

01121  
89



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

## “ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL

PRESENTAN:

CONRADO MARTÍNEZ MARTÍNEZ  
JOSÉ ALFREDO TREJO PASTRANA



Autoriza a la Dirección General de  
UNAM a otorgar el título de  
contenido de la tesis  
NOMBRE: Conrado Martínez Martínez  
FECHA: 29 de Julio de 2003  
LUGAR: Huamantla



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
FING/DCTG/SEAC/UTIT/073/00

Señores

CONRADO MARTINEZ MARTINEZ  
JOSE ALFREDO TREJO PASTRANA  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. GUILLERMO L. ESQUIVEL CASTAÑEDA, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de

"ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RIGIDOS"

- I. PAVIMENTOS
- II. PAVIMENTOS FLEXIBLES
- III. PAVIMENTOS RIGIDOS
- IV. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RIGIDOS
- V. DISEÑO DE UN PAVIMENTO RIGIDO EN LA AUTOPISTA GUADALAJARA-TEPIC
- VI. CONCLUSIONES

Ruego a ustedes cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo les recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberán prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA Y HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universidad a 30 de julio de 2000.  
EL DIRECTOR

M. C. GERARDO FERRANDO BRAVO  
C. E. B. G. M. P. M. S. T. G.

b

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## AGRADECIMIENTOS

CONRADO MARTINEZ MARTINEZ

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- ☞ A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO Y EN PARTICULAR A LA FACULTAD DE INGENIERÍA PORQUE ME PERMITIÓ FORMARME PROFESIONALMENTE EN SUS INSTALACIONES.
- ☞ A MIS PROFESORES POR SUS CONOCIMIENTOS, ENSEÑANZA Y PACIENCIA.
- ☞ A MI DIRECTOR DE TESIS: ING. GUILLERMO L. ESQUIVEL CASTAÑEDA, POR SU APOYO Y COMPENSIÓN.
- ☞ A MIS PADRES Y HERMANOS POR EL APOYO QUE SIEMPRE ME BRINDARON.
- ☞ A MI ESPOSA POR EL APOYO QUE SIEMPRE ME HA BRINDADO Y POR ESTAR A MI LADO.
- ☞ A MI TÍO DOMINGO MARTINEZ POR SU APOYO DE SIEMPRE.
- ☞ A TODOS, GRACIAS.

d

## AGRADECIMIENTOS

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

JOSE ALFREDO TREJO PASTRANA

- ↳ A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO Y EN PARTICULAR A LA FACULTAD DE INGENIERÍA PORQUE ME PERMITIÓ ÉL HABERME FORMADO PROFESIONALMENTE EN SUS AULAS.
- ↳ A MIS PROFESORES Y MAESTROS POR SUS CONOCIMIENTOS TRANSMITIDOS PARA MI FORMACIÓN PROFESIONAL.
- ↳ A MI DIRECTOR DE TESIS: ING. GUILLERMO L. ESQUIVEL CASTAÑEDA, POR SU APOYO DECIDIDO EN LA CULMINACIÓN DE ESTE TRABAJO.
- ↳ A MIS PADRES: REMEDIOS Y RAUL POR SU APOYO INCONDICIONAL, PACIENCIA Y DEDICACIÓN.
- ↳ A MIS HERMANOS: RAUL, ALFONSO, EDUARDO, ISAÍAS Y AMALIA; POR SU APOYO DE SIEMPRE.
- ↳ A TODOS MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS QUE DE UNA U OTRA FORMA, PARTICIPARÓN EN LA CULMINACIÓN DE ESTE TRABAJO.

GRACIAS

e

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

INDICE

	PÁGINA
INTRODUCCIÓN	I
CAPITULO I. PAVIMENTOS	1
I.1 ¿QUÉ ES UN PAVIMENTO?	1
I.2 OBJETIVO EN LA CONSTRUCCIÓN DE UN PAVIMENTO	2
I.3 TIPOS DE PAVIMENTOS Y MATERIALES QUE LO FORMAN	3
I.3.1 TIPOS DE PAVIMENTOS	3
I.3.2 MATERIALES QUE LO FORMAN	5
I.4 VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL DISEÑO	6
CAPITULO II. PAVIMENTOS FLEXIBLES	7
II.1 MATERIALES QUE COMPONEN EL PAVIMENTO ASFÁLTICO	7
II.1.1 MATERIALES PÉTREOS	8
II.1.2 CEMENTO ASFÁLTICO	9
II.1.3 REBAJADOS ASFÁLTICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS	10
II.2 DISEÑO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE	11
II.2.1 VARIABLES DE DISEÑO	11
II.2.2 TRÁNSITO	12
II.2.3 SUELO	20
II.2.4 MEDIO AMBIENTE	22
II.3 PROCESO CONSTRUCTIVO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES	23
II.3.1 CONCRETO ASFÁLTICO	23
CAPITULO III. PAVIMENTOS RÍGIDOS	29
III.1 MATERIALES QUE COMPONEN EL PAVIMENTO HIDRÁULICO	29
III.1.1 CEMENTO PORTLAND	29
III.1.2 AGUA	29
III.1.3 AGREGADOS	30
III.2 DISEÑO DE UN PAVIMENTO RÍGIDO	35
III.2.1 VARIABLES DE DISEÑO	35
III.2.2 TRÁNSITO	49
III.2.3 SUELO	58

