, para ajustarlo, mejorarlo o cambiarlo.

Las gráficas de control dicen pues cuando conviene revisar el proceso, pero no dicen donde. Aclaran que algo anda mal, pero no dicen que, aun cuando sea cierto que los ingenieros muy familiarizados con su uso lleguen a desarrollar una cierta sensibilidad para detectar las causas de los problemas que provocan las salidas de control.

Por otra parte, la estricta función del control de calidad quizá, no tenga que ir mucho más lejos de lo que las cartas de control van; señalada una falta en la calidad que se está obteniendo, corresponderá a los diferentes miembros del equipo de trabajo investigar el origen de la deficiencia y establecer las medidas para corregirlo.

## B) Métodos basados en estimación estadística.

### B-1) Métodos para la estimación de la media de una población.

Un procedimiento racional de afrontar los problemas de control de calidad, que podría conducir a resultados útiles sería el siguiente:

Se tiene una población original, constituida por los diferentes valores del concepto que se desea controlar. Esta población tendrá una media ( $\bar{x}$ ) y una desviación estándar  $\sigma$ . En la práctica pueden presentarse dos casos, que conviene distinguir: en el primero, se conoce el valor de  $\bar{x}$  y en el segundo, no. Por un procedimiento de los ya analizados, por ejemplo el aleatorio, se extrae una muestra de la población original. La media y la desviación estándar de la muestra ( $\bar{x}$  y  $\sigma$ ) pueden fácilmente calcularse con los métodos visto repetidamente en este trabajo.

La estimación inicial consistiría en establecer el intervalo de confianza para la media de la población, una vez fijado el nivel de confianza en que se desea trabajar. El enunciado anterior amerita una explicación que lo haga más inteligible. Ya se vio en el párrafo 2 de este trabajo, lo que representa el nivel de confianza en una estimación estadística; también se dijo que su valor (que define al factor  $t$ ) se fija a criterio de quien ejerza el control. Obviamente, cuanto más alta sea  $t$  se tendrá una mayor probabilidad de

que la media de la población quede en cualquier intervalo prefijado, por lo que podría decirse que a menores valores de  $t$  se tienen controles más estrictos; cabe comentar que cuando  $t$  disminuye, también lo hace el error inherente a la operación estadística. El intervalo de confianza es la abertura en torno al valor "exacto" de la media de la población, en la que se tolera su fluctuación.

Así, la estimación inicial estadística a la que se está haciendo referencia se enunciaría en un caso concreto con una expresión tal como la que sigue: ¿Cuál es la probabilidad de que la media de la población se encuentre siempre entre los límites dados, escogidos simétricamente respecto a la media, bajo la curva de distribución de frecuencia? O bien, ¿Cuánto valen los límites de variación, simétricos respecto a la media, para que ésta se encuentre entre ellos con una probabilidad prefijada? Debe notarse que ambas preguntas son, en el fondo, equivalentes.

En lo que sigue se analizarán los métodos para responder las dos preguntas, o sea, para realizar lo que se ha llamado la estimación estadística inicial de la media de la población, distinguiendo el caso en que la desviación estándar de la población original es conocida, del que no lo es.

#### B-1.1 La desviación estándar de la población original es conocida.

En los problemas conectados con las vías terrestres seguramente este caso puede ser relativamente común, pues el valor de  $\sigma$  frecuentemente podrá estimarse de un modo suficientemente seguro, aún cuando no se conozca con exactitud.

Ya se vio que si se tiene un conjunto de muestras representativas de la población (tal como puede ser el caso de la Tabla 5) puede decirse que la media de las medias de cada muestra es igual a  $\bar{x}$ .

$$\bar{\bar{x}} = 1677.5 = \bar{x}$$

Se vio también que:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Donde  $n$  es el número de elementos en cada muestra y  $\sigma_{\bar{x}}$  es la desviación estándar de las medias de las muestras, que en el caso de la Tabla 5 resulta ser:

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum (\bar{x} - \bar{x})^2}{n}} = 115.15$$

Hátese que la  $n$  se refiere al número de renglones de la Tabla 5, o sea al número de muestras que se están manejando, en tanto que  $N$  es el número de elementos en cada una de esas muestras; en el caso de la Tabla 5,  $N = 5$ . Esta distinción debe tenerse siempre en mente para no caer en confusión en párrafos anteriores y subsiguientes.

En estas condiciones se permite demostrar que el intervalo de confianza para la media de la población original puede expresarse como:

$$\bar{x} \pm t \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Donde,  $\bar{x}$  es la media de cada muestra (renglones de la Tabla 5);  $t$  es el factor que define el nivel de confianza que se desea adoptar;  $\sigma$  es la desviación estándar de la población original, que se supone conocida y  $N$  es el número de elementos de cada muestra manejada.

Teniendo en cuenta la expresión anterior, se deduce que el intervalo de confianza para la media de la población original también puede expresarse como:

$$\bar{x} \pm t \sigma_{\bar{x}} = 150$$

El valor de  $t$ , como ya se dijo puede tabularse de una vez por todas, bajo el supuesto de que la distribución de  $\bar{x}$  es normal; la Tabla 10 es una de este estilo.

T A B L A 10

Valores de  $t$  para distintos niveles de confianza.

| Nivel de confianza (%) | $t$  |
|------------------------|------|
| 99.7                   | 3.00 |
| 99.0                   | 2.58 |
| 98.0                   | 2.33 |
| 96.0                   | 2.05 |
| 95.5                   | 2.00 |
| 95.0                   | 1.96 |
| 90.0                   | 1.64 |
| 80.0                   | 1.28 |
| 68.2                   | 1.00 |
| 50.0                   | 0.67 |

Como ejemplo pueden calcularse los límites en que debe esperarse que se mantenga la media de la población a partir de los datos obtenidos de la muestra No. 5 de la Tabla 5 (5o. renglón); se desea un nivel de confianza de 95%. El intervalo de confianza sería, utilizando la expresión anterior:

$$1750 \pm 1.96 \times 115.15 = \\ 1750 \pm 225.96$$

Lo anterior quiere decir que, a partir de los datos de la muestra No. 5 de la Tabla 5, puede afirmarse que existe un 95% de probabilidades de que la media de la población original esté comprendida en el intervalo anterior. La fluctuación en ese intervalo es inherente a las cualidades aleatorias del proceso.

Otra utilización que podría hacerse de las ideas anteriores sería, como ya se vio, plantearse el siguiente problema:

A partir de los datos de la muestra No. 5 de la Tabla 5, estimase la probabilidad de que la media de la población esté comprendida en el intervalo:

$$1750 \pm 150 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

Para resolver este problema se procederá como sigue:

De la expresión anterior se deduce que:

$$t \frac{\sigma}{\bar{x}} = 150$$

De donde, siendo  $\frac{\sigma}{\bar{x}}$  igual a 115.15, como ya se calculó:

$$t = \frac{150}{115.15} = 1.3$$

Los valores de  $t$  correspondientes a todos los niveles de confianza figuran en la Tabla 11. En realidad esta tabla comprende a la 10 y es más completa que ella, ya que más allá de los valores más usuales en los cálculos prácticos. Se refiere a las áreas que ocurren bajo la curva de distribución normal entre el valor de la media y cualquier  $t$ ; el duplo de este valor dará, según ha quedado establecido (discusión en torno a la figura 3) la probabilidad de que un elemento de la distribución quede comprendido en el intervalo  $\bar{x} \pm t$ .

En la Tabla 11 se ve que para  $t = 1.3$ , la probabilidad resulta de 80.64%, menor que el 95% del ejemplo anterior por ser menor el intervalo de fluctuación que ahora se seleccionó.

La Fig. 13 muestra los intervalos de fluctuación de la media de la población original en los dos ejemplos anteriores.

Cuando la desviación estándar de la población original  $\sigma$  no es conocida puede entonces estimarse con bastante seguridad a partir de la desviación estándar de la distribución de las medias de las muestras ( $\sigma_{\bar{x}}$ ) la cual si podrá conocerse, de manera que la mayor parte de los problemas de estimación de orden práctico caen dentro de la categoría de aquellos en que se dispone de  $\sigma$ . No es, sin embargo, imposible encontrar algún problema práctico en que no se conozca el multicitado valor  $\sigma$ , debiéndose manejar entonces el problema como se ilustra en el siguiente párrafo.

### B-1.2 La desviación estándar de la población original es desconocida.

En algunos problemas prácticos la desviación estándar de la población original no se conoce y la mejor aproximación que puede tenerse para su valor es  $s$ , la desviación estándar de la muestra. En este caso, el procedimiento para establecer el intervalo de confianza para la media de la población original, una vez fijado el nivel de confianza en que se desea trabajar, es similar al del caso anterior, pero la distribución de las muestras ya no es normal, sino del tipo denominado de Student en las ciencias estadísticas, por lo que el problema ha de resolverse manejando una tabla de tal distribución. La fórmula que proporciona el intervalo de confianza es:

$$\bar{x} \pm t \frac{s}{\sqrt{N}}$$

Donde,  $\bar{x}$  es la media de la muestra,  $N$  el tamaño de dicha muestra y  $t$  el factor correspondiente al nivel de confianza adoptado, calculado para  $N - 1$ , tal como de muestra en los tratados de estadística que se han señalado previamente como referencia. Finalmente,  $s$  es la desviación estándar de la muestra.

Intuitivamente se ve que si la estimación de  $\sigma$  está basada en una muestra pequeña se tendrá un resultado menos confiable que si se usa una muestra grande.

La Tabla 12 proporciona la distribución de Student.

Como ejemplo de aplicación imagínese una muestra tomada de entre las infinitas resistencias a la compresión simple, que podrían ser determinadas para un cierto suelo en un laboratorio. Los valores se dan en Ton/m<sup>2</sup>.



T A B L A 12

Valores de t en la distribución de Student.

| n-1 | t<br>.995 | t<br>.99 | t<br>.975 | t<br>.95 | t<br>.90 | t<br>.80 | t<br>.75 | t<br>.70 | t<br>.60 | t<br>.55 |
|-----|-----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1   | 63.66     | 31.82    | 12.71     | 6.31     | 3.07     | 1.376    | 1.000    | .727     | .325     | 1.58     |
| 2   | 9.92      | 6.96     | 4.30      | 2.92     | 1.89     | 1.051    | .816     | .617     | .289     | .142     |
| 3   | 5.84      | 4.54     | 3.18      | 2.35     | 1.64     | .978     | .765     | .584     | .275     | .132     |
| 4   | 4.60      | 3.75     | 2.78      | 2.13     | 1.53     | .941     | .741     | .569     | .271     | .131     |
| 5   | 4.04      | 3.36     | 2.58      | 2.02     | 1.48     | .920     | .727     | .560     | .267     | .132     |
| 6   | 3.71      | 3.14     | 2.45      | 1.94     | 1.44     | .906     | .718     | .553     | .265     | .131     |
| 7   | 3.50      | 3.00     | 2.36      | 1.91     | 1.43     | .896     | .711     | .549     | .263     | .130     |
| 8   | 3.36      | 2.90     | 2.31      | 1.86     | 1.40     | .889     | .706     | .546     | .262     | .130     |
| 9   | 3.25      | 2.82     | 2.26      | 1.83     | 1.38     | .883     | .703     | .543     | .261     | .129     |
| 10  | 3.17      | 2.76     | 2.23      | 1.81     | 1.37     | .879     | .700     | .542     | .260     | .129     |
| 11  | 3.11      | 2.72     | 2.20      | 1.80     | 1.36     | .876     | .697     | .540     | .260     | .129     |
| 12  | 3.06      | 2.68     | 2.18      | 1.78     | 1.35     | .873     | .695     | .539     | .259     | .128     |
| 13  | 3.01      | 2.65     | 2.16      | 1.77     | 1.35     | .871     | .694     | .538     | .259     | .128     |
| 14  | 2.98      | 2.62     | 2.14      | 1.76     | 1.34     | .868     | .693     | .537     | .258     | .128     |
| 15  | 2.95      | 2.61     | 2.13      | 1.75     | 1.34     | .866     | .691     | .536     | .258     | .128     |
| 16  | 2.92      | 2.58     | 2.12      | 1.75     | 1.34     | .865     | .690     | .535     | .258     | .128     |
| 17  | 2.90      | 2.57     | 2.11      | 1.74     | 1.33     | .863     | .689     | .534     | .257     | .128     |
| 18  | 2.88      | 2.55     | 2.10      | 1.73     | 1.33     | .862     | .688     | .534     | .257     | .128     |
| 19  | 2.87      | 2.54     | 2.09      | 1.73     | 1.33     | .861     | .688     | .533     | .257     | .127     |
| 20  | 2.84      | 2.53     | 2.09      | 1.72     | 1.32     | .860     | .687     | .533     | .257     | .127     |
| 21  | 2.83      | 2.52     | 2.08      | 1.72     | 1.32     | .859     | .686     | .532     | .256     | .127     |
| 22  | 2.82      | 2.51     | 2.07      | 1.72     | 1.32     | .858     | .686     | .532     | .256     | .127     |
| 23  | 2.81      | 2.50     | 2.07      | 1.71     | 1.32     | .858     | .685     | .532     | .256     | .127     |
| 24  | 2.80      | 2.49     | 2.06      | 1.71     | 1.32     | .857     | .685     | .531     | .256     | .127     |
| 25  | 2.79      | 2.48     | 2.06      | 1.71     | 1.32     | .856     | .684     | .531     | .256     | .127     |
| 26  | 2.78      | 2.48     | 2.05      | 1.71     | 1.32     | .856     | .684     | .531     | .256     | .127     |
| 27  | 2.77      | 2.47     | 2.05      | 1.71     | 1.31     | .855     | .683     | .531     | .256     | .127     |
| 28  | 2.76      | 2.47     | 2.05      | 1.70     | 1.31     | .855     | .683     | .530     | .256     | .127     |
| 29  | 2.76      | 2.46     | 2.04      | 1.70     | 1.31     | .854     | .683     | .530     | .256     | .127     |
| 30  | 2.75      | 2.46     | 2.04      | 1.70     | 1.30     | .853     | .683     | .530     | .256     | .127     |
| 40  | 2.70      | 2.43     | 2.02      | 1.68     | 1.30     | .853     | .683     | .530     | .256     | .126     |
| 60  | 2.66      | 2.39     | 2.00      | 1.67     | 1.30     | .848     | .679     | .528     | .254     | .126     |
| ∞   | 2.62      | 2.36     | 1.98      | 1.66     | 1.29     | .845     | .677     | .526     | .254     | .126     |
|     | 2.58      | 2.33     | 1.96      | 1.645    | 1.28     | .842     | .674     | .524     | .253     | .126     |

T A B L A 13  
Valores de  $q_u$  de un suelo, (Ton/m<sup>2</sup>).

|       |       |       |
|-------|-------|-------|
| 15.96 | 12.32 | 17.28 |
| 15.63 | 12.40 | 16.96 |
| 17.60 | 17.64 | 14.56 |

cuya media es  $\bar{x} = 15.53 \text{ Ton/m}^2$  y cuya desviación estándar es  $\sigma = 1.98 \text{ Ton/}$

Se aceptará un nivel de confianza de 95% y se desea saber el intervalo de confianza de la media de la población original, para dicho nivel de confianza. Dicho intervalo será:

$$\bar{x} \pm t \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

substituyendo:

$$15.53 \pm 2.31 \frac{1.98}{\sqrt{9}} = 15.53 \pm 1.53$$

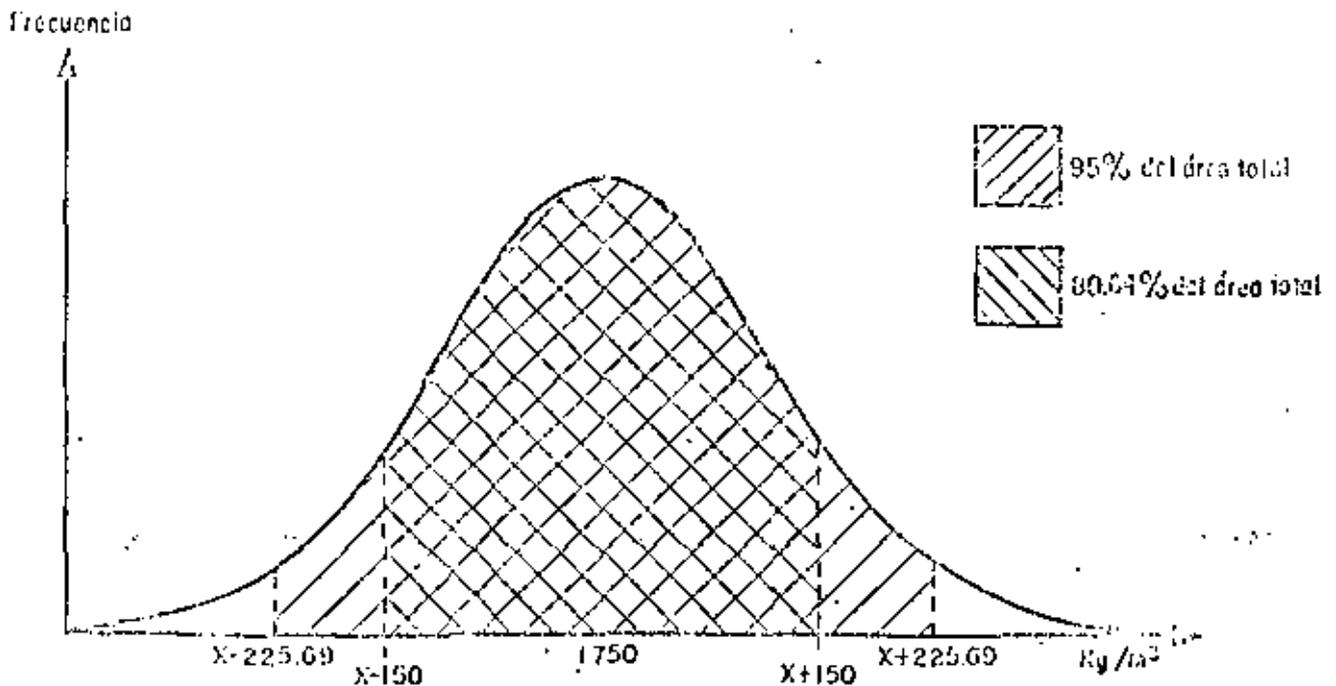


Figura 12. Representación gráfica de intervalos de confianza para la media de una población.

O lo que es lo mismo, hay en la población sujeta a muestreo, un 95% de probabilidades de que la media esté en el intervalo  $\pm 1.53$  en torno a la media de la muestra.

El valor 2.31 en los cálculos anteriores se obtuvo de la tabla 12 en el renglón 8 (correspondiente a  $N - 1$ , en este caso, por ser  $N = 9$  y bajo la columna  $t_{0.975}$ ; la razón es que para  $t_{0.975}$  quedaría a la derecha una cola bajo la distribución de Student es simétrica, quedará otra cola del lado izquierdo, también de 0.025, con un total fuera del intervalo  $\pm t_{0.975}$  de 0.05, de manera que el factor  $t_{0.975}$  corresponde un área bajo la curva de 95%, como se desea. Es fácil ver que el valor de  $t$  con el que se sitúa la columna de la Tabla 12 que debe leerse, queda dado por la expresión:

$$\frac{100 + \text{nivel de confianza}}{2}$$

Otro cálculo que podría hacerse es el siguiente. Para la misma muestra utilizada ¿qué probabilidad hay de que la media de la población original que se comprenda en el intervalo:

$$15.53 \pm 0.92?$$

Ahora habría que plantear el intervalo de confianza como sigue:

$$15.53 \pm t \frac{1.98}{3}$$

Se tiene:

$$t \frac{1.98}{3} = 0.92$$

De donde:

$$t = \frac{3 \times 0.92}{1.98} = 1.39$$

En la Tabla 12 se ve que, para  $N - 1 = 8$ , que es el caso, resulta  $t_{90} = 1.40$ , suficientemente próximo a 1.39.  $t_{90}$  deja una cola de 10% de cada lado bajo la curva, o sea que corresponde a un nivel de confianza de 80%, que es la respuesta a la pregunta realizada.