---

**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RIGIDOS.**

---

III.2.4	MEDIO AMBIENTE	65
III.2.5	CONCRETO SIMPLE	66
III.2.6	JUNTAS	72
III.3	PROCESO CONSTRUCTIVO DE PAVIMENTOS RIGIDOS	76
III.3.1	CONCRETO SIMPLE	76
III.3.2	A BASE DE JUNTAS	89
CAPITULO IV. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RIGIDOS		99
IV.1	ANÁLISIS DEL COSTO DE VIDA	100
IV.2	ANÁLISIS DE COSTOS	103
IV.3	FUNCIONALIDAD Y OPERACIÓN	104
IV.4	DISEÑO	105
IV.5	CONSTRUCCIÓN	106
IV.6	UTILIZACIÓN DE ENERGÍA	107
IV.7	SEGURIDAD	108
IV.8	MANTENIMIENTO	108
CAPITULO V. DISEÑO DEL PAVIMENTO RIGIDO EN LA AUTOPISTA GUADALAJARA - TEPIC		110
CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS		131
ANEXOS		134
BIBLIOGRAFÍA		160

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## INTRODUCCION

Por necesidad las primeras veredas fueron vías del tipo peatonal que las tribus nómadas formaban al transitar por las regiones en busca de alimentos, posteriormente cuando se hicieron grupos sedentarios los caminos peatonales tuvieron finalidades religiosas, comerciales y de conquista.

Con la invención de la rueda, apareció la carreta tirada por los hombres o por las bestias y fue necesario acondicionar los caminos para que el tránsito de esta fuera más rápido y de manera más cómoda. Cuando las vías peatonales se formaban sobre terrenos blandos o lodazales, se trataban de mejorar las condiciones de estas colocando piedras a lo largo de la vía para evitar resbalar o sumergirse en el lodo. Los caminos para las carretas se revestían de tal forma que las ruedas no se incrustaran en el terreno.

De esta forma se fue evolucionando de tal manera que se tuvo que uno de los factores que marcaron el desarrollo de un país lo constituyeran las vías de comunicación, las cuales no solo deben de conservarse sino también mejorar y aumentar en la medida de los requerimientos. Dentro de estas la red carretera constituye el elemento más importante del sistema, puesto que es por este medio que se transporta aproximadamente el 80% de la carga y casi el 100% del traslado de personas.

En el pasado en México, se le dio poca importancia a la conservación de la red carretera por cuestiones económicas, pero a partir de la concesión de caminos surge la necesidad de no solo construir apropiadamente, sino también la necesidad de dar el mantenimiento requerido para conservar dichos caminos en condiciones satisfactorias para la circulación de los mismos.

Durante los últimos años la construcción de carreteras ha tenido un auge importante, ya que se les ha dado gran impulso por parte de compañías privadas en las carreteras que fueron concesionadas, dando al país más kilómetros de carreteras que ayudaran a la comunicación y al impulso económico.

Desde el momento en que una carretera es abierta a la circulación se ve sometida a una serie de factores que modifican y deterioran sus características iniciales. Este deterioro comienza con la aplicación de las cargas de tráfico, que si bien se ha diseñado para soportarlas, constituyen el primer paso del desgaste de un camino. La propia alteración de los elementos que lo constituyen y hasta los deterioros deliberados de los usuarios hacen que su eficiencia para repartir las cargas, su resistencia y los parámetros estructurales disminuyan, dando origen a las deflexiones y baches.

Otro de los factores que afectan gravemente a las carreteras son los agentes atmosféricos, los cuales se encuentran presentes durante las 24 horas del día, independientemente de que exista o no tráfico.

Normalmente varios de los fallos enunciados aparecen juntos, conduciendo a una situación de deterioro progresivo que puede llegar a destruir totalmente el pavimento si no se recurre a un programa de conservación adecuado a fin de prolongar su viabilidad en condiciones aceptables para el tráfico.