## B. 2 Pruebas de hipótesis para la media de una población.

B. 2.1 Pruebas de hipótesis para el caso en que la desviación estándar de la población original ( $\sigma$ ) es conocida.

Como se vio, cuando se tiene un número de muestras grande (como podría -

ser el caso de la Tabla 5) se puede trabajar sobre la hipótesis de que la desviación estándar de la población original ( $\sigma$ ), es conocida, puesto que puede estimarse a partir de  $\sqrt{\frac{s^2}{n}}$ , que siempre podrá valorarse.

En rigor, un resultado análogo se tiene cuando se trabaja con una sola muestra, pero muy grande. Si la muestra tuviera tantos elementos como la población original, obviamente  $\sigma = \sigma'$ ; si la muestra es grande,  $\sigma'$  puede ser una buena aproximación, a  $\sigma$  y puede trabajarse sobre la hipótesis  $\sigma'$  conocida, estimándola a partir de  $\sigma$ . En la práctica suele aceptarse esta segunda posibilidad de conocer  $\sigma'$  con tal de que  $N \gg 30$ .

Para convertir una simple estimación estadística en un programa de control de calidad se hace preciso introducir el concepto de pruebas de hipótesis, también llamadas reglas de decisión.

Lo anterior establece una distinción entre el concepto de estimación estadística y el de existencia de un control con base en tal estimación. Ya se dijo que una estimación estadística permite simplemente establecer cual es la probabilidad de que en un cierto proceso, un cierto concepto (en los anteriores análisis, la media) se encuentre entre unos límites dados. Al dar respuesta a esta pregunta, los métodos estadísticos toman en cuenta automáticamente la naturaleza y variabilidad del proceso en estudio. Cuando un proceso está sujeto a control se va un poco más lejos y no sólo se indican los límites en que inevitablemente varía un cierto concepto, bajo un cierto nivel de confianza, sino que se dice también que significa dicha variación dentro del proceso en estudio, señalándose se la variación que se observe en un momento dado queda dentro del error inherente al proceso (inevitable de acuerdo con las leyes de la estadística) o se sale de él, con una desviación que, de acuerdo con dichas leyes puede evitarse (por lo menos parcialmente) y que debe corregirse, buscando su causa, lo que, en principio, ya no es un problema de control de calidad.

Las reglas de decisión constituyen el ingrediente necesario para convertir una estimación estadística en una regla de control.

Una prueba de hipótesis o regla de decisión es cualquier procedimiento que permita fundar la decisión que se haga con base en estudios estadísticos sobre muestras de un proceso cualquiera. La manera de establecer la validez de una decisión es estudiar dos cursos de acción posibles; el primero denominado hipótesis bajo prueba o hipótesis nula consiste en establecer, por ejemplo, la igualdad de dos conceptos ( $c_1 = c_2$ ); el segundo, denominado hipótesis alterna, consiste necesariamente en una de las siguientes posibilidades:

$$c_1 > c_2$$

$$c_1 < c_2$$

$$c_1 \neq c_2$$

Se dice que se comete un error de juicio del tipo I cuando se rechaza una

hipótesis que debió haber sido aceptada. Cuando se acepta una hipótesis que debió haber sido rechazada, se dice que se comete un error del tipo II.

Al probar una cierta hipótesis existe siempre un cierto riesgo de cometer un error del tipo I. Se denomina nivel de significancia de la prueba que se haga, la máxima probabilidad que se acepta de cometer un error de tipo I. -- Así, si al realizar una prueba de hipótesis se escoge un nivel de significancia de 5%, se está expresando que se aceptan 5 posibilidades en cada 100 de rechazar la hipótesis, deviendo aceptarla. El complemento a 100 del nivel de significancia se denomina nivel de confianza. En el ejemplo anterior se tendría un 95% de confianza de aceptar la hipótesis que debió ser aceptada. En rigor, el concepto de nivel de confianza que se acaba de definir coincide exactamente con el nivel de confianza que se ha venido manejando en páginas anteriores.

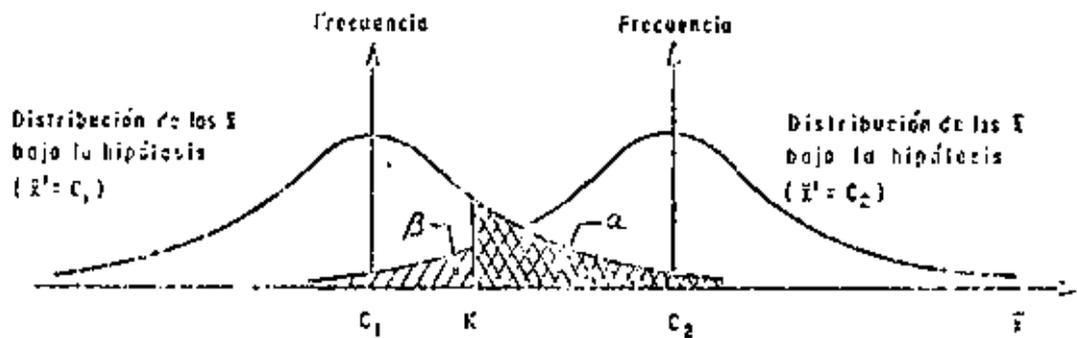


Figura 14. Probabilidad de los errores tipos I y II en pruebas de hipótesis.

Supóngase que se trata ahora de probar la hipótesis de que la media de una población ( $\bar{X}'$ ) es igual al valor  $c_1$ , contra la hipótesis alterna de que dicha media sea igual al valor  $c_2$ , donde  $c_2 > c_1$ ; si se supone que  $\bar{X}$  (la media de las muestras de que se disponga) tiene una distribución normal, la Fig. 13 muestra en forma gráfica la relación entre los errores de juicio tipo I y Tipo II correspondientes al caso. La figura muestra dos curvas de Gauss que se tendrían para el caso en que la distribución de las  $X$  fuera normal y su media ( $\bar{X} = \bar{X}'$ , según ya se vio) fuese  $c_1$  y para el caso análogo, en que valiera  $c_2$ . Obviamente ambas curvas deben de ser iguales, pues representan la misma distribución, por hipótesis; únicamente estarán desplazadas el segmento  $c_2 - c_1$ .

La regla de decisión para aceptar o rechazar la hipótesis bajo prueba propuesta sería la siguiente:

Si la hipótesis  $\bar{x}' = c_1$  es aceptable, la curva de la izquierda de la Fig. 14 representaría la verdadera distribución de las  $\bar{x}$ ; obviamente esa curva se extiende desde el  $-\infty$  a  $+\infty$  del eje de las  $\bar{x}$ , por lo que en principio cualquier  $\bar{x}$  que se obtuviera de una muestra real podría ser abscisa de un punto de dicha curva y no se podría tener ningún criterio discriminativo para saber si la hipótesis bajo prueba se está cumpliendo o no; por así decirlo, cualquier  $\bar{x}$  que se obtuviera de una muestra podría asignarse a cualquier distribución.

Imagínese que se adopta un parámetro  $k$ , sobre el eje de las  $\bar{x}$  (Fig. 14), comprendido entre  $c_1$  y  $c_2$ . Podría establecerse el siguiente criterio como razonable. Si  $\bar{x}$  procedente de una muestra de la población es menor que  $k$  podría considerarse aceptable la hipótesis de que  $c_1$  es la media de la distribución; por el contrario, si la media de la muestra resultara mayor que  $k$ , podría decirse que la hipótesis es rechazable. Al hacer esto se cometería un error -- del tipo I en todos los casos en que  $\bar{x}$  fuese mayor que  $k$ , pues se estaría rechazando la hipótesis de prueba ( $\bar{x}' = c_1$ ), a pesar de que la media de la muestra se sigue moviendo bajo puntos sobre la curva normal de la izquierda. De acuerdo con ideas ya expuestas con anterioridad, el área  $\alpha$  de la Fig. 14 está señalando automáticamente la probabilidad de cometer un error del tipo I si se sigue el criterio de decisión que se ha señalado.

Si  $\bar{x} > k$ , la hipótesis bajo prueba debe rechazarse y, dentro de las reglas de juego de este método, la hipótesis alterna ( $\bar{x}' = c_2$ ) debe aceptarse. En este caso la curva normal de la derecha en la Fig. 14 se tomaría como la que realmente representa la distribución de las  $\bar{x}$ . Este hipótesis alterna se aceptará en tanto  $\bar{x} > k$ , pero si  $\bar{x} < k$  se habrá aceptado una hipótesis que en realidad debió haberse rechazado, o lo que es lo mismo, se habrá cometido un error del tipo II. Luego el área  $\beta$  de la Fig. 14 representa la probabilidad de cometer un error del tipo II cuando se sigue la secuela de decisión arriba descrita.

Puede observarse en la Fig. 14 que al aumentar el valor de  $k$  se reduce el área  $\alpha$  y, como consecuencia disminuye la probabilidad de cometer un error del tipo I, pero se incrementa el área  $\beta$ , aumentando la probabilidad de cometer un error del tipo II. En muchos tratados se establece como principio de toda prueba de hipótesis que se aplique al control de calidad, que entre todas las pruebas que posean la misma probabilidad de cometer un error del tipo I, debe elegirse aquella que tenga más pequeña la probabilidad de cometer un error del tipo II.

A continuación se detallan los pasos con los que se aplicaría en un caso dado una prueba de hipótesis, de acuerdo con la secuela propuesta.

1. Establézcanse la hipótesis bajo prueba y la alterna. El criterio para ello deberá de salir de un manejo razonable de la información previa de que se disponga para el problema de que se trate.

2. Selecciónese el nivel de significancia  $\alpha$  en que se desea trabajar.

3. Seleccionese el tipo de distribución que se considerará para las medias de las muestras ( $\bar{x}$ ) en el problema. Siendo conocida  $\sigma$  como es el caso que ahora se estudia, será razonable pensar que la distribución de las  $\bar{x}$  es normal.

4. Encuéntrase la región crítica, fijando el valor del parámetro  $k$ . Esto ha de hacerse en términos del problema específico que se tenga entre manos.

5. Determinese la región de aceptación y la de rechazo. La región de rechazo es el área  $\alpha$  de la Fig. 14.

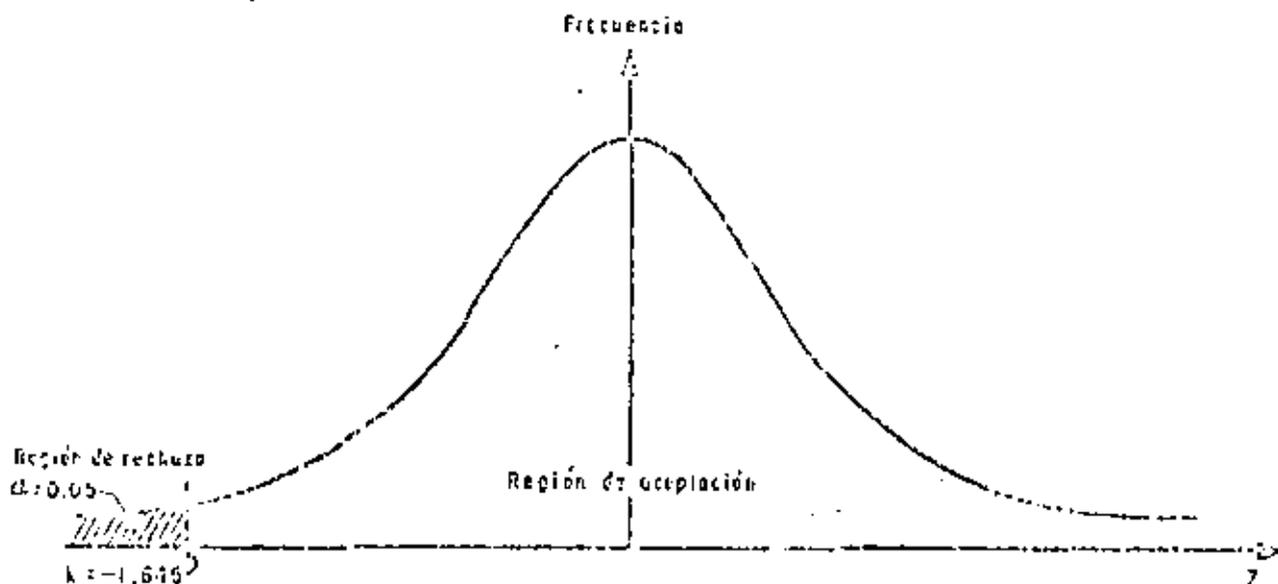


Figura 15. Determinación de la región crítica por medio del valor de  $k$  en una prueba de hipótesis a un extremo.

6. Seleccionese una muestra aleatoria de  $N$  elementos. Determinese el parámetro  $k_0$ , con base en la distribución supuesta en el punto 3, que servirá de base de comparación con el valor de  $k$  previamente elegido, para aceptar o rechazar la hipótesis bajo prueba.

Como ejemplo de ilustración, considérese la muestra constituida por el quinto renglón de la Tabla 5. La media de esa muestra es de 1750 kg/m<sup>3</sup> ( $\bar{x}$ ). Se supondrá conocida la desviación estándar de la población original ( $\sigma$ ), igual a  $\sqrt{10}$ . La hipótesis bajo prueba consistirá en la siguiente aseveración: La media de la población original ( $\mu$ ), vale 1677.5 kg/m<sup>3</sup>.

Como hipótesis alterna se adoptará la siguiente:

La media de la población original ( $\mu$ ) es menor que 1677.5 kg/m<sup>3</sup>.

Se desea trabajar con un nivel de confianza de 95%. Por lo tanto el nivel de significación de la prueba de hipótesis será  $0.05 = \alpha$ .

Los enunciados anteriores cubren los puntos 1 y 2 de la secuela de aplicación que más arriba se ha escrito.

3. Se considerará normal la distribución de la media de la muestra ( $\bar{x}$ ).

4. Para elegir  $k$  se razonará como sigue, con base en la Fig. 15. Puesto que la distribución de  $\bar{x}$  es normal, podrá dibujarse la curva de Gauss correspondiente. El valor de  $\alpha$  es 0.05, lo que quiere decir que el área  $\alpha$  debe incluir al 5% de las posibilidades de  $\bar{x}$ .

En la fórmula anterior se vio un mecanismo de cambio de variable frecuente en cálculos estadísticos y al cual es conveniente recurrir, entre otras cosas por que las tablas de áreas bajo la curva normal disponibles en la literatura suelen estar en términos de la nueva variable  $z$ :

$$z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma}$$

En la fórmula anterior se deseaba el cambio de la variable  $x$ , con media  $\bar{x}$  y desviación estándar  $\sigma$  a  $z$ . Correspondientemente, ahora se cambiará la variable  $\bar{x}$ , con media  $\bar{x}'$  y con desviación estándar  $\sigma/\sqrt{n}$ , tal como se vio, a  $z$ , resultando esta última:

$$z = \frac{\bar{x} - \bar{x}'}{\sigma/\sqrt{n}}$$

Con base en la variable "normalizada" puede verse en la Tabla 11, para el nivel de confianza de 95% (nivel de significación 0.05), cual es el valor de la abscisa  $z$  tal que un área 0.05 de la total quede a la izquierda. Se debe reflexionar como sigue. En este caso, la prueba de hipótesis consiste sólo en juzgar si la media de la población original es igual o menor que 1077.5 kg/m<sup>3</sup>; es decir, interesa analizar sólo un área  $\alpha$  a la izquierda de la curva normal e igual al nivel de significación. La semi-área de la derecha de la curva normal vale 0.5, pero a la izquierda sólo se tendrá un área igual a  $0.5 - 0.05 = 0.45$  del total, siendo  $\alpha$  el 0.05 restante. En la Tabla 11 se ve que para un área 0.45 el valor de  $z = t$  resulta ser -1.645 (el signo negativo se debe a que está a la izquierda de la media), el cual se obtiene interpolando entre las áreas 0.4495 y 0.4505, que si están en la Tabla. Así, en el caso que se analiza, resulta  $z = -1.645$ . Ese es el valor de  $k$  que debe elegirse en el caso.

5. La región de aceptación será toda el área bajo la curva normal a la derecha de  $k$  y la de rechazo será el área bajo la curva normal a la izquierda de  $k$ .

6. El valor de  $k_0$  será el valor particular de  $z$  correspondiente a los datos de la muestra obtenida; es decir, se obtendrá con la aplicación de la fórmula anterior.

$$z = k_0 = \frac{\bar{x} - \bar{x}}{\sigma' / \sqrt{N}} = \frac{1750.0 - 1677.5}{115.15}$$

Debe recordarse (Tabla 5) que:

$$\frac{\sigma'}{\sqrt{N}} = \sigma'_{\bar{x}} = 115.15$$

De lo anterior resulta:

$$z = k_0 = \frac{72.50}{115.15} = 0.63$$

Simplemente al ver que el resultado dio con signo positivo, ya se puede afirmar que  $k_0$  resultó en la región de aceptación de la Fig. 15; es decir, puede afirmarse, con 95% de confianza que la media de la población original correspondiente a la muestra estudiada es igual a 1677.5 kg/m<sup>3</sup>.

La potencia de un cálculo como el anterior en un problema práctico de control de calidad es evidente. Imagínese que se tiene que controlar la compactación de un gran tramo de camino y que en un subtramo del mismo se toman las medidas de control que forman la Tabla 5. Con estos valores podrá conocerse la  $\sigma'_{\bar{x}}$  y con este dato, más el cálculo anterior, podrá estimarse la media de la compactación obtenida en todos los demás subtramos del camino, con base en un muestreo mucho más sencillo, rápido y económico y al nivel de confianza que se desee. Naturalmente que para extender a los demás subtramos el análisis estadístico hecho en uno sólo deberán conservarse las mismas características de materiales, equipo de compactación, etc. Si en estas condiciones, en un subtramo se encontrara que, bajo una prueba de hipótesis con el mismo nivel de confianza, la media de la población se dispersa, saliéndose de la región de aceptación, podrá afirmarse que en ese subtramo el proceso de compactación se fue de control por alguna causa ajena al proceso mismo, que deberá ser investigada por la metodología normal.

El ejemplo anterior se denomina en estadística prueba de un extremo y se tiene cuando la hipótesis alterna expresa únicamente una condición de "mayor que". Pueden, sin embargo, plantearse otras pruebas de hipótesis, tal como podría ser la del ejemplo siguiente, representativo de una prueba de dos extre-

mos:

Como hipótesis bajo prueba se aceptará el siguiente enunciado: la media de la población original (Tabla 5) vale 1677.5 kg/m<sup>3</sup>.

La hipótesis alterna será: la media de la población original es diferente que 1677.5 kg/m<sup>3</sup>.

El nivel de confianza en que se desea trabajar es 95% (nivel de significación,  $\alpha = 0.05$ ). Se considerará como muestra de la población al vigésimo renglón de la Tabla 5, cuya media es 1780 kg/m<sup>3</sup>.

Otra vez, los enunciados anteriores cubren los pasos 1 y 2 de la secuencia de la prueba de hipótesis, por lo que se comenzará a partir del paso 3.

3. Se aceptará una distribución normal para la media de la muestra ( $\bar{x}$ ).

4. El valor de  $k$  resultará de la tabla 11, considerando que ahora el valor de  $z$  se puede apartar de la media por la derecha o por la izquierda. Como la probabilidad de que la media de la población original se vaya a un lado u otro del valor prefijado es la misma, el nivel de significación se dividirá en dos áreas simétricamente situadas respecto a la media de la distribución normal (fig. 16); habría dos áreas de 0.025, una a cada lado. En la Tabla 11 se ve que para un área de la mitad de la curva normal de 0.475 (que es  $0.5 - 0.025$ ) se obtiene  $t = k = \pm 1.96$ .

5. La región de aceptación de la hipótesis será toda el área bajo la curva normal entre las dos áreas rayadas de la Fig. 16 y, correspondientemente, la región de rechazo estará formada por las dos áreas aludidas.

6. El valor de  $k_0$  será:

$$z = k_0 = \frac{\bar{x} - \bar{x}}{\sigma' / \sqrt{n}} = \frac{1780.0 - 1677.5}{115.15} = \frac{102.5}{115.15} = 0.89$$

Como se ve, la hipótesis propuesta debe aceptarse; es decir, con 95% de confianza la hipótesis es aceptable, de modo que de cada 100 veces, el aceptación no conducirá a errores en 95 ocasiones, teniéndose un error del tipo I en 5.

Caben los mismos comentarios de aplicación práctica hechos anteriormente.

#### B - 2.2. Pruebas de hipótesis para el caso en que la desviación estándar de la población original ( $\sigma'$ ) sea desconocida.

En este caso, la media de la población debe ser estimada a partir de la media de la muestra, pero por lo demás, tal como se vio en el apartado B 1.2 de este mismo párrafo, los métodos estadísticos de trabajo son similares al caso anterior. Desde luego, la distribución de las medias de las muestras ya no es normal, sino del tipo Student (tabla 12).

La variable normalizada, equivalente a la  $z$  anterior es:

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{x}_0}{s / \sqrt{n}}$$

Con base en esa variable normalizada  $t$  y usando la Tabla 12 es posible encontrar el valor concreto de  $t$  que corresponda al nivel de significación -- con el que se haga la prueba de hipótesis (este es el valor de  $k$  antes mencionado, que define la región de rechazo). El valor de  $k$  a comparar para efectuar la prueba será dado por la misma fórmula anterior, introduciendo en ella los valores correspondientes a la muestra de que se disponga.

A modo de ejemplo y considerando como muestra los valores de  $q_u$  dados en la Tabla 13 ( $\bar{x} = 15.53 \text{ Ton/m}^2$ ;  $s = 1.98 \text{ Ton/m}^2$ ), se efectuará una prueba de hipótesis con la siguiente hipótesis bajo prueba: "la media de la población original vale 16 Ton/m<sup>2</sup>" y la siguiente hipótesis alterna: "la media de la población original es menor que 16 Ton/m<sup>2</sup>".

Se desea un nivel de significación de 0.05, equivalente a un nivel de confianza de 95%.

En la Tabla 12 se ve que para una prueba de un solo extremo, como es la propuesta y en el renglón  $N - 1 = 8$ , se obtiene  $t_{0.95} = \pm 1.86$ .

El valor de  $k_0$  resultará:

$$t = k_0 = \frac{15.53 - 16.00}{1.98 / \sqrt{9}} = \frac{-3 \times 0.47}{1.98} = -0.71$$

-0.71 es menor que -1.86 (como se trata de una prueba "menor que" se toma el valor de  $k$  a la izquierda de la media, o sea -1.86). De lo anterior se deduce que la hipótesis debe ser aceptada o, lo que es lo mismo, la media de la población original es 16.0 ton/m<sup>2</sup> con 95% de probabilidades de no cometer un error de tipo I.

El anterior es un ejemplo de una prueba de un extremo y también ahora se puede hacer una prueba a dos extremos, tal como podría ser la que sigue.

Hipótesis bajo prueba: la media de la población de la cual los valores de la Tabla 13 son una muestra, vale 25.5 Ton/m<sup>2</sup>.

La hipótesis alterna será que la media de la población es diferente que 25.5 Ton/m<sup>2</sup>.

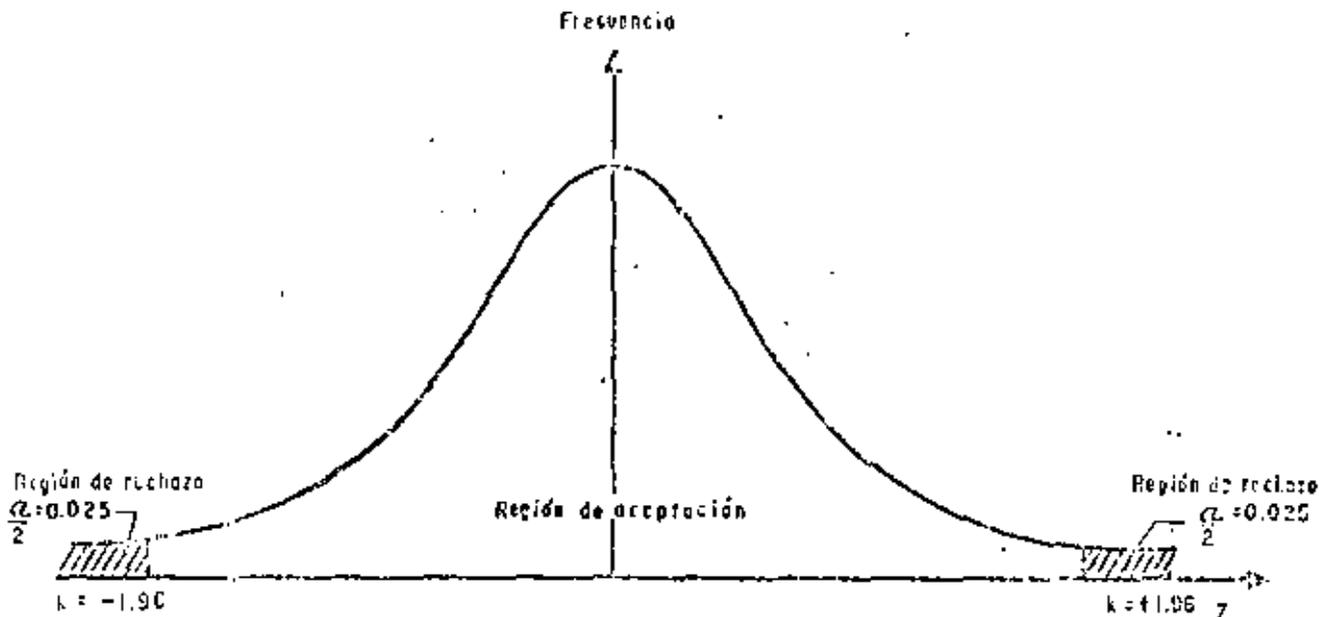


Figura 16. Determinación de la región crítica por medio de una prueba de hipótesis a dos extremos.

Se desea trabajar con un nivel de significación de 0.1 (nivel de confianza, 90%).

En la búsqueda en la Tabla 12 debe tenerse ahora en cuenta que en una prueba de dos extremos, con nivel de confianza de 90% debe quedar un área de 0.05 a cada lado de la distribución de Student, pero como la Tabla de valores de t correspondientes a áreas de un sólo lado, deberá buscarse el coeficiente bajo la columna  $t_{0.05}$ ; opcionalmente podrá usarse la regla anterior para conocer el índice de t bajo el cual ha de buscarse el coeficiente, en el renglón  $n - 1$ . En este caso para  $n - 1 = 8$  y  $t_{0.05}$  se tiene  $k = 1.86$ .

El valor  $k_0$  resultará ahora de la expresión:

$$k_0 = \frac{15.53 - 25.50}{1.98 / \sqrt{9}} = - \frac{3 \times 9.97}{1.98} = - 15.1$$

T A B L A  
Valores de  $\chi^2$  en la distrib. del mismo nombre

| -1  | $\chi^2_{.99}$ | $\chi^2_{.975}$ | $\chi^2_{.95}$ | $\chi^2_{.90}$ | $\chi^2_{.75}$ | $\chi^2_{.50}$ | $\chi^2_{.25}$ | $\chi^2_{.10}$ | $\chi^2_{.05}$ | $\chi^2_{.025}$ | $\chi^2_{.01}$ | $\chi^2_{.005}$ |       |
|-----|----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-------|
| 1   | 7.88           | 6.63            | 5.02           | 3.84           | 2.71           | 1.32           | .455           | .102           | .016           | .0039           | .0010          | .0002           | .0000 |
| 2   | 15.5           | 13.21           | 9.55           | 5.99           | 4.61           | 2.77           | 1.39           | .575           | .211           | .103            | .0505          | .0201           | .0100 |
| 3   | 19.2           | 17.3            | 12.8           | 7.81           | 6.25           | 4.11           | 2.37           | 1.21           | .581           | .352            | .216           | .115            | .072  |
| 4   | 23.9           | 21.3            | 16.8           | 9.49           | 7.76           | 5.39           | 3.36           | 1.92           | 1.06           | .711            | .483           | .297            | .207  |
| 5   | 27.5           | 25.2            | 20.5           | 11.15          | 9.2            | 6.63           | 4.35           | 2.67           | 1.61           | 1.15            | .831           | .554            | .413  |
| 6   | 31.2           | 29.3            | 24.4           | 12.6           | 10.6           | 7.84           | 5.35           | 3.45           | 2.20           | 1.64            | 1.24           | .872            | .675  |
| 7   | 34.8           | 33.4            | 28.3           | 14.1           | 12.0           | 9.04           | 6.35           | 4.25           | 2.83           | 2.18            | 1.69           | 1.24            | .939  |
| 8   | 38.4           | 37.2            | 32.2           | 15.5           | 13.4           | 10.2           | 7.34           | 5.07           | 3.43           | 2.73            | 2.18           | 1.65            | 1.34  |
| 9   | 41.9           | 40.9            | 36.2           | 16.9           | 14.7           | 11.4           | 8.34           | 5.90           | 4.17           | 3.33            | 2.70           | 2.09            | 1.73  |
| 10  | 45.5           | 44.6            | 40.3           | 18.3           | 16.0           | 12.5           | 9.34           | 6.74           | 4.87           | 3.94            | 3.25           | 2.55            | 2.16  |
| 11  | 49.0           | 48.3            | 44.4           | 19.7           | 17.3           | 13.7           | 10.35          | 7.57           | 5.58           | 4.57            | 3.82           | 3.05            | 2.60  |
| 12  | 52.6           | 52.0            | 48.6           | 21.0           | 18.5           | 14.8           | 11.3           | 8.44           | 6.30           | 5.23            | 4.40           | 3.57            | 3.07  |
| 13  | 56.2           | 55.8            | 52.8           | 22.4           | 19.8           | 16.0           | 12.3           | 9.30           | 7.04           | 5.89            | 5.01           | 4.11            | 3.57  |
| 14  | 59.8           | 59.6            | 57.0           | 23.7           | 21.1           | 17.2           | 13.3           | 10.2           | 7.79           | 6.57            | 5.63           | 4.66            | 4.07  |
| 15  | 63.4           | 63.4            | 61.2           | 25.1           | 22.3           | 18.2           | 14.3           | 11.0           | 8.55           | 7.26            | 6.25           | 5.22            | 4.59  |
| 16  | 67.0           | 67.2            | 65.4           | 26.3           | 23.5           | 19.4           | 15.3           | 11.9           | 9.31           | 7.96            | 6.91           | 5.81            | 5.14  |
| 17  | 70.6           | 71.0            | 69.6           | 27.6           | 24.8           | 20.5           | 16.3           | 12.8           | 10.1           | 8.67            | 7.56           | 6.41            | 5.70  |
| 18  | 74.2           | 74.6            | 73.8           | 28.9           | 26.0           | 21.6           | 17.3           | 13.7           | 10.9           | 9.39            | 8.23           | 7.01            | 6.26  |
| 19  | 77.8           | 78.2            | 78.0           | 30.1           | 27.2           | 22.7           | 18.3           | 14.6           | 11.73          | 10.1            | 8.91           | 7.63            | 6.84  |
| 20  | 81.4           | 81.9            | 82.2           | 31.4           | 28.45          | 23.8           | 19.3           | 15.5           | 12.4           | 10.9            | 9.59           | 8.29            | 7.43  |
| 21  | 85.0           | 85.5            | 86.5           | 32.7           | 29.6           | 24.9           | 20.3           | 16.3           | 13.2           | 11.6            | 10.3           | 8.90            | 8.02  |
| 22  | 88.6           | 89.1            | 90.5           | 33.9           | 30.8           | 26.0           | 21.3           | 17.2           | 14.0           | 12.3            | 11.0           | 9.54            | 8.64  |
| 23  | 92.2           | 92.7            | 93.9           | 35.2           | 32.0           | 27.1           | 22.3           | 18.1           | 14.8           | 13.1            | 11.7           | 10.2            | 9.26  |
| 24  | 95.8           | 96.3            | 98.0           | 36.4           | 33.2           | 28.2           | 23.2           | 19.0           | 15.7           | 13.8            | 12.4           | 10.9            | 9.89  |
| 25  | 99.4           | 100.0           | 102.0          | 37.7           | 34.4           | 29.03          | 24.3           | 19.9           | 16.5           | 14.5            | 13.15          | 11.5            | 10.5  |
| 26  | 103.0          | 103.6           | 105.6          | 38.9           | 35.6           | 30.4           | 25.3           | 20.8           | 17.3           | 15.4            | 13.8           | 12.2            | 11.2  |
| 27  | 106.6          | 107.2           | 109.6          | 40.1           | 36.7           | 31.5           | 26.3           | 21.7           | 18.1           | 16.2            | 14.6           | 12.9            | 11.8  |
| 28  | 110.2          | 110.8           | 113.6          | 41.3           | 37.9           | 32.6           | 27.3           | 22.7           | 18.9           | 16.9            | 15.3           | 13.6            | 12.5  |
| 29  | 113.8          | 114.4           | 117.4          | 42.5           | 39.1           | 33.7           | 28.3           | 23.6           | 19.6           | 17.7            | 16.0           | 14.3            | 13.1  |
| 30  | 117.4          | 118.0           | 121.2          | 43.8           | 40.3           | 34.8           | 29.3           | 24.5           | 20.6           | 18.5            | 16.8           | 15.0            | 13.8  |
| 40  | 135.8          | 136.4           | 139.6          | 51.8           | 45.7           | 39.3           | 33.7           | 29.1           | 26.5           | 24.4            | 22.2           | 20.7            | 19.0  |
| 50  | 154.2          | 154.8           | 157.9          | 63.2           | 56.3           | 49.3           | 43.0           | 37.7           | 34.8           | 32.4            | 29.7           | 28.0            | 26.0  |
| 60  | 172.6          | 173.2           | 176.1          | 74.4           | 67.0           | 59.3           | 52.3           | 46.5           | 43.2           | 40.5            | 37.5           | 35.5            | 33.0  |
| 70  | 191.0          | 191.6           | 194.4          | 85.5           | 77.6           | 69.3           | 61.7           | 55.3           | 51.7           | 48.8            | 45.4           | 43.3            | 40.0  |
| 80  | 209.4          | 210.0           | 212.8          | 96.6           | 88.1           | 79.3           | 71.1           | 64.3           | 60.4           | 57.2            | 53.5           | 51.2            | 48.0  |
| 90  | 227.8          | 228.4           | 231.1          | 107.6          | 98.6           | 89.3           | 80.6           | 73.3           | 69.1           | 65.6            | 61.8           | 59.0            | 56.0  |
| 100 | 246.2          | 246.8           | 249.5          | 118.5          | 109.1          | 99.3           | 90.12          | 82.4           | 77.9           | 74.2            | 70.1           | 67.0            | 64.0  |

Obviamente — 15.1 se sale del intervalo de aceptación, limitado por los valores 11.80, de manera que la hipótesis bajo prueba debe ser rechazada y — 25.5 no representa a la media de la población en el nivel de confianza establecido.

Una prueba como la anterior, independientemente de que se han usado valores muy dispersados, cuya significación se ve a simple vista, podría servir para calibración de un equipo de laboratorio o para saber cuando se sale de control un proceso que implique la determinación continua de la resistencia a la compresión simple de un mismo material durante un cierto lapso de tiempo. En cualquier caso se tendría una serie de datos previos que podrían tomarse muy apropiadamente como la media y la desviación estándar de la muestra. Un día determinado la máquina de prueba da para el mismo material una serie de valores cuyo promedio se aparta sospechosamente de la media usual. Una prueba de hipótesis como la anterior podría indicar a un ingeniero si esa desviación es inherente al proceso o representa un efecto fuera de control, porque la máquina haya perdido calibración o por que haya habido error de prueba, por ejemplo por influencia de un nuevo operador (desde luego, se considera que no hay cambio de material).

### B — 3 Métodos para la estimación de la desviación estándar de una población.

La estimación estadística consiste, al igual que en el caso de la media (apartado B — 1), en establecer el intervalo de confianza para la desviación estándar de la población, después de fijar el nivel de confianza de trabajo.

En los textos de estadística, el intervalo de confianza de la desviación estándar se establece más bien a través del concepto de variancia ( $\sigma^2$ ), que fue mencionado en el párrafo 2 de este trabajo. También se demuestra en aquellas fuentes que la distribución de la variancia de una distribución normal — no es normal, sino del tipo conocido con el nombre de distribución  $\chi^2$  (Tabla 14).

La fórmula que limita el intervalo de confianza de la variancia en este caso es como sigue:

$$\frac{N \sigma^2}{\chi_c^2} < \sigma^2 < \frac{N \sigma^2}{\chi_c^2}$$

Dónde:

N, es el número de elementos de la muestra representativa de la población.

$\sigma$ , es la desviación estándar de dicha muestra. El cuadrado de ese valor es la variancia correspondiente.

$\sigma'$ , es la desviación estándar de la población original, cuyo valor se está estimando.

$\chi^2_{\alpha}$  y  $\chi^2_{1-\alpha}$ , son los límites de la variable de distribución ahora en uso. Si se trabaja con nivel de confianza cualquiera, por ejemplo, 90%, en la Tabla 14 pueden obtenerse ambos valores. El área bajo la curva es como siempre igual a la unidad. Los límites  $\chi^2_{\alpha}$  y  $\chi^2_{1-\alpha}$ , deben ser tales que dividan el área con tres porciones, una central de valor igual al nivel de confianza elegida y dos laterales, respectivamente iguales a la mitad del complemento a uno del nivel de confianza. Se éste vale 90% como se dijo, los valores deberán buscarse en las columnas  $\chi^2_{0.05}$  y  $\chi^2_{0.95}$  en el renglón  $N-1$ .

A modo de ejemplo supóngase la muestra dada por los valores de la Tabla 13, cuya media es 15.53 Ton/m<sup>2</sup> y cuya desviación estándar es de 1.98 Ton/m<sup>2</sup>.