La parte que más sufre deterioros en una carretera es la superficie de rodamiento por ser el elemento que se encuentra expuesto y mayormente afectado por todos los factores antes mencionados. Aunado a esto, en la construcción de dicha superficie se acostumbra el uso del concreto asfáltico, material flexible que presenta hasta cierto punto un comportamiento adecuado, pero que requiere de un costo de mantenimiento elevado el cual no se realiza adecuadamente por falta de recursos.

Una opción para reducir el costo de mantenimiento en una carretera; consiste en el uso del concreto hidráulico, en la superficie de rodamiento, en lugar del concreto asfáltico. Sin embargo, argumentando que el costo inicial del concreto hidráulico es mayor que el del concreto asfáltico; se decide destinar los recursos a la construcción de carreteras, utilizando éste (concreto asfáltico) como superficie de rodamiento; con la consigna de hacer más kilómetros con un mismo presupuesto.

En la actualidad se ha visto la necesidad de cambiar los parámetros de selección y se consideran factores a futuro mas reales, por lo cual surge el estudio de las experiencias que se tienen en el empleo de concreto hidráulico para este fin.

En lo que respecta a las carreteras, la primera construida con carpeta de concreto hidráulico en México, fue la del camino al Desierto de los Leones de 1933 a 1934, con una longitud de 23 kilómetros, que aun se encuentra en condiciones aceptables de servicio.

En general todas las vialidades elaboradas con concreto hidráulico han presentado un comportamiento adecuado a lo largo de los años a pesar de contar con un mantenimiento casi nulo, lo que da la pauta para tomar en consideración en el desarrollo de un programa de construcción de carreteras basándose en pavimentos rígidos.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## Capítulo

# I

## PAVIMENTOS

### I.1. ¿QUÉ ES UN PAVIMENTO?

Hasta la fecha se considera que todas las capas que quedan en la parte superior de la capa sub-rasante como son la sub-base, base y carpeta, incluyendo el riego de sello, forman parte de lo que se llama pavimento de una obra vial. Aunque es importante mencionar que se han hecho estudios en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) tratando de demostrar que se puede tener un pavimento bien formado desde la capa sub-rasante, (con los mejores materiales y con el mejor control de calidad) pero que por tener unas terracerías inestables falle, por esta razón se trata de tener una sección estructural del pavimento la cual debe de estar formada por el terreno natural, el cuerpo del terraplén y la capa sub-rasante. Las diferentes capas que constituyen el pavimento: sub-base, base y carpeta, incluyendo el riego de sello.

La sección estructural del pavimento debe de ser una estructura que proporcione una superficie de rodamiento de color y textura apropiados resistente a la acción del tránsito, intemperismo y otros agentes erosivos o perjudiciales y que transmita a las terracerías y/o al terreno natural adecuadamente los esfuerzos producidos por las cargas impuestas por el tránsito, de tal forma que no sobrepasen la resistencia de las diferentes capas sin llegar a la falla. De lo descrito anteriormente se puede dar una definición de pavimento.

Se define como Pavimento a la estructura constituida por una capa o un conjunto de capas de materiales apropiados comprendidas entre la sub-rasante y la superficie de rodamiento de una obra vial y cuyas funciones principales son las de proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, resistente a la acción del tránsito, al intemperismo y a otros agentes perjudiciales. Su función es la de transmitir adecuadamente a la capa sub-rasante los esfuerzos producidos por el tránsito, haciendo posible que los vehículos circulen con comodidad, seguridad y economía.

La estructura o disposición de los elementos que constituyen el pavimento, así como las características de los materiales que se emplean en su construcción ofrecen una gran variedad de posibilidades.

Las capas con las que puede estructurarse un pavimento pueden ser de materiales naturales seleccionados, sometidos a diversos tratamientos y coronados por una carpeta asfáltica o por losas de concreto hidráulico. Dependiendo del tipo de superficie de rodamiento se han clasificado arbitrariamente los pavimentos en rígidos y flexibles.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# PAGINACIÓN DISCONTINUA

*Si la superficie de rodamiento es de concreto hidráulico entonces se le conoce como pavimento rígido; pero si la superficie de rodamiento es de concreto asfáltico entonces se le conoce como pavimento flexible.*

## I.2. OBJETIVOS DE LA CONSTRUCCION DE UN PAVIMENTO.

Un pavimento es la estructura formada por varias capas, entre cuyos objetivos específicos a satisfacer son los siguientes:

1) Resistir y distribuir adecuadamente la acción de las cargas propiciadas por el tránsito, tanto en su magnitud como en su intensidad sin que se presenten cambios volumétricos y/o se pueda llegar a la falla. Un pavimento debe estar constituido de tal forma que las cargas que sobre él se apliquen no provoquen deformaciones permanentes y perjudiciales sobre el terreno y al mismo tiempo se impida la formación de grietas internas en la estructura del mismo y el desplazamiento de partículas ocasionadas por la acción de amasadura del tránsito. Por lo tanto, un pavimento debe tener el espesor necesario para soportar y distribuir las cargas del tránsito.