La pregunta que podría hacerse es en que intervalo de valores se encontrará la desviación estándar de la población, con un 90% de probabilidad (nivel de confianza), a partir de la desviación estándar de la muestra.

Para el caso  $N = 9$ ,  $\sigma^2 = 1.98^2 = 3.92$   $\chi^2_{\alpha} = 15.5 \chi^2_{\alpha}$ , = 2.73; por consiguiente:

$$\frac{9 \times 3.92}{15.5} < \sigma^2 < \frac{9 \times 3.92}{2.73}$$

Obteniéndose el intervalo:

$$2.28 < \sigma^2 < 12.92$$

Por lo tanto la desviación estándar de la población estará comprendida en el intervalo.

$$1.51 < \sigma < 3.59$$

Lo anterior quiere decir que, con base en los datos de la muestra manejada puede decirse con un 90% de confianza, que la desviación estándar de la población a la que la muestra pertenece está comprendida entre los límites señalados.

Si se hace crecer el nivel de confianza, crecerá correspondientemente el intervalo obtenido.

La fórmula anterior se presta también para resolver otra variante del problema, que consistiría en conocer cual es la probabilidad de que la desvia

ción estándar de la población original se encuentre entre unos límites prefijados. A modo de ejemplo, se calculará la probabilidad de que la desviación estándar en cuestión queda comprendida entre los límites 2.0 y 3.0. La expresión anterior podrá escribirse ahora como:

$$1.0 = \frac{H \cdot \sigma^2}{\chi_c^2} < \sigma^2 < \frac{H \cdot \sigma^2}{\chi_c^2}$$

De donde:

$$\chi_c^2 = \frac{9 \times 3.92}{4} = 8.82 \text{ y } \chi_c^2 = \frac{9 \times 3.92}{9.0} = 3.92$$

En la Tabla 14 se ve que dichos límites corresponden a  $(n - 1 = 8) \chi_{0.65}^2$  y a  $\chi_{0.15}^2$ . Lo anterior quiere decir que a un lado de la distribución  $\chi^2$  queda un área de 0.35 y al otro, otra de 0.15, por lo que en total, el intervalo de confianza queda correspondiendo a un área de  $1.0 - (0.35 + 0.15) = 0.50$ . Así pues, existe un 50% de probabilidades de que la desviación estándar de la población original se encuentre entre los límites prefijados, de 2.0 y 3.0. La situación se representa en la Fig. 17 en la que además puede apreciarse la forma típica de la distribución  $\chi^2$ .

Cabe el comentario de que una distribución  $\chi^2$  se va pareciendo más y más a una normal, a medida que  $n$  crece.

#### B -- 4 Prueba de hipótesis para la desviación estándar de una población.

El mecanismo de estas pruebas de hipótesis es enteramente igual al comentado para el caso de la media de la población. La distribución a aplicar ahora es sistemáticamente la  $\chi^2$ , que es la distribución teórica de la variancia. En el caso que se analiza puede haber también pruebas de uno o dos extremos.

$$\chi^2 < \frac{H \cdot \sigma^2}{\chi_c^2}$$

que será la fórmula a considerar en este caso para establecer el valor de  $k_0$ .

A modo de ilustración y con base en los datos de la Tabla 5, se hará la siguiente hipótesis bajo prueba; la desviación estándar de la población original vale 250 kg/m<sup>3</sup>. La hipótesis alterna será: la desviación estándar de la

población original es menor que  $258 \text{ kg/m}^3$ .

Se considera como muestra bajo estudio al renglón No. 13 de la Tabla 5.- Se desea trabajar con un nivel de confianza de 95% (nivel de significación = igual a 0.05).

El valor de  $k$  se establece con la Tabla 14. Puesto que la prueba es a un sólo extremo y se desea separar los valores de la desviación menores que el propuesto, el área  $\alpha$ , quedará ahora a la izquierda de la distribución  $\chi^2$ , limitada por el valor  $\chi^2_{0.05}$ , que en la tabla resulta ( $N - 1 = 4$ ) 0.711.

El valor de  $k_0$  se obtendrá aplicando la fórmula:

$$\chi^2 = k_0 = \frac{5 \times 230^2}{258}$$

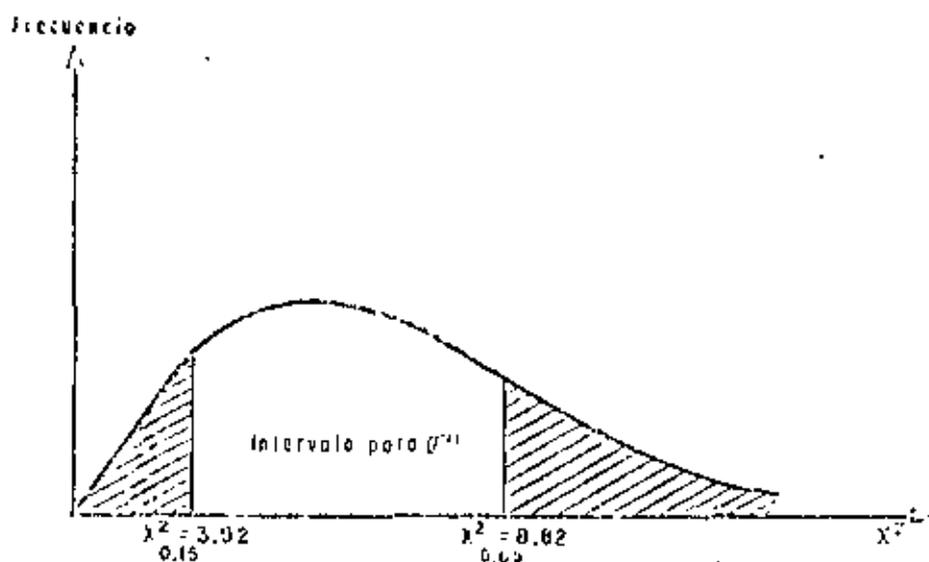


Figura 17. Cálculo de la probabilidad de que esté en un intervalo prefijado.

En la Tabla 9 (Décimo tercer renglón) se ve que la desviación estándar de la muestra  $s_x$  es  $230.2 \text{ kg/m}^3$ . El valor  $\mu = 258 \text{ kg/m}^3$  es la hipótesis bajo prueba.

Resultado:

$$k_0 = 3.98$$

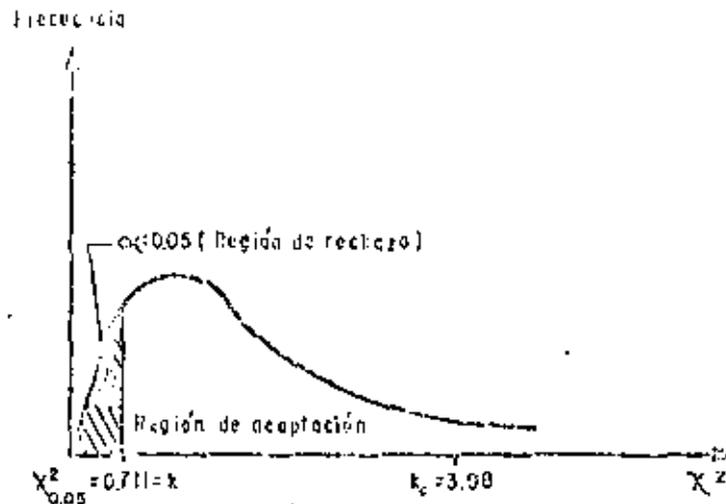


Figura 13. Prueba de hipótesis a un solo extremo, para la variancia.

3.98 > 0.711, por lo que cae en la región de aceptación, lo que indica que la hipótesis debe ser aceptada con 95% de confianza y con 5% de probabilidad de cometer un error del tipo I. La Fig. 13 muestra la situación a que se ha llegado.

Un ejemplo de una prueba de hipótesis con los extremos sería el siguiente:

Hipótesis bajo prueba: la desviación estándar de la población original es igual a 258 kg/m<sup>3</sup>. La hipótesis alterna: la desviación estándar de la población original es diferente de 258 kg/m<sup>3</sup>.

Ahora, si se trabaja con el mismo nivel de significación que antes se usó, deberá quedar bajo la distribución  $\chi^2$  un área de rechazo a la izquierda igual a 0.025 y un área de rechazo a la derecha, del mismo valor.

Los correspondientes valores de k se obtienen de la Tabla 14. y son:

$$\chi^2_{0.025} = 0.483$$

$$\chi^2_{0.975} = 11.1$$

El valor de  $k_0$  sería el mismo calculado en el ejemplo anterior, igual a 3.98.

Se observa que 3.98 queda dentro del intervalo de aceptación, por lo que la hipótesis bajo prueba es aceptable con 95% de probabilidades. La Fig.19 - ilustra este ejemplo.

Las pruebas de hipótesis para la variancia o para la desviación estándar, que automáticamente queda también involucrada, tienen aplicación práctica en los problemas en que se controle la variabilidad de un proceso sujeto a control. Si se viene midiendo un cierto concepto, se conoce su desviación estándar durante el lapso de medición; si por cualquier razón, en una nueva muestra aparece un valor de la desviación estándar diferente del usual, una prueba como las anteriores puede hacer ver si el cambio corresponde a características propias de la aleatoriedad del proceso y, por ende, inevitables o si, por el contrario, se debe a factores extraños al proceso que pueden y deben corregirse.

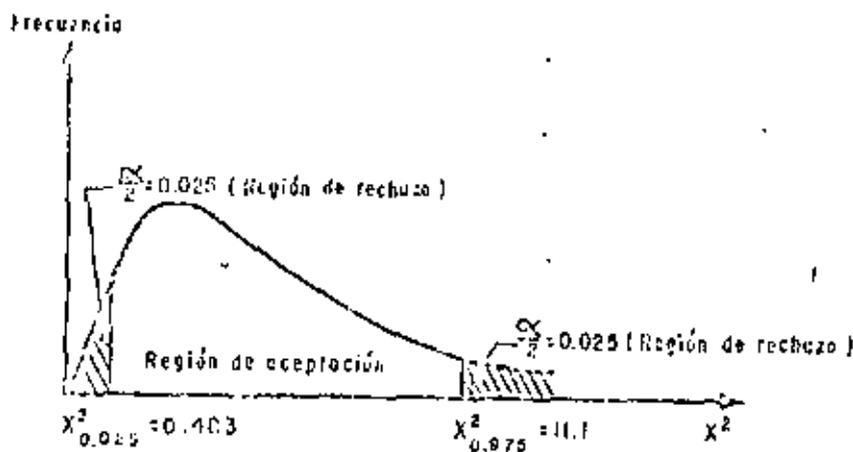


Figura 19. Prueba de hipótesis a dos extremos, para la variancia.

#### B - 5 Comparación de dos medias.

En muchas ocasiones surge la conveniencia de establecer si existen o no diferencias significativas entre las medias de dos muestras de un mismo concepto bajo control. Generalmente las dos muestras corresponden a la misma población, pero en principio, los métodos que ahora se establecen podrían servir para comparar las medias de dos poblaciones diferentes. También, con frecuencia, el objeto de estos análisis es determinar si las dos muestras pueden considerarse de la misma población, quizá para decidir si el proceso que produjo una de ellas es o no superior al que produjo la otra. Por ejemplo, podría querer dilucidarse si un laboratorio trabaja mejor que otro al hacer una cierta prueba o si dentro del mismo laboratorio un cierto detalle, añadido a la metodología de una prueba, es o no significativo.

La técnica de la comparación incluye la realización de una prueba de hipótesis, en la que la hipótesis bajo prueba es:

$$\bar{x}_A = \bar{x}_B$$

Es decir, se establece la igualdad de las medias de las poblaciones A y B.

La hipótesis alterna puede tener una de las tres formas siguientes:

$$- x'_a \neq x'_b$$

$$- x'_a > x'_b$$

$$- x'_a < x'_b$$

La prueba en sí se realiza exactamente igual que otras ya estudiadas, rechazándose la hipótesis bajo prueba cuando el valor estadístico de la prueba caiga fuera de la región de aceptación. La primera de las tres hipótesis alternas conduce a una prueba en dos extremos, en tanto que las dos siguientes dan lugar a pruebas en un extremo.

Puesto que la distribución de las muestras está afectada por la desviación estándar de la población original es necesario para efectuar las pruebas de hipótesis conocer este último valor o determinarlo por algún procedimiento. En este caso caben tres posibilidades en torno a este problema.

$\sigma'_A$  y  $\sigma'_B$  son conocidas

- Las magnitudes de  $\sigma'_A$  y  $\sigma'_B$  no son conocidas, pero se sabe o se supone que son iguales.

- Las magnitudes de  $\sigma'_A$  y  $\sigma'_B$  no se conocen y no se sabe si son iguales o diferentes.

De las posibilidades anteriores, la primera es poco frecuente en la práctica, en tanto que la segunda es, con mucho, la que más se presenta; la tercera posibilidad no es rara y debe acogerse a ella el análisis cuando exista motivo fehaciente para pensar que efectivamente  $\sigma'_A$  y  $\sigma'_B$  son distintas.

Existen pruebas que pueden ayudar a dilucidar si las desviaciones estándar  $\sigma'_A$  y  $\sigma'_B$  son en realidad iguales o distintas.

A continuación se analizarán por separado los procedimientos para la realización de las pruebas de hipótesis en cada uno de los tres casos arriba mencionados.

$B = 5.1 S_A^{-1}$  y  $S_B^{-1}$  son conocidas.

En este caso el proceso estadístico puede tratarse como un proceso compuesto, con la variable  $x_A - x_B$  jugando el papel que usualmente se asigna a  $x$ . La variable normalizada puede obtenerse siguiendo la regla dada por la fórmula anterior, si bien expresada en la fórmula que aparece en la hoja 69, puesto que el interés del análisis se centra en la comparación de los valores medios de la variable y no en ésta misma.

La desviación estándar del proceso compuesto deberá calcularse con la expresión que aparece en primer término en la hoja 17. Tomando en cuenta todo lo anterior, la variable normalizada será:

$$z = \frac{(\bar{x}_A - \bar{x}_B) - (\bar{x}'_A - \bar{x}'_B)}{\sqrt{\frac{S_A^{-2}}{N_A} + \frac{S_B^{-2}}{N_B}}}$$

Esta variable tendrá una distribución normal.

Habrá ahora que establecer el nivel de confianza en el que se desea trabajar, obteniéndose de la Tabla II el valor de  $z$  correspondiente a dicho nivel  $k$ ; este valor deberá compararse con el obtenido de la misma ecuación anterior, calculando particularizándolo para las condiciones del problema ( $k_0$ ).

A modo de ejemplo imagínese que se tienen muestreados dos tramos de un cierto camino, en lo que se refiere a trabajos de compactación. Ambas muestras podrían ser similares a la tabla 5.

Supóngase también que los valores muestrales resultaron ser:

$$\bar{x}_A = 1722.3 \text{ kg/m}^3 \quad \bar{x}_B = 1689.5 \text{ kg/m}^3$$

$$N_A = 100 \quad N_B = 81$$

$$S_A = 110.4 \text{ kg/m}^3 \quad S_B = 112.6 \text{ kg/m}^3$$

Se desea saber si, estadísticamente hablando, hay o no diferencias significativas entre ambas poblaciones, en referencia a sus valores medios. Se desea establecer la conclusión con un nivel de confianza de 95%. En otras palabras, se desea saber con 95% de confianza, si el trabajo de compactación en los dos tramos es equivalente, supuesto que se han utilizado "aparentemente" los mismos materiales.

Se planteará la siguiente prueba de hipótesis:

Hipótesis bajo prueba:

$$\bar{x}'_A = \bar{x}'_B$$

Como hipótesis alterna se adoptará la de que

$$\bar{x}'_A \neq \bar{x}'_B$$

El valor de  $k$  podrá obtenerse de la Tabla 11. Puesto que es una prueba en dos extremos, habrá que buscar el valor del área igual a 0.0475, obteniéndose  $t = \pm 1.96$ .

Hótese que también hubiera podido utilizarse la Tabla 10, por estar 95% incluido en ella.

El valor de  $k_0$  puede obtenerse de la expresión anotada en primer lugar en la hoja 74:

$$\begin{aligned} z = k_0 &= \frac{1722.3 - 1689.5}{\sqrt{\frac{110.4^2}{100} + \frac{112.6^2}{81}}} \\ &= \frac{32.8}{\sqrt{121.88 + 156.53}} \\ &= \frac{32.8}{16.7} = 1.96 \end{aligned}$$

Por casualidad el valor de  $k_0$  resultó igual al límite superior de aceptación (1.96), por lo que podría adoptarse el criterio de aceptar la hipótesis y considerar que el trabajo de compactación hecho en los dos tramos en estudio es equivalente.

Lo anterior amerita algunas reflexiones. En primer lugar el método propuesto parece una forma muy racional de establecer una base de decisión para muchas disyuntivas de las que usualmente se presentan en trabajos de residencia y construcción, conectados con las obras viales. Sería muy útil normar la decisión en la disyuntiva con un criterio como el arriba expuesto, sin duda mejor que el simple sentimiento personal.

En segundo lugar, destaca en el ejemplo la superioridad de los métodos estadísticos de control, respecto a los meramente observacionales. Podría imaginarse que la población A tuviese el grado de compactación de 100%; es decir, que 1722.3 kg/m<sup>3</sup> fuese el peso volumétrico seco máximo obtenido en la prueba de control en uso. En tal caso, el valor de 1689.5 kg/m<sup>3</sup>, obtenido como media de la muestra B representaría el 98% de grado de compactación. Si se tratase de una obra con grado de compactación especificado de 100%, el tramo B sería rechazado por un inspector rigorista (o, mejor dicho, justo); sin embargo, el tramo no merece el rechazo. Naturalmente que en el ejemplo anterior los valores resultaron muy próximos y la discusión que se hace podría resultar un poco académica, pero frecuentemente se plantean situaciones conceptualmente similares con valores bastante más desviados. Lo importante es que el juicio por sentimiento, por mejor respaldado que esté en una sólida experiencia precedente, no puede aspirar a diversificar a ojo los errores inherentes a un proceso aleatorio, de aquellos que emanan de una manipulación defectuosa y que pueden corregirse.

La Fig. 20 muestra en croquis gráfico la situación del ejemplo.

$B = 5.2 \sigma_A$  y  $\sigma_B$  no son conocidas, pero se sabe o se supone que son iguales.

El proceso estadístico debe tratarse en este caso también como un proceso compuesto, teniendo en cuenta, además, que la distribución de las medias de las muestras no es normal, sino del tipo de Student, que ya ha sido mencionado. La variable normalizada tiene la expresión correspondiente a la fórmula anterior y, para el caso presente, puede escribirse:

$$t = \frac{(\bar{x}_A - \bar{x}_B) - (\bar{x}'_A - \bar{x}'_B)}{s \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_B} \right)^{1/2}}$$

Una discusión de los casos en que el uso de la distribución de Student conduce a soluciones matemáticamente exactas o a soluciones únicamente aproximadas y del grado de aproximación en éstas soluciones.

En la expresión anterior:

$$s = \left( \frac{N_A \sigma_A^2 + N_B \sigma_B^2}{N_A + N_B - 2} \right)^{1/2}$$

El mecanismo de la prueba de hipótesis es, por otra parte, similar a todas las demás que se han descrito. Habrá que fijar un nivel de confianza  $\alpha$  - criterio y, con base en él, obtener en la Tabla 12 los valores de  $t$  que correspondan, tomando en cuenta si la prueba es de uno o dos extremos y calculándolo en el renglón correspondiente a  $N_A + N_B - 2$ .

Después habrá de calcular un valor de  $k_0$  con base en la expresión anterior y compararlo con el de  $k$ , para definir si cae en la región de aceptación o en la de rechazo.

Como ejemplo imagínese que un cierto laboratorio rinde los resultados proporcionados por la Tabla 13 ( $N_A = 9$ ,  $\sigma_A = 1.98$  Ton/m<sup>2</sup> y  $\bar{x}_A = 15.53$  Ton/m<sup>2</sup>). Por su parte, otro laboratorio rinde resultados por una muestra análoga, cuya medida es  $\bar{x}_B = 17.0$  Ton/m<sup>2</sup>, cuya desviación estándar es  $\sigma_B = 1.52$  Ton/m<sup>2</sup> y constituida por 12 elementos ( $N_B = 12$ ).

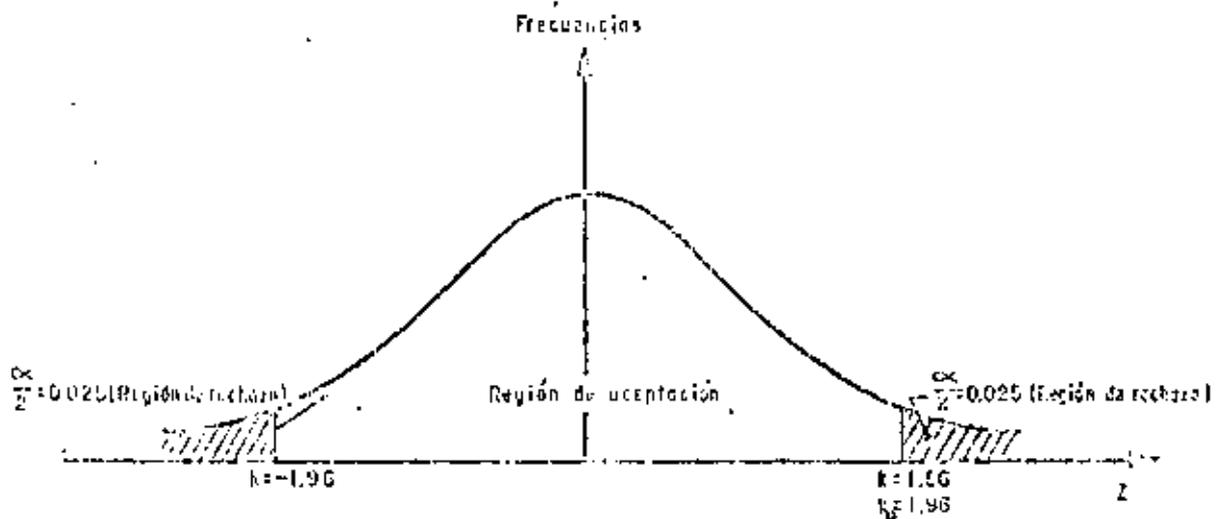


Figura 20. Determinación de la región de aceptación y rechazo para prueba de hipótesis de comparación de medias de dos poblaciones.

Se desea saber si los resultados de ambos laboratorios son estadísticamente concordantes o si entre ellos hay alguna diferencia significativa. Se desea trabajar con un nivel de confianza de 90%.

Como hipótesis bajo prueba se adoptará la de que  $\bar{x}_A = \bar{x}_B$  y como hipótesis alterna  $\bar{x}_A < \bar{x}_B$ , con lo que definirá una prueba en un solo extremo.

En la tabla 12 puede verse que el valor de  $k = t_{90} = -1.33$  (calculado en el renglón  $H_A + H_B - 2 = 19$ ).

El valor de  $k_0$  resulta ser:

$$s = \left( \frac{15.53 \times 1.98^2 + 17.0 \times 1.82^2}{19} \right)^{1/2} =$$

$$= \left( \frac{60.88 + 56.27}{19} \right)^{1/2} = (6.16)^{1/2} = 2.48$$

Con el valor de  $s$  se aplicará la fórmula que aparece en primer término en la página 76.:

$$t = k_0 = \frac{15.53 - 17.00}{2.48 \left( \frac{1}{9} + \frac{1}{12} \right)^{1/2}} = - \frac{1.47}{\frac{2.65}{6} \cdot 2.48}$$

$$= - \frac{8.82}{6.57} = -1.34$$

Como quiera que  $-1.34$  es menor que  $-1.33$  la hipótesis bajo prueba debe rechazarse, concluyéndose que las variaciones obtenidas entre ambos laboratorios obedecen a causas que rebasan el error inherente a la prueba efectuada y que deben ser revisadas.

La figura 21 es un croquis de la situación.

B - 5.3  $\sigma'_A$  y  $\sigma'_B$  no se conocen y no se sabe si son iguales o diferentes.

De nuevo el procedimiento para este caso es análogo a los anteriores, empleándose la distribución de Student para las medias de las muestras y las siguientes expresiones:

$$t = \frac{(\bar{x}_A - \bar{x}_B) - (x'_A - x'_B)}{\left( \frac{\sigma_A^2}{N_A} + \frac{\sigma_B^2}{N_B} \right)^{1/2}}$$

El renglón de la Tabla 12 con el que ha de entrarse para encontrar el valor de  $k$ , queda dado por la expresión:

$$r = \frac{1}{\frac{c^2}{N_A - 1} + \frac{(1 - c)^2}{N_B - 1}}$$

donde:

$$c = \frac{\frac{\sigma_A^2}{N_A}}{\frac{\sigma_A^2}{N_A} + \frac{\sigma_B^2}{N_B}}$$

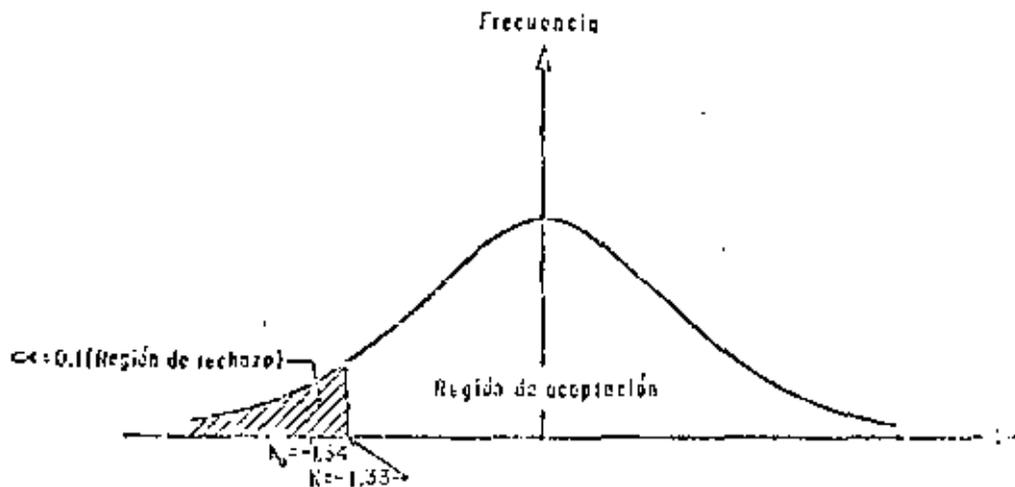


Figura 21. Determinación de la región de aceptación y de rechazo para una prueba de hipótesis de comparación entre dos medias de población, utilizando la distribución de Student.

C - Uso de los métodos estadísticos de control.

En la Ingeniería Civil no se han usado los métodos estadísticos de control en forma intensa y sistemática que empieza a ser común en otras muchas operaciones industriales. Esta es sin duda, una grave limitación de las técnicas de construcción de obra pesada. En el caso particular de las vías te-

menores es menor aún la utilización que se hace de los conceptos estadísticos en problemas de control de calidad o de valuación de riesgos, un aspecto importante y poco utilizado de aquella actividad.

Es un lugar común decir que los métodos estadísticos de control de calidad resultan en una metodología un tanto idealista, fuera de las posibilidades reales de un ingeniero común. La afirmación anterior merece ser rebatida desde más de un punto de vista. En primer lugar es un hecho que podrá comprarse fácilmente que el control estadístico de calidad es más económico que métodos más tradicionales, en el sentido de que requiere menos muestreo y menos trabajo de laboratorio; además la interpretación del trabajo de control es limpia e inmediata, en tanto que métodos más tradicionales, en los que se llega a conclusiones a base de acumulación de pruebas, presentan el inconveniente adicional de que nadie encuentra el tiempo suficiente para interpretar racionalmente tanta información difusa.

En segundo lugar, tal como el autor de este trabajo espera que el lector haya concluido a partir de lo hasta aquí leído, los métodos estadísticos de control ofrecen una garantía lógica, a la que será muy difícil llegar por la simple acumulación de observaciones. También se espera que haya surgido la conclusión de que, por lo menos en su esquema general, los métodos son prácticos, económicos y fácilmente aplicables, sobre todo teniendo en cuenta que los trabajos de control están a cargo de equipos especializados.

Las cartas de control pudieran ser quizá el enfoque más prometedor de los problemas de control en lo que respecta a trabajo de rutina, completándolas con análisis de inferencia y planteamiento de pruebas de hipótesis, para análisis de disyuntivas. De cualquier manera, no cabe duda de que existe una amplia gama en el espectro de las posibles organizaciones convenientes de los trabajos, lo que hace a estos métodos muy apropiados para las vías terrestres, pues pueden adaptarse muy fácilmente a las diversas jerarquías de obra.

Un excelente complemento de un estudio estadístico para control de calidad es la posibilidad de analizar el riesgo de falla en diferentes etapas y aspectos de la obra, así como la oportunidad que proporcionan para adquirir una idea objetiva de cual debe ser el intervalo de tolerancia a permitir en diferentes aspectos de los trabajos.

En la Fig. 22 se muestran dos distribuciones de lo que a fin de cuentas podría considerarse un mismo evento, si bien contemplado desde dos puntos de vista bien diferentes. La curva llena podría denominarse el evento resistente y representa la respuesta del sistema estructural a una causa o sollicitación externa; la distribución punteada es la del evento motor, o sea la del factor que actúa sobre la estructura y que puede producir su falla. Es natural que la respuesta estructural esté desplazada hacia la derecha, puesto que el ingeniero siempre buscará que la respuesta de la estructura en un concepto cualquiera, susceptible de producir falla, tenga valores más grandes que aquellos con los que el concepto amaga a la estructura. La distancia horizontal entre ambas distribuciones estadísticas proporcionaría un enfoque estadístico del concepto factor de seguridad.

En la Fig. 22 se reconoce que cualquier concepto susceptible de producir falla se va a presentar a lo largo del tiempo como una variable con distribución aleatoria y que la respuesta estructural a dicho concepto presentará también esas mismas características aleatorias. Por ejemplo, el momento motor que compromete la estabilidad de un talud no es una constante fija y predeterminada, como tampoco lo es el resistente que protege a la estructura; ambos dependen de una serie de factores de clima, flujo de agua, desarrollo de vegetación, trabajos de conservación, etc., que los hacen aleatoriamente variables.

Para un determinado nivel de confianza, previamente elegido, aparece el riesgo de falla cuando la distribución estadística del momento motor invade la distribución que se anticipe para la respuesta de la estructura. El punto donde ambas distribuciones se cruzan representa el equilibrio de ocurrencia de los estados crítico y no crítico. El área extrema bajo la zona de cruzamiento (rayada) representa el límite superior de la probabilidad de falla por causa del concepto bajo análisis. En este caso, "falla" representa la deficiencia de respuesta de la estructura para alcanzar el nivel de confianza que se haya fijado; desde luego, "falla" no quiere decir colapso estructural ahora y si la probabilidad de falla bajo los dos sistemas (o sea, bajo las dos curvas de distribución) se mantiene menor que la probabilidad de falla contemplada en el proyecto, el estado crítico no desembocará en ningún problema de obra; en caso contrario, si podrá decirse que la respuesta estructural a la acción bajo análisis no es adecuada para soportarla, dentro del nivel de confianza propuesto.

Si este último es el caso, deberán tomarse providencias para reducir el área bajo ambas distribuciones (parte b de la Fig. 22), lo que podrá lograrse aumentando la media de la distribución de respuesta, reduciendo el coeficiente de variación de ésta o haciendo ambas cosas; se supone como es usual, que el ingeniero tiene poca esperanza de poder influir en como se le presente el evento motor y en su distribución.

Las acciones anteriores elevan los costos y aumentan el trabajo de inspección, todo lo cual deberá compararse con un trabajo constructivo menos cuidadoso, pero con base en un proyecto más conservador, que automáticamente trasladará la distribución de la respuesta hacia la derecha, para escoger aquella línea operativa que produzca menor costo y mayor flexibilidad programática.

Evidentemente las ideas anteriores pocas veces podrán llevarse a una cuantificación precisa en un trabajo real conectado con la construcción de vías terrestres y ello quizá por razones de disidia o tradición negativa, que por las verdaderas dificultades del problema, pero de todas formas la discusión anterior parece útil para el señalamiento de líneas de acción y la formulación de criterios adecuados.

El aspecto importante que puede de manifiesto la formulación de un programa de control de calidad con bases estadísticas es la verdadera rela-

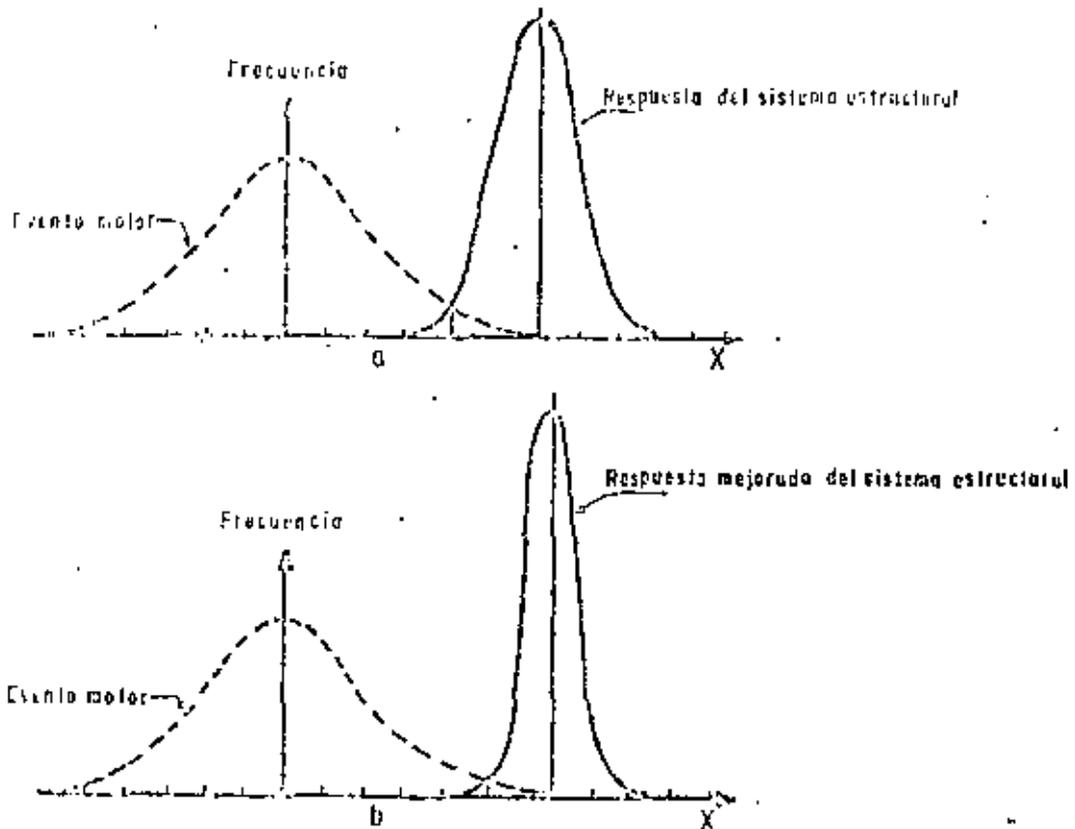


Figura 22. Interacción estadística de un evento mayor y la respuesta estructural.

ción que puede existir entre los coeficientes de variación de los diferentes materiales involucrados. A modo de ejemplo del tipo de la información que puede obtenerse en estos aspectos se presenta la Fig. 23, que expresa la correlación de las variaciones del grado de compactación y de la resistencia a la compresión simple de una subrasante, en un caso real, por cierto bastante representativo de lo que suele ser una situación general.

Debe observarse que cambios proporcionalmente pequeños en el grado de compactación implican cambios muy importantes en la resistencia de la subrasante.

La conclusión a extraer no es, por supuesto, que convenga la compactación a ultranza de dicha capa del pavimento, pues como se sabe una capa no debe compactarse más allá de lo que sea permanente en el tiempo, en vista de la acción del agua, o de lo que toleren las características de expansibilidad,

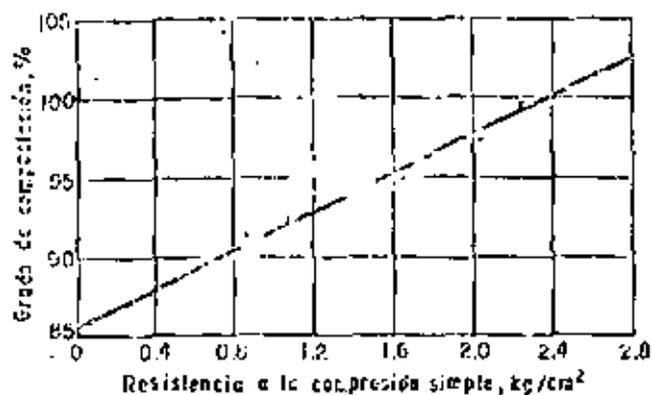
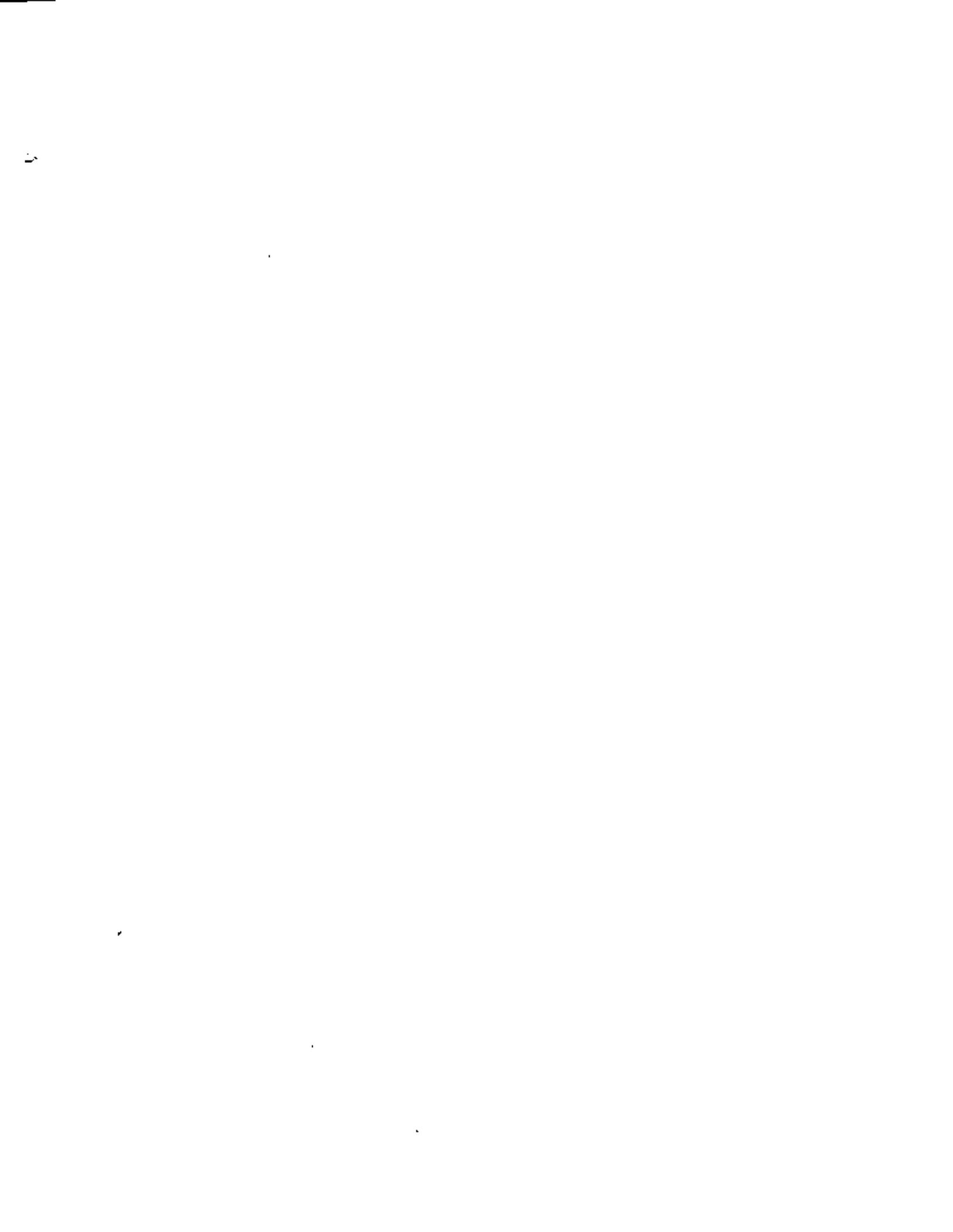


Figura 23. Correlación entre las variaciones estadísticas de un proyecto real del grado de compactación y la resistencia a la compresión simple de una subrasante.

resiliencia, etc. de los suelos o, simplemente de la demanda de resistencia que se presente el proyecto. Lo que sí hace ver la figura es el tipo de relación entre ambos conceptos y lo que la variación de uno de ellos representa respecto al otro, para extraer de tales hechos los criterios particulares de cada caso.









centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



## DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS

PANEL SOBRE RECUPERACION Y RECICLAJE DE  
PAVIMENTOS ASFALTICOS.