2) Reunir las condiciones adecuadas de impermeabilidad para no disminuir la resistencia de alguna de sus capas. El pavimento debe tener la suficiente impermeabilidad para impedir la filtración del agua de lluvia, ya que si esta penetra en exceso provoca la lubricación de las partículas con su consiguiente pérdida en la capacidad de soporte. Siempre se debe de contar con las obras de drenaje necesarias al proyectarse una obra de pavimento, ya que aunado a la impermeabilidad requerida del pavimento en si, se reflejara en una obra estable.

3) Resistir la acción destructora de los vehículos. La acción abrasiva de las llantas de los vehículos produce desgaste de la superficie y desprendimiento de partículas del pavimento. También el tráfico provoca cierta acción de molienda y amasado, por lo tanto el pavimento debe resistir estos efectos.

4) Tener resistencia a los fenómenos atmosféricos y ser estable ante los agentes del intemperismo. Los agentes atmosféricos actúan continuamente sobre la superficie del pavimento provocando la meteorización y alteración de los materiales que lo forman. Hay que tener en cuenta que hay materiales que resisten mas y mejor estos efectos y por lo tanto la vida económica y útil del pavimento será mayor cuando los materiales que lo formen tengan mas capacidad de resistencia a los agentes físicos y químicos.

5) Presentar al usuario una superficie de rodamiento que permita en todo tiempo un tránsito fácil, seguro, cómodo y económico. La superficie de rodamiento de un pavimento debe de ser segura para la conducción de los vehículos, pero esa superficie lisa y uniforme debe ser siempre antideslizante cuando se encuentra mojada.

6) Debe presentar cierta flexibilidad para adaptarse a algunas fallas de las capas inferiores, ya que en muchas ocasiones por una u otra circunstancia, generalmente controlables se presentan ligeros asentamiento de las capas inferiores, los cuales no son en extremo perjudicial Pero conviene que el pavimento tenga cierta flexibilidad que la haga capaz de adaptarse a esas pequeñas fallas sin necesidad de reparaciones costosas.

7) Minimizar tanto los gastos de construcción (costo inicial), así como los de conservación, operación y mantenimiento para la vida útil para la cual fue diseñado el pavimento.

De lo anteriormente descrito se puede concluir que se necesita de una sub-rasante compacta y revestida con un material mejorado, así mismo es necesario una carpeta que en conjunto con las capas inferiores proporcionen un pavimento capaz de resistir y distribuir eficazmente las cargas a las terracerías, las cuales al estar protegidas de la filtración del agua de lluvia mediante una capa impermeable, permanecerá todo el tiempo con la estabilidad necesaria para impedir que se presenten deformaciones permanentes y perjudiciales.

La carpeta que se coloque sobre las diferentes capas compactadas, servirá para proporcionar una superficie de rodamiento que evite en la mayor forma posible las pérdidas del material por la acción abrasiva de las llantas de los vehículos en movimiento; proporcionando una superficie cómoda, lisa, flexible y resistente a los agentes externos que pudieran dañarlo. Por lo que se tendrá un pavimento que si satisface los propósitos para los cuales fue diseñado y construido.

### I. 3. TIPOS DE PAVIMENTO Y MATERIALES QUE LO FORMAN.

En los siguientes párrafos se mencionaran los diferentes tipos de pavimentos que existen en México, indicando cuales son los materiales que lo conforman.

#### I. 3. 1. TIPOS DE PAVIMENTOS

Los pavimentos que existen hoy en día en las carreteras del país, se diferencian uno de otro, principalmente por el tipo de clase de los materiales que componen la superficie de rodamiento. Por lo cual, encontramos a los pavimentos flexibles y a los pavimentos rígidos.

Los pavimentos flexibles están conformados por una carpeta asfáltica, la cual proporciona la superficie de rodamiento. Esta carpeta se pliega a pequeñas deformaciones de las capas inferiores sin que su estructura se fracture. Estas capas inferiores son: Base y Sub-base, las cuales se construyen sobre una capa llamada sub-rasante.

Los pavimentos rígidos están conformados por un conjunto de losas de concreto hidráulico, el cual proporciona la superficie de rodamiento. Este conjunto de losas distribuye la carga hacia las capas inferiores. Este tipo de pavimento no puede plegarse a las deformaciones de las capas inferiores sin que se presente la falla estructural.

Debido a que estos dos tipos de pavimentos están conformados además de la superficie de rodamiento, por un par de capas llamadas Base y Sub-base en el caso del flexible