"REHABILITACION DE PAVIMENTOS MEDIANTE  
RECICLADO Y AGENTAS REJUVENECEDORES"

M. EN C. CARLOS FERNANDEZ LOAIZA  
ING. RAFAEL ANGEL LIMON LIMON

JULIO, 1979.



## REHABILITACION DE PAVIMENTOS MEDIANTE RECICLADO Y AGENTES REJUVESCEDORES

M. en C. Ing. Carlos Fernández L.  
Ing. Rafael Angel Limón Limón

### I. GENERALIDADES

A medida que transcurre el tiempo, se va reduciendo el poder económico de Construcción de Carreteras debido a procesos inflacionarios, escasez de energéticos, carencia de fondos, lapsos relativamente cortos de duración de las Administraciones, efectos en el medio ambiente y características de seguridad, de tal manera que la velocidad de desarrollo de daños en nuestras Carreteras es mucho más rápido que la de reparación de las mismas.

En la labor de conservación de carreteras, el factor más importante y trascendental es el mantenimiento oportuno de la carpeta para que esté en buenas condiciones de funcionalidad y estructurales y preste el servicio requerido; de no efectuar esto a tiempo se pueden dañar también las capas inferiores, a tal grado que en algunos casos pueden requerirse reconstrucciones totales, no sirviendo prácticamente de nada los paliativos que comunmente se aplican, cuyo efecto rápidamente desaparece.

Desde hace más de 50 años, tradicionalmente se ha dado mantenimiento a los Pavimentos mediante bacheo, sellado de grietas, riegos y tratamientos de diferentes tipos y en muchos casos construcción de sobrecarpetas.

Sin embargo, el procedimiento de recarpetado presenta serias desventajas entre las que podrían citarse las siguientes:

- Se coloca la Sobrecarpeta sobre una superficie -- irregular, lo que afecta tanto a los espesores como a la uniformidad en la compactación.
- En muchos casos se crean problemas muy serios, no se diga en ciudades. Estos problemas son de drenaje, bombeo, escalonamiento en los acotamientos, -- elevación de la rasante, el muy serio problema de la reducción del gálibo en los puentes, peso adicional sobre suelos blandos, dificultad para la -- limpieza y operación en las calles de las ciudades, etc.
- Problemas de adherencia o liga entre carpetas debido a la presencia de impurezas, aceites, arcilla, hule, etc. Factores éstos, que influyen en que se manifiesten desprendimientos o corrimientos en la carpeta, situación que es aún más crítica en las -- zonas de frenaje y arranque.

Tomando en cuenta lo anterior y, como la mayor parte de -- los fondos para la conservación de las carreteras se aplica a la reparación de la superficie del pavimento se han -- hecho considerables esfuerzos en el desarrollo de técnicas que económicamente y en forma práctica resuelvan el problema. En esta presentación se hará referencia a algunas de -- dichas técnicas.

## II. TIPOS DE FALLAS MAS COMUNES EN PAVIMENTOS ASFALTICOS Y SU REPARACION.

Podría decirse que en términos generales los tipos de falla más comunes son:

Agrietamiento

Distorsiones

Desprendimientos o desintegraciones

Superficie lisa

Son muy numerosas las diferentes causas que pueden originar estos tipos de fallas, pudiendo deberse a deficiencias en el diseño (presencia de condiciones no previstas en el diseño como drenaje, tránsito, clima, etc.) defectos en la construcción, control de calidad inadecuado, o mala calidad de los materiales.

### 1. Agrietamiento

El agrietamiento puede deberse a defectos en la composición de la carpeta asfáltica como podrían ser el endurecimiento del asfalto, temperaturas bajas y baja ductilidad del residuo. También se puede deber a que las cargas aplicadas por el tránsito y sus repeticiones sean superiores a las contempladas en el diseño, lo que obviamente produce la fatiga de los materiales. Pudiera ser que el mismo diseño no sea adecuado para manipular la información existente y los pavimentos diseñados en tal forma quedarán desde su nacimiento condenados a sufrir este tipo de fallas.

El agrietamiento también puede ocurrir por deformaciones elásticas en suelos resilientes que constituyen las capas del pavimento o por deformaciones plásticas en las capas inferiores a la carpeta, o aun fallas por falta de cu-

pacidad de carga en alguna o algunas de las capas que constituyen el pavimento.

La forma de reparar este tipo de fallas ha sido perfectamente estandarizada y varía desde el simple sellado de las fisuras hasta el bacheo en caja en zonas muy dañadas y la posterior construcción de una sobrecarpeta en las zonas menos dañadas de un pavimento muy agrietado.

El aspecto del agrietamiento en carpetas asfálticas ha sido profusamente estudiado proponiéndose lo siguiente para evitarlo:

- Cuidar el contenido de finos en los materiales.
- Utilizar asfaltos blandos, poco susceptibles al envejecimiento y a cambios de temperatura.
- Contenidos adecuados de asfalto
- Capas subyacentes estables con altos valores de soporte y resistencia al desgaste.
- Diseñar en forma especial para climas severos.
- Diseñar para probables incrementos en el tránsito.
- Realizar la construcción en épocas adecuadas y con personal experimentado.
- Cuidar el fraguado en asfaltos rebajados, - la aplicación de calor en cementos asfálti-

cos y el rompimiento en las emulsiones.

- Un buen control de calidad representativo y efectivo.

Se han hecho numerosos esfuerzos para evitar el reflejo de las grietas en las sobrecarpetas, tales como el empleo de acero de refuerzo que no dado muy buenos resultados, llegándose casi siempre a la recomendación de carpetas asfálticas de gran espesor, solución que se antoja muy cara sobre todo si no se requiere refuerzo estructural, posteriormente se hará referencia a un estudio realizado en Arizona E.U. con relación a varios procedimientos ensayados para evitar o reducir el reflejo de Grietas.

## 2. Distorsiones

Son este otro tipo de daño por desgracia muy frecuente, generalmente se debe a cargas y repeticiones no previstas en el diseño, contenidos elevados de asfalto y/o solventes, - mala calidad de las capas que subyacen a la carpeta debido a problemas de compactación, exceso de finos, plasticidad de los suelos, etc , también se puede deber este problema a defectos de construcción como podría ser una nivelación inadecuada, construcción en época lluviosa, personal inexperto, limpieza inadecuada entre las capas sucesivas y deficiencia en el control. El tránsito también puede ocasionar este daño debido a fugas de combustible o por el frenado y arranque. Los asfaltos suaves, agregados redondeados y el diseño inadecuado de la mezcla también pueden colatar a este tipo de daños.

Se ha recomendado tomar las siguientes providencias para evitar este tipo de daños:

- Usar agregados limpios y triturados en las capas superiores.
- Emplear asfaltos duros en la carpeta.
- Contenido óptimo en cuanto a estabilidad
- Capas subyacentes estables y de buena calidad.
- Tomar en cuenta en el diseño, las altas temperaturas que puede alcanzar la carpeta, -- así como el probable incremento en el tránsito o bien la circulación eventual de cargas muy pesadas.
- Construir en épocas adecuadas, empleando -- personal eficiente y experimentado, que cuide mucho de la compactación, nivelación, -- contenidos de agua, etc.
- Buen control de construcción

Para la reparación de este tipo de fallas es común renivelar y colocar sobre carpetas, llegándose algunas veces a la remoción de la carpeta inestable y su posterior reposición. Estas prácticas sin embargo pueden resultar inadecuadas si la falla es del tipo estructural y no se toman providencias para eliminar el origen de la falla (tránsito?, ¿drenaje?, ¿recompactación?, ¿consolidación?).

### 3. Desprendimientos

Este tipo de falla también común, aunque no tan molesto para el usuario como el caso de las deformaciones, se debe también a un gran número de causas entre las que se podrían citar:

- Construcción y control inapropiados
- Contenidos deficientes de asfalto
- Humedad excesiva de las capas subyacentes
- Carpeta muy delgada
- Tránsito muy pesado o permitir su circulación durante el sellado en períodos inadecuados.
- Falta de sello o su aplicación tardía
- Asfaltos muy duros
- Agregados inapropiados
- Presencia de agua en la mezcla
- Factores climáticos
- Mal diseño de la mezcla

Entre las recomendaciones que generalmente se dan para no incurrir en este tipo de daños son las siguientes:

- Agregados limpios y con buena adherencia, duros, de baja absorción y equidimensiona-

- les aunque con la granulometría adecuada.
- Asfaltos con alto poder adhesivo y duros
  - Diseño adecuado de la mezcla o del tratamiento superficial.
  - Construir en época adecuada, con personal experimentado y cuidar mucho la compactación de la carpeta, así como de los riegos que la unen a la base.
  - Realizar un buen control de calidad

Se tienen también algunas recomendaciones adicionales, referentes a los diferentes productos empleados en la mezcla asfáltica.

Las reparaciones de este tipo de daño pueden variar desde el bacheo y construcción de carpetas hasta la simple aplicación de riegos de sello, con o sin agregados, dependiendo de la magnitud del daño. En el cuerpo de esta presentación se analizarán otros procedimientos que han demostrado gran efectividad para reparar este tipo de daño.

#### 4. Superficies Lisas

La superficie resbalosa es uno de los problemas más serios en pavimentos en lo que concierne a la pérdida de vidas e inmuebles en carreteras, debido a accidentes.

Este daño puede deberse en carpetas a:

- Pulizamiento de los agregados
- Llorado del asfalto
- Desprendimiento de los agregados
- Mal drenaje superficial

Resulta un tanto obvia la manera de evitar este tipo de fallas, pues la solución está simplemente en: realizar un diseño correcto, cuidar el proceso de construcción y emplear agregados duros y afines al asfalto.

La reparación que generalmente se recomienda consiste en:

- Aplicar arena caliente en pavimentos "llorados"
- Ranurar la carpeta
- Construir una sobrecarpeta empleando agregados duros y con suficiente asfalto para que no se presente su oxidación, ni se desprenda el agregado, pero en tal cantidad que no sea susceptible de sufrir el efecto conocido como llorado.

Posteriormente se verá el proceso de rebajado de la carpeta, el cual ha demostrado ser uno de los mejores y más - - efectivos medios de evitar el derrapamiento.

Cabe finalmente indicar que en esta breve introducción solamente se mencionan algunas ideas muy generales y que cada tipo de daño necesita ser concienzudamente analizado para poder aplicar las correcciones adecuadas.

### III. REVITALIZACION DE PAVIMENTOS ASFALTICOS

#### 1. Introducción

El rejuvenecimiento de pavimentos asfálticos mediante algunos agentes químicos es un método que día a día se va imponiendo en razón de lo práctico que resulta su aplicación - así como su relativo bajo costo. Entre los agentes más comunes se encuentre el que ha sido designado como "Reclamante" que es una emulsión especial patentada, color rosa, -- constituida por maltenos (aceites de petróleo y resinas) - en agua. Puede considerársele como una emulsión catiónica sin asfaltenos o hidrocarburos no solubles en tetracloruro de carbono. Este producto penetra en las mezclas asfálticas viejas transformándose en parte del ligante, revitalizándolas. Puede decirse que sus funciones son:

- Devolver su plasticidad al asfalto envejecido y endurecido
- Restaurar los componentes perdidos en el asfalto.
- Mejorar la cohesión de la mezcla y la adherencia del asfalto con el agregado

Entre las propiedades que se le han determinado al producto referido pueden citarse las siguientes:

|                                |                |
|--------------------------------|----------------|
| Viscosidad Saybolt-Furol ..... | 15 a 40 seg    |
| Residuo .....                  | 60 a 65 % mín. |
| Miscibilidad .....             | No coágulos    |
| Carga .....                    | Positiva       |
| Asfaltenos .....               | 0.75 máx.      |

Debe tenerse muy presente que los efectos anteriormente referidos, ocurren por regla general en los 20 o 25 mm superiores de una carpeta que es "la parte de la carpeta que -- más se oxida y envejece."

## 2. Procedimiento de Construcción

Son varios los procedimientos empleados para la aplicación de agentes rejuvenecedores y varían desde su simple rociado en mezclas en caliente recién tendidas, cuyo objeto es restituir componentes perdidos debido al calentamiento, -- hasta su empleo como parte del procedimiento de sobre en--carpetado.

El método más comunmente empleado es el que se describe a continuación:

- a) En primer lugar se debe determinar la dosificación que se debe emplear en la carpeta, la cual generalmente está comprendida entre 0.45 a 0.90 litros por metro cua--drado de una solución preparada con una parte de recla--mite en 2 de agua. Para determinar la dosificación co--rrecta, se ha acudido a relacionar ésta con el porcenta--je de vacíos llenos de aire o la permeabilidad que ten--ga la mezcla asfáltica. En otras ocasiones se ha acudi--do a efectuar, en el laboratorio, pruebas de penetra--ción en el residuo obtenido de especímenes con agente --rejuvenecedor y sin él, empleando desde luego diferen--tes porcentajes de éste y seleccionando como contenido más adecuado aquel que provoque en el residuo la pene--tración deseada, siempre y cuando la permeabilidad de --la carpeta permita su aplicación. El procedimiento que ha resultado más práctico y en consecuencia el más - --

usual, consiste en utilizar aquella dosificación que penetra totalmente en 15 ó 20 minutos en la carpeta y en la zona de las rodadas, que es en donde el pavimento se encuentra más denso. Generalmente la solución a aplicar se forma diluyendo una parte agente rejuvenecedor en 2 de agua, pero se sabe de casos en donde la relación citada ha sido 1:1 o hasta 1:4 en casos muy especiales. - Los fabricantes de estos productos aseguran que se puede emplear hasta agua de mar para obtener la solución de trabajo.

- b) Una vez definida la dosificación del agente, se debe -- proceder a la limpieza del pavimento a reparar, el cual deberá haber sido bacheado previamente.
  
- c) Inseguida se procede al calentamiento de la superficie del pavimento. Para ello se aplica sobre ésta, una especie de horno, una de cuyas paredes es la carpeta. El calor se aplica mediante quemadores de gas, aunque se sabe de la aplicación de rayos infrarrojos; se vigila que las llamas no sean aplicadas directamente a la mezcla - asfáltica; la temperatura que debe alcanzar la mezcla - asfáltica debe estar comprendida entre  $110^{\circ}$  C y  $125^{\circ}$  C - en 25 mm. de espesor, para ésto, generalmente el avance del equipo de calentamiento es del orden de 1.5 a 15 metros por minuto, dependiendo esta velocidad, obviamente, de la dureza y contenido de asfalto en la mezcla, así - como de la temperatura ambiente. A veces pudiera resultar más efectivo el empleo de dos calentadores para alcanzar la temperatura deseada sobre todo en climas - - fríos.
  
- d) La siguiente etapa en el método clásico, consiste en el

escarificado de la superficie calentada mediante líneas de pernos montadas en el mismo equipo de calentamiento con el objeto de aprovechar su peso. Estos pernos ó uñas se encuentran en forma traslapada para lograr un escarificado más efectivo y su montaje permite que, al encontrar dichos dispositivos un objeto duro, se produzca una especie de muelleo o resorteo que permite que se salve el obstáculo. Todo el sistema de escarificado está controlado por gatos hidráulicos. La profundidad de escarificado efectiva es del orden de 12 a 19 mms y depende de la temperatura del asfalto, su dureza, así como de la configuración de las uñas y la presión aplicada sobre éstas.

- e) La siguiente operación consiste en restituir, en el pavimento escarificado, la geometría original mediante gu sanos distribuidores o algún otro equipo que realice esta operación con eficiencia y de ser posible a bajo costo.
- f) A continuación se aplica una ligera compactación con un rodillo tandem de acero de 8 a 10 toneladas y a toda rueda con el objeto de permitir el tránsito sobre la superficie recientemente escarificada. Esta operación puede juzgarse como no necesaria si el programa de la obra considera más conveniente la aplicación de una sobrecarpeta directamente sobre la superficie recién escarificada.
- g) Se aplica el riego del agente rejuvenecedor en la proporción adecuada empleando para ello una petrolizadora tradicional. Durante el período de absorción y si la su

perficie ha sido compactada, es recomendable rociar arena muy dura y angulosa, la cual proporciona una fricción aceptable y no interfiere con el proceso de absorción, sin embargo, no debe permitirse el tránsito antes de que transcurran 30 minutos a partir de la aplicación del agente. Con toda seguridad, al otro día la arena ha sido removida o asimilada por la carpeta lo cual no es nocivo.

h) La etapa final puede presentar variaciones, pudiendo éstas consistir en:

- Dejar a la superficie únicamente con el tratamiento del agente rejuvenecedor, compactando el espesor tratado. Esto se hace si estructuralmente no se requiere refuerzo y la superficie de rodamiento obtenida es adecuada.
- Aplicar un riego de asfalto rebajado a la superficie, cuando no se requiere refuerzo estructural, si existe insuficiencia de éste en la carpeta original.
- Construcción de un riego de sello; en cuya compactación se completa la del material subyacente.
- Construcción de una sobrecarpeta de concreto asfáltico cuando se requiera refuerzo estructural.

Finalmente, conviene decir que para evitar fracasos en este procedimiento es necesario que se fijen y respeten especificaciones en cuanto a:

- La preparación del pavimento a reparar como lo es la limpieza, señalización de obras de toma, bocas de tor

menta, bacheo preliminar, etc.

- La temperatura mínima y forma de medirla.
- La profundidad que se deberá alcanzar en el escarificado y forma de medirla.
- El tipo y dosificación de agente rejuvenecedor.
- Tipo de sobrecarpeta y materiales a emplear.
- Formas de medición y pago.

### 3. Aplicabilidad

En la Tabla III.7, se sintetiza la aplicabilidad de este sistema, pudiéndose citar entre las ventajas inherentes al método, las siguientes:

- Asegura una mejor liga entre una carpeta antigua y la sobrecarpeta.
- Se rejuvenecen de 12 a 19 mm de carpeta antigua. Esto ha hecho que el fabricante proclame que se gana aproximadamente 1" de espesor adicional.
- Se eliminan las fisuras y aún las grietas considerables o, cuando menos, se incrementa notablemente el período de su reflejo en la nueva sobrecarpeta.
- Se evitan o reducen los desprendimientos por bajo contenido de asfalto, ya sea porque el agregado es muy absorbente o porque originalmente se empleó una dosificación baja de asfalto.

- Se logran pesos volumétricos más altos - -- cuando las bajas temperaturas en la mezcla lo impiden.

No obstante lo anterior, la prudencia aconseja que también se tomen en cuenta las limitaciones que estos procedimientos tienen, ya que, porque no decirlo, este sistema no es una panacea que resuelva todos los problemas de mantenimiento de pavimentos pues existen limitaciones de las cuales las más importantes son las siguientes:

- No se debe aplicar este sistema si la superficie a tratar contiene solventes, combustibles, grasas o aceites.
- Estos métodos no se deben aplicar en carpetas con exceso de asfalto o inestabilidad.
- Si la textura de la carpeta es muy cerrada, el agente rejuvenecedor no penetrará. Se ha fijado que no se empleen estos procedimientos si en 15 minutos no penetran 220 c.c. - Tampoco se deben usar si la mezcla tiene menos de 5% de vacíos llenos de aire.
- Si existe una falla estructural, la sola aplicación del agente y una delgada sobrecarpeta puede no resolver el problema, tal es el caso de fallas por drenaje, fatiga, tránsito muy pesado, etc., en cuyo caso la solución es muy distinta.

## USOS DEL RECLAMITE EN PAVIMENTOS ASFALTICOS

| METODO  | FUNCION  | TIEMPO DE APLICACION  |
|---|--|---|
| Calentamiento y Escarificado.                       | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Rejuvenecer el asfalto</li> <li>2. Mejor liga con la sobrecarpeta</li> <li>3. Aumentar la durabilidad</li> </ol>   | Inmediatamente después del -<br>escarificado.                         |
| Riegos de Sello                                     | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sello profundo</li> <li>2. Restituir propiedades al asfalto</li> <li>3. Aumentar la durabilidad</li> </ol>   | Tan pronto como sea práctico  |
| Mantenimiento Preventivo                            | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Rejuvenecer asfalto envejecido</li> <li>2. Evitar desprendimientos</li> <li>3. Reducir el agrietamiento por con-<br/>tracción.</li> <li>4. Evitar el descascaramiento en --<br/>grietas.</li> <li>5. Disminuir la permeabilidad</li> <li>6. Aumentar la durabilidad</li> </ol> | Cuando aparezcan los prime--<br>ros síntomas de envejecimien-<br>to.  |
| Revitalización de Mezclas                           | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Facilitar el escaerificado y mez-<br/>clado.</li> <li>2. Plastificar al asfalto</li> <li>3. Mejorar la durabilidad</li> </ol>  | Cuando se empieza a notar --<br>que la mezcla está intemper-<br>zada. |
| Planchado mediante el Calen-<br>tado de la Carpeta. | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sellar la superficie</li> <li>2. Restaurar las propiedades perdidas<br/>durante el calentamiento.</li> <li>3. Mejorar la durabilidad</li> </ol>  | Después del calentamiento   |
| Impregnación  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Rejuvenecer al asfalto original</li> <li>2. Mejorar la liga entre el pavimen-<br/>to original y la sobrecarpeta.</li> </ol>  | Dos semanas antes del riego<br>de liga.                               |

- En el caso de que se tengan en el pavimento original problemas de agregados friables, bajo valor de desgaste Los Angeles, partículas no equidimensionales, etc., la aplicación del agente no tiene nada que hacer.
- No se debe tampoco utilizar en el caso de que existan riegos de sello recientes.
- La carpeta antigua debe tener por lo menos un espesor superior a los 7.5 cm o 5.0 cm si se trata de un concreto asfáltico sobre concreto hidráulico.

Ahora bien, pueden existir condiciones que hagan que se modifiquen los métodos tradicionales de construcción entre las que pueden citarse las siguientes:

- En donde haya poco tránsito y solamente se presenten fisuras en la carpeta, puede aplicarse el agente rejuvenecedor; después de 2 semanas pero antes de 2 meses, aplicar un rodillo neumático.
- En pavimentos con fisuras de contracción se recomienda calentar, aplicar el agente, compactar y colocar arena.
- En pavimentos nuevos elaborados con mezclas asfálticas densas, en caliente, se puede aplicar el agente con el objeto de restituir los componentes perdidos o alterados durante el calentamiento.

- En pavimentos seriamente dañados, podría aplicarse el agente revitalizador, escurificarse con arados de disco, remover el material, adicionar agregado, asfalto y más agente según se juzgue conveniente para lograr una buena mezcla que posteriormente se tiende y compacta.
- En el sellado de grandes grietas se ha llegado a aplicar el agente rejuvenecedor, sin diluir, en la grieta y un poco de arena en la superficie. Lo anterior según se reporta en la literatura, ha dado buenos resultados.

La literatura existente reporta que no es raro que aplicando los procedimientos anteriores se duplique la vida de una carpeta o pavimento.

Debe tenerse presente que algunas veces existen riegos de sello antiguos sobre una carpeta lógicamente más antigua o aún de la misma edad que el sello, cosa muy común en nuestro medio. En este caso, al aplicar el calor puede formarse un colchón de disipación de temperatura entre ambas capas, lo que puede hacer necesario pasar hasta dos veces más con el equipo para lograr una buena escurificación.

Es muy importante no tratar de escurificar más allá de lo que el gradiente de temperatura lo permita para no destruir las capas inferiores, en cuyo caso podría requerirse una reparación difícil y costosa. Asimismo es conveniente no aplicar estos sistemas en tiempo frío o con mucho viento.

Finalmente, es recomendable no confiar totalmente en pruebas de laboratorio, sino que se deben complementar con observaciones de campo y es conveniente que las operaciones se realicen en tiempo caluroso y seco.

#### 4. Ejemplos de Aplicación

A la fecha son muy numerosos los casos reportados en Estados Unidos de Norteamérica respecto a la aplicación exitosa de agentes rejuvenecedores. En el presente trabajo se ha considerado citar solamente algunos como ejemplo:

- a) En Abilene, Texas, era costumbre rehabilitar los pavimentos cada 5 años; con el empleo de agentes rejuvenecedores dicho lapso se ha incrementado a 8 años. Además se terminó con el problema de desprendimientos que antes era cosa común.
- b) En la misma ciudad de Abilene se reporta otro caso, referente a que antes siempre había que colocar un riego de sello a los pavimentos asfálticos nuevos, pues de no hacerlo así, se oxidaban en un año, lo que se traducía en fragilidad, desprendimientos y grietas. Este problema se resolvió a un costo de 0.06 dólares por  $M^2$  y de (0.6  $\$/M^2$ ) en aquellos casos en que se empleó gravilla por problemas de derrapamiento.
- c) En la ciudad de Westminster, California, se seleccionaron algunas avenidas que en 1967 requerían una sobrecarga de concreto asfáltico, se probó el sistema de revitalización con Reclamite y a los 3 meses siguientes se sacaron las siguientes conclusiones:

- Las superficies tratadas se presentaban más densas y oscuras.
- En los bordes de las zonas bacheadas no se presentaron ni grietas ni desprendimientos.
- Se aplicó arena después del tratamiento y ésta se incorporó a la carpeta.
- Se aumentó la impermeabilidad
- El costo fue sumamente bajo
- El procedimiento fue muy práctico y no se ocasionaron molestias a los residentes de las zonas afectadas.

Posteriormente en 1974 se concluyó:

- No se presentaron grietas, fisuras, ni desprendimientos.
  - Las zonas bacheadas se integraron al resto del pavimento.
  - La textura es muy impermeable
  - El costo en 1967 fue de 0.033 dólares/m<sup>2</sup>
- d) Existe un informe en donde se menciona que se aplicó Reclamite a 50°C sobre una superficie que se encontraba prácticamente a 0°C y con nieve a los lados del camino.
- e) En Finnetonka, Arizona, se llevó a cabo uno de los experimentos más sobresalientes para analizar diferentes procedimientos para evitar el reflejo de grietas. Esta

zona se encuentra a 1,500 mts sobre el nivel del mar -- aproximadamente, es una zona desértica y con un tránsito de 10,000 vehículos diarios. El problema de los caminos en esa zona es el agrietamiento de las carpetas por contracción, su envejecimiento y algunos desprendimientos y canalizaciones. Los valores promedio de éstas últimas fueron del orden de 13 mm. Las deflexiones medidas con viga Benkelman fueron en promedio de 0.035", valor que se antoja relativamente bajo. No existían fallas estructurales.

En un experimento muy bien programado se investigaron 13 diferentes procedimientos para evitar el reflejo de grietas, encontrando en 3.5 años los resultados ilustrados en la Tabla III.2. En dicha tabla se puede observar que los primeros cinco lugares los ocuparon el escarificado en caliente y la posterior adición de agentes rejuvenecedores, o bien el empleo de asfaltos ahulados, de membranas de fibra de vidrio y también el uso de los cementos asfálticos blandos en la carpeta; sin embargo, la membrana de fibra de vidrio resultó muy costosa, al igual que el empleo de los asfaltos ahulados, lo que favoreció a los otros 3 procedimientos.

f) En la ciudad de Chihuahua, Chih., el municipio decidió en 1977 rehabilitar todos los pavimentos de la ciudad, lo que significaba una erogación de \$300'000,000.00 --- (TRESCIENTOS MILLONES DE PESOS 00/100). La SAHCP llevó a cabo la evaluación de los pavimentos, habiéndose encontrado que los principales tipos de fallas se debían al envejecimiento del asfalto (se tenían pavimentos hasta con 30 años de edad), agrietamientos por contracción

TABLA III.2

Tratamiento Adicional a una Sobrecarpeta de 3 cm de C.A. y Riego de Sello. Porcentaje de grietas reflejadas en 3.5 años.

| Tratamiento Adicional a una Sobrecarpeta de 3 cm de C.A. y Riego de Sello.     | Porcentaje de grietas reflejadas en 3.5 años. |
|--|---|
| 1. Escarificación en caliente y Petroset.....                                  | 3   |
| 2. Asfalto ahulado bajo el riego de sello .....                                | 4   |
| 3. Fibra de vidrio .....   | 5   |
| 4. Escarificado en caliente y Reclamite .....                                  | 6   |
| 5. Cemento asfáltico blando .....  | 8   |
| 6. Petromat .....  | 12  |
| 7. Petroset en las grietas .....   | 12  |
| 8. Asbesto .....   | 13  |
| 9. Asfalto de 120/150 grados de P.....   | 14  |
| 10. Concreto de emulsión .....   | 14  |
| 11. Riego de Reclamite .....   | 15  |
| 12. Riego de Petroset .....  | 16  |
| 13. Sección de control .....   | 17  |
| 14. Reclamite en las grietas .....   | 20  |
| 15. Cemento asfáltico duro .....   | 20  |
| 16. 5 cm de concreto asfáltico sin riego de sello, con asfaltos ahulados ..... | 19  |
| 17. 5 cm de concreto asfáltico, sin riego de sello .....                       | 64  |

y esporádicamente fallas de estabilidad y estructural. Se presentaban algunas grietas con aberturas hasta de 15 cm y en forma de "labios". Se diseñaron varias secciones dependiendo del tránsito esperado, deflexión medida tanto con viga Benkelman como con Dynaflect, estado actual del pavimento y capacidad estructural del mismo determinada con base en un intenso muestreo. Uno de los procedimientos contemplados en el proyecto lo constituyó la revitalización de las carpétas y fue éste el método que se aplicó en primer lugar para aquellas calles y avenidas en que fue recomendado. Dado lo práctico y cómodo del procedimiento, así como el buen comportamiento y aspecto que presentaron los pavimentos recién rehabilitados en los primeros meses, el Municipio decidió aplicar este método en pavimentos que por necesidades de tránsito necesitaban un refuerzo considerable y parece que los resultados son a la fecha halagadores.

Es pues por razones como éstas que en nuestro medio van ganando adeptos día a día los sistemas de revitalización de pavimentos y en la actualidad ya se están aplicando en forma intensiva en el Distrito Federal.

#### IV. SISTEMA DE REBAJADO DE PAVIMENTOS

##### 1. Introducción

El sistema de rebajado de pavimentos mediante equipos abrasivos y que ha sido también llamado "planchado en frío" es un método que permite reperrillar la superficie de los pavimentos. Rápidamente se logra una buena superficie de roda-

miento minimizando las interrupciones u obstáculos al tránsito. En este método se emplean unos cilindros de acero giratorios parecidos a los rodillos pata de cabra; se hace girar al cilindro montado en su sistema de transporte móvil y se produce un efecto fuertemente abrasivo sobre la superficie atacada. El costo principal en este método lo constituye el desgaste de las uñas o dientes abrasivos, pero el rápido avance que se logra con este método hace que resulte económicamente competitivo contra los métodos tradicionales, los cuales han consistido en el bacheo, la construcción de sobrecarpetas de refuerzo tanto para pavimentos asfálticos como de concreto hidráulico, lo cual redundaba en que se eleve la rasante y frecuentemente en que los daños de la superficie original se reflejen en la nueva sobrecarpeta.

El perfilado mediante rebajado, el sistema de rejuvenecimiento ya visto y aún el reciclado en planta, constituyen métodos de reparación de pavimentos que se presume se impondrán en un futuro cercano, pues en la actualidad ya son numerosos los casos en que los gálibos de los puentes resultan inadecuados por las frecuentes sobrecarpetas.

Es muy común el caso de que se coloquen sobrecarpetas debido a que la superficie actual de rodamiento o es funcionalmente inadecuada (superficie lisa, deformada, etc.) o bien, presenta características que hagan temer que en un futuro próximo se dañe seriamente el pavimento, sin que se requiera refuerzo estructural.

En tales casos, resulta frecuentemente ventajoso remover la parte dañada, reciclarla y volverla a tender, o bien, -

ligar la superficie descubierta con una nueva carpeta, o inclusive dejar la superficie tal y como quedó después de aplicar la abrasión.

El empleo de los equipos para el rebajado presenta pues las siguientes ventajas generales sobre los métodos tradicionales de reparación de pavimentos:

- Se eleva menos la rasante, factor muy importante sobre todo cuando no existen fallas de tipo estructural.
- La textura que queda después de pasar el equipo es muy antiderrapante, por lo que en algunos casos puede dejarse descubierta a ésta con el acabado que queda después del rebajado.
- Se logra una mejor liga con la nueva capa de refuerzo.

## 2. Método de Construcción

Podría definirse brevemente que el procedimiento de construcción con este equipo consiste simplemente, según se mencionó, en el recorte, en frío, de un cierto espesor de la capa superficial de un pavimento, mediante la rotación de un cilindro armado de dientes de carburo de tungsteno.

A diferencia de la máquina que efectúa el rebajado general, existe una más pequeña y de alta maniobrabilidad para el trabajo de detalle, como podría ser la remoción previa

de zonas locales muy inestables, remover grietas alabeadas, efectuar el recorte cerca de los pozos de visita o de otro tipo de estructuras.

En el pasado, se acostumbraba también efectuar la remoción de parte del espesor de una carpeta mediante el "planchado en caliente", pero se ha abandonado este método por tener la desventaja de que se envejece más al asfalto; además de presentar un avance muy lento, poca penetración, alto consumo de energéticos y serios problemas para el control de la profundidad de penetración. En este caso se tiene todavía una desventaja más y es que la mezcla removida tiene que ser deshechada o recalentada para su aprovechamiento; lo cual no sucede con el empleo de las rebajadoras en frío que producen al agregado prácticamente triturado, factor éste que debe ser atentamente vigilado, pues claramente se comprende que la granulometría puede cambiar radicalmente, en comparación con la que se tenía in-situ; esto último - si se desea reciclar a la mezcla removida.

### 3. Aplicabilidad

Existían dos motivos por los que no se había logrado imponer el sistema de reciclado, uno era su alto costo y el otro la baja producción, aunado esto a problemas de contaminación ambiental debido al humo y gases producidos en las plantas recicladoras. Por otro lado como ya se dijo, el sistema de calentado de la carpeta para su remoción no resultaba funcional por su baja penetración. Sin embargo, con el advenimiento del rebajado de las carpetas en "frío" se obtiene alta efectividad en la remoción de la carpeta - cuando se trata de reciclarla, con la ventaja adicional de

que el material obtenido ya está prácticamente triturado y los costos resultan competitivos contra otros sistemas.

Podrían citarse entre las ventajas obtenidas con este método las siguientes:

- Se reducen los costos ya que se emplea menos material para sobreencarpetar.
- Se obtiene una liga mucho mejor con la sobrecarpeta, si es necesaria su colocación.  
  
La superficie, uniformemente aserrada o estriada, que se obtiene, proporciona un magnífico anclaje por lo que se evitan las fallas de corrimientos en la sobrecarpeta.
- Se incrementa notablemente la vida de la sobrecarpeta colocada sobre el pavimento rebajado, debido a que el espesor de mezcla asfáltica adicional es uniforme, es decir que no se coloca sobre una superficie deformada o agrietada, defectos éstos que en un período razonable pueden reflejarse en la nueva sobrecarpeta.
- El peso volumétrico de la nueva sobrecarpeta es uniforme al quedar debidamente compactado sobre una superficie también uniforme.

Entre las principales aplicaciones de la máquina rebajadora podrían citarse las siguientes:

- Kenivelar la superficie de rodamiento en -- aquellos casos en que existan imperfeccio-- nes de acabado.
- Proporcionar una buena liga con las sobre-- carpetas.
- En pavimentos rígidos o flexibles cuya su-- perficie de rodamiento se haya alisado, la máquina rebajadora produce una muy buena -- textura resistente al derrapamiento.
- Para remover superficies inestables, dañã-- das, o con malas características de roda-- miento.
- Para reciclar a las carpetas

Las dos primeras aplicaciones son en realidad las más usua-- les.

Debe tenerse muy presente que cualquiera que sea el proce-- dimiento empleado en el rebajado de una superficie de roa-- miento, la granulometría resulta afectada así como el con-- tenido de asfalto con respecto al estado original de la -- mezcla, lo que obliga, en los sistemas de reciclado, a rea-- lizar previamente un minucioso análisis de estos aspectos.

#### 4. Ejemplos de Aplicación

Son muy numerosos los ejemplos que podrían citarse en lo -- que respecta al procedimiento objeto de esta cláusula y en

vías de ilustración, se mencionarán los siguientes:

- a) En Inglaterra se habla de velocidades de avance de la rebajadora hasta de 1000 M<sup>2</sup>/hora; se han llegado a remover espesores hasta de 90 mm y si solamente se trata de proporcionar una textura antiderrapante se han logrado avances hasta de 1800 M<sup>2</sup>/hora.
- b) En Kentucky se presentó un caso de pavimento liso y canalizaciones en las rodadas, el costo del sólo renivelado fue considerado del orden de \$420,000 DOLARES. Empleando una rebajadora "Rotomill" y con 1 1/2" de rebajado se logró una buena superficie de rodamiento y a un costo menor del 50 % del anteriormente mencionado.
- c) En Texas se tenía un pavimento rígido muy liso, se colocó una sobrecarpeta de 3 cm la cual se alisó en tres años y además empezó a desprenderse. Empleando una rebajadora la removieron toda y dejaron una muy buena textura en la superficie del pavimento. El avance fue de diez a doce metros por minuto.
- d) En North Dakota se presentó un pavimento muy liso y con canalizaciones en las rodadas. La colocación de una sobrecarpeta de 38 mm tenía un costo de \$834,000 DOLARES. Aplicando la sobrecarpeta se iba a presentar adicionalmente el problema de un fuerte escalonamiento hasta de 12.5 cm en los acotamientos.

Una máquina rebajadora "Rotomill" removió 38 mm de material depositándolo en los acotamientos a un costo de casi una tercera parte del ya referido y proporcionando una buena textura.

Como anotación importante cabe mencionar que en los casos referidos no se tenían problemas estructurales.

## V. RECICLADO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Debido a la cada vez más crítica escasez de materiales para carpeta, así como de energéticos; el reciclado de los pavimentos asfálticos ha resultado ser un método muy útil en la actualidad, ya sea realizado éste en plantas móviles o fijas. Este método consiste en escarificar a la carpeta y trasladarla a la planta en donde se lleva a cabo el reciclado. La escarificación con sistemas tradicionales tiene la desventaja de que se puede dañar a la base, lo cual a toda luz es un inconveniente, además de los problemas que se causan al tránsito al realizar este tipo de trabajo, que de por sí es costoso. Una buena solución para la remoción de la carpeta es el empleo de las máquinas rebajadoras de las que ya se habló.

En las plantas de reciclado se ha observado que a mayor producción se tiene mayor contaminación. Sin embargo, a la fecha, ya se han desarrollado plantas y técnicas en las que se cuida mucho el aspecto del calentamiento del asfalto de la mezcla antigua, de tal manera que las llamas no lo toquen y por otra parte, se han instalado dispositivos que eliminan en gran parte el problema de la contaminación.

Entre los factores que se deben tomar en cuenta para estudiar la aplicabilidad del reciclado de carpetas pueden enumerarse los siguientes:

- Estado del pavimento actual
- Efectos de la sobrecarpeta en la resante
- Costos de agregado adicional, asfalto adicional, remoción, etc.

Cabe mencionar que el empleo de la mezcla en el reciclado, sin adición de agentes, agregados y/o asfalto, ha dado malos resultados.

Entre los datos necesarios para el diseño de una mezcla reciclada se necesita contar con la siguiente información:

- Espesor de la carpeta actual
- Espesor necesario de la nueva carpeta
- Costo total del material recuperado
- Costo del material adicional
- Granulometría del material original, producido por el rebajado y modificado por el transporte y elaboración de la mezcla.
- Contenido y dureza del asfalto a reciclar
- Especificaciones

Como un dato estadístico cabe mencionar que la aplicación de mezclas recicladas ha variado en la siguiente forma en los Estados Unidos de Norteamérica.

|            |                     |
|------------|---------------------|
| 1975 ..... | 50,000 TONELADAS    |
| 1976 ..... | 100,000 TONELADAS   |
| 1977 ..... | 500,000 TONELADAS   |
| 1978 ..... | 2'000,000 TONELADAS |

Y se preveen 40'000,000 Toneladas para 1980.



DIRECTORIO DE ASISTENTES AL CURSO: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE  
PAVIMENTOS, DEL 9 AL 14 DE JULIO DE 1979.

NOMBRE Y DIRECCION

EMPRESA Y DIRECCION

1. ING. SALVADOR ACEVEDO MARQUEZ  
Villa del Carbón 10, Zona Cambria  
Cd. Cuautitlán Izcallí  
Edo. de México  
E.N.E.P. ACATLAN  
San Juan Totoltepec y Av. Alcanfores  
Santa Cruz Acatlán  
Naucalpan de Juárez, Edo. de Méx.  
Tel. 3-73-22-92 y 373-23-92
2. FRANCISCO J. ALMEIDA VALDEZ  
Belén 970  
Col. Del Valle  
México 12, D. F.  
Tel. 575-63-25  
S.A.H.O.P.
3. JOSE LUIS ARRIAGA M.  
Calle 26 # 22  
Col. Santa Rosa  
México 14, D. F.  
INGENIEROS CIVILES ASOCIADOS, S.A.  
Terán 1  
Tuxtla Gutiérrez, Chis.
4. LUCIO BALDERAS GUZMAN  
D # 59  
Col. Modelo  
Edo. de México  
Tel. 373-09-60  
FONDO DE LA VIVIENDA ISSSTE  
Balderas 58  
México 1, D. F.  
Tel. 585-56-88
5. GABRIEL BAÑOS CLAVEL  
Rancho Piedras Negras 142  
Sta. Cecilia Coapa  
México 22, D. F.  
Tel. 594-78-06  
CONSTRUCCIONES , CONDUCCIONES Y  
PAVIMENTOS, S.A. GRUPO ICA  
Minería 145  
Col. Escandón  
México 18, D. F.  
Tel. 516-04-60
6. PEDRO PABLO CASTELLANOS H.  
Reforma 616 Nte. 1606  
Tlatelolco  
México 3, D. F.  
Tel. 529-90-80

DIRECTORIO DE ASISTENTES AL CURSO: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE  
PAVIMENTOS, DEL 9 AL 14 DE JULIO DE 1979.

| <u>NOMBRE Y DIRECCION</u>  | <u>EMPRESA Y DIRECCION</u>   |
|--|--|
| 7. ALFONSO DIAZ BUSTOS<br>Decorado 172<br>Col. 20 de Noviembre<br>México 2, D. F.<br>Tel. 789-95-80                | INPONAVIT<br>Barranca del Muerto 280<br>Col. Florida<br>México 21, D. F.<br>Tel. 581-71-61                               |
| 8. CARLOS FLORES GRAJEDA<br>Av. 45 Mts. # 663<br>Col. Lindavista<br>México 14, D. F.<br>Tel. 585-21-27             | CONSTRUCTORA TATSA<br>Sinaloa 85<br>Col. Roma<br>México 7, D. F.<br>Tel. 525-75-00                                       |
| 9. ANTONIO FLORES VALDEZ<br>Av. México 15<br>Cuajimalpa<br>México 18, D. F.<br>Tel. 20772                          | DELEGACION DE CUAJIMALPA DE MORELOS<br>Av. Juárez Esq. Av. México<br>Cuajimalpa<br>México 18, D. F.<br>Tel. 20079 (LADA) |
| 10. GABRIEL GARCIA ALTAMIRANO  | UNION DE PROFESORES DE LA FACULTAD<br>DE INGENIERIA  |
| 11. MARIO GARZA V.<br>N. York y Río de Janeiro<br>Col. Guadalupe<br>Monclova, Coah.<br>Tel. 3-40-30                | CONSTRUCTORA GARZA VILLARREAL, S.A.<br>I. Fuentes 308<br>Monclova, Coah.<br>Tel. 3-40-30                                 |
| 12. ANTONIO GARCIA SOTO<br>2a. Poniente M. A. Lote 12<br>Col. Isidro Favela<br>Tlalpan 22, D. F.<br>Tel. 573-51-61 | S.A.H.O.P.<br>Xola y Universidad   |

DIRECTORIO DE ASISTENTES AL CURSO: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE  
PAVIMENTOS, DEL 9 AL 14 DE JULIO DE 1979.

NOMBRE Y DIRECCION

EMPRESA Y DIRECCION

13. LUIS ERNESTO GASTELUM CELAYA  
Plateros 110 Edif. 75 Dpto. 1502  
Col. San José Insurgentes  
México 19, D. F.  
Tel. 546-43-66
- S.A.R.H.  
Lomas de Chapultepec.  
Tecamachalco  
Tel. 520-58-50
14. SERGIO GONZALEZ ARIAS  
Av. Tamaulipas 922  
Col. Petrolera  
Coatzacoalcos, Ver.  
Tel. 2-66-56
15. JULIAN GONZALEZ RUBIO  
Melchor Ocampo 59  
Col. Rodríguez Cano  
Tel. 4-20-70
- COCONAL, S.A.
16. HUMBERTO GUERRERO ROSADO  
Edif. 626- Ent. 2 Dpto. 11  
Lomas de Plateros  
Col. Mixcoac  
México 19, D. F.  
Tel. 593-32-11
- D.D.F.  
5 de Febrero y V. Villada  
Col. Villa Aragón  
México 14, D. F.
17. FELIPE HERNANDEZ S.  
Rincón del Molino 98  
Col. Bosques del Sur  
Xochimilco  
México 23, D. F.  
Tel. 549-32-70
- C.F.E.  
Av. Real de los Reyes 265  
Col. Coyoacán  
México 21, D. F.  
Tel. 549-32-70
18. ARTURO ENRIQUE IBARRA OLVERA  
Marqués de Aguayo 23  
Cd. Satélite, Edo. de Méx.  
Tel. 562-15-20
- COVITUR  
Av. Juárez 42 Edif. B  
Tel. 585-10-11

DIRECTORIO DE ASISTENTES AL CURSO: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE  
PAVIMENTOS, DEL 9 AL 14 DE JULIO DE 1979.

| <u>NOMBRE Y DIRECCION</u>  | <u>EMPRESA Y DIRECCION</u>   |
|--|--|
| 19. REGINO JIMENEZ GARCIA<br>Deportivo Internacional M-411 L-3863<br>Col. La presa, Edo. de Méx.<br>México 14, D. F. | PETROLEOS MEXICANOS<br>Domicilio Conocido, Refinería del<br>Pacífico<br>Salinas Cruz, Oax.                         |
| 20. BENJAMIN LANDEROS OLGUIN<br>Josefa Ortiz de Domínguez 605 Sur<br>Toluca, Méx.<br>Tel. 5-71-59                    | FAC. DE ING. DE LA U.A.E.M.<br>Unidad Coatepec, Ciudad Universitaria<br>Toluca, Méx.<br>Tel. 5-45-12               |
| 21. G. ANA MARIA LEGORRETA GARDUÑO<br>Pablo Sidar 604<br>Col. Universidad, Toluca<br>Tel. 589-57                     | S.A.H.O.P.<br>Convento Santo Domingo 42<br>Col. Sta. Mónica<br>Tlalnapantla, Méx.<br>Tel. 3-97-21-10               |
| 22. DANIEL S. LIRA CASTRO<br>Farallón 206<br>Col. J. del Pedregal<br>México 20, D. F.                                | DIR. GRAL. DE OBRAS MARITIMAS<br>Insurgentes Sur 465<br>Col. Roma Sur<br>México 7, D. F.<br>Tel- 564-51-01         |
| 23. ENRIQUE MADARIAGA O.<br>Pvda. Sta. Rita 3<br>Col. Sta. Rita<br>Chihuahua, Chih.<br>Tel. 2-65-22                  | CEMENTOS DE CHIHUAHUA, S.A.<br>6a. y Vicente Suárez s/n<br>Col. Nombre de Dios<br>Chihuahua, Chih.<br>Tel. 3-05-18 |
| 24. RAYMUNDO MARGAIN<br>Av. Argentina 540<br>Col. Retiro<br>Tuxtla Gutiérrez, Chis.<br>Tel. 2-24-99                  | INGENIEROS CIVILES ASOCIADOS<br>Minería 145<br>Col. Escandón<br>México, D. F.                                      |

DIRECTORIO DE ASISTENTES AL CURSO: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE  
PAVIMENTOS, DEL 9 AL 14 DE JULIO DE 1979.

NOMBRE Y DIRECCION

EMPRESA Y DIRECCION

- |  |   |
|--|---|
| 25. JOSE LUIS MARTINEZ VELASCO<br>Av. Universidad 2014 Edif. Venezuela<br>Col. Copilco<br>México 20, D. F.<br>Tel. 658-06-20 | FONDO DE LA VIVIENDA ISSSTE<br>Balderas 58<br>México 1, D. F.<br>Tel. 512-09-44                               |
| 26. ALFONSO MIER Z.<br>Real de los Reyes 77 Ciprés 4<br>Col. Coyoacán<br>México 21, D. F.<br>Tel. 544-21-23                  | C.F.E.<br>Real de los Reyes 265<br>Col. Coyoacán<br>México 21, D. F.<br>Tel. 549-32-70 Ext. 29                |
| 27. LEOVIGILDO PACHECO AVENDAÑO<br>C. Querétaro 23-A<br>Col. Tizapán Progreso<br>México 20, D. F.<br>Tel. 519-07-30          | S.A.H.O.P.<br>Xola y Universidad<br>Col. Narvarte<br>México 12, D. F.<br>Tel. 519-07-30                       |
| 28. JORGE I. PACHECO MARTINEZ<br>calle 67 No. 442-A<br>Mérida, Yuc.<br>Tel. 2-30-44  | FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL<br>Calle 14 X 41<br>Col. Industrial<br>Mérida, Yuc.<br>Tel. 2-30-44              |
| 29. MIGUEL ADALBERTO QUINTANA VEGA<br>Valle del Loira 63-4<br>Col. Valle de Aragón<br>Edo. de México<br>Tel. 577-71-97       | COVITUR<br>Avenida Juárez 42B 1º Piso<br>Col. Centro<br>México 1, D. F.<br>Tel. 585-10-11                     |
| 30. ALFONSO RUESTRA Y TISCAREÑO<br>Calle 619-151.<br>San Juan de Aragón<br>México 14, D. F.<br>Tel. 794-79-43                | AEROPUERTOS Y SERVICIOS AUXILIARES<br>Av. 602 s/n<br>San Juan de Aragón<br>México 14, D. F.<br>Tel. 762-79-44 |

DIRECTORIO DE ASISTENTES AL CURSO: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE  
PAVIMENTOS, DEL 9 AL 14 DE JULIO DE 1979.

NOMBRE Y DIRECCION

EMPRESA Y DIRECCION

31. GERARDO O. RODRIGUEZ MARTINEZ  
Reforma Norte 616-1606  
U. Tlatelolco  
México 3, D. F.  
Tel. 529-90-80
32. JOIGE ANTONIO ROJAS CARDOSO  
Circuito Tesoreros 75  
Col. T. Guerra, Tlalpan  
México 22, D. F.  
Tel. 573-48-95
33. ROMAN SERGIO SALINAS SANTOS  
Campo Atasta 47  
Col. San Antonio  
México 16, D. F.  
Tel. 561-48-34
34. DAVID TERAN OLGUIN  
Oriente 245 # 271-4  
Col. Agrícola Oriental  
México 9, D. F.  
Tel. 572-17-52
35. FRANCISCO TORRES CARRILLO  
Ricardo Castro 54-10° piso  
Col. Guadalupe Inn  
Mexico, D. F.  
Tel. 550-90-88
36. CARLO ALBERTO TORRES DIAZ  
Progreso 315  
Tehuacan Coah.
- FRACCIONAMIENTOS DEL NOROESTE, S.A.  
Obregón y Rosales, Edif. Clouthier  
Desp. 19  
Culiacán, Sin.  
Tel. 2-19-45
- E.T.A. CONSULTORES  
Angel Urraza 522  
Col. Del Valle  
México 12, D. F.  
Tel. 575-27-83
- INFONAVIT  
Barranca del Muerto 280  
Col. San Angelín  
México 20, D. F.  
Tel. 534-11-20
- OCASA  
Lorenzo Barcelata  
Col. San José Insurgentes  
Tel. 550-69-33
- ALTOS HORNOS DE MEXICO, S.A.  
Monclova, Coah.  
Tel. 3-85-27

DIRECTORIO DE ASISTENTES AL CURSO: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE  
PAVIMENTOS, DEL 9 AL 14 DE JULIO DE 1979.

NOMBRE Y DIRECCION

EMPRESA Y DIRECCION

- |   |  |
|---|--|
| 37. ALBERTO VALDEZ PINA<br>Arbol de las manitas 130<br>Col. Lomas Altas<br>Toluca, Edo. de México<br>Tel. 4-36-15 | JUNTA LOCAL DE CAMINOS, EDO. DE<br>MEXICO<br>Independencia 1329 Ota.<br>Toluca, Edo. de Méx.<br>Tel. 4-03-99   |
| 38. ALBERTO J. VARGAS TENORIO<br>Edif. 58 D-407<br>Col. Lomas de Sotelo<br>México 10, D. F.<br>Tel. 557-09-11     | INFONAVIT<br>Barranca del Muerto 280<br>San Angel<br>México, D. F.<br>Tel. 794-71-09                           |
| 39. MIGUEL ANGEL VAZQUEZ BERUMEN<br>Unión 37-4<br>Col. Escandón<br>México 18, D. F.<br>Tel. 520-27-58             | S.A.R.H.<br>Sierra Gorda 23<br>Lomas de Tecamachalco<br>México 10, D. F.<br>Tel. 540-09-43                     |
| 40. MARIO E. VEGA MERCADO<br>Sur 111 No. 406<br>Col. Churubusco<br>México 13, D. F.<br>Tel. 582-87-97             | D.D.F.<br>Av. México y Juárez<br>Col. Cuajimalpa<br>México 18, D. F.<br>Tel. 9158120079                        |
| 41. RAFAEL GUILLERMO VELAZQUEZ PONCE<br>Aguayo 55<br>Col. Del Carmen<br>Coyoacán, D. F.<br>México 21, D. F.       | D.D.F.<br>Centro de Tlalpan<br>Col. Tlalpan<br>Tel. 573-59-07  |
| 42. JESUS VILLANUEVA HERNANDEZ<br>Bagonia 116<br>Col. Club Jardín<br>Toluca, Edo. de Méx.<br>Tel. 598-68          | FAC. DE ING. U.A.E.M.<br>Cerro Coatepec<br>Cd. Universitaria<br>Toluca, Edo. de Méx.<br>Tel. 5-42-12 y 4-08-55 |

DIRECTORIO DE ASISTENTES AL CURSO: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE  
PAVIMENTOS, DEL 9 AL 14 DE JULIO DE 1979.

NOMBRE Y DIRECCION

EMPRESA Y DIRECCION

43. BERNARDO VILLEGAS ALVAREZ  
P. de la Reforma Nte. 616-1606  
U. Tlatelolco  
México 3, D. F.  
Tel. 529-90-80 Ext. 1606

44. JOSE VISOSO SEPTIEN  
Nicaragua 316  
Col. Arbide  
León, Gto.  
Tel. 362-12

CONCRETOS ASFALTICOS DEL BAJIO,  
S.A. DE C.V.  
Av. Chapultepec y Noriega  
León, Gto.  
Tel. 354-45 315-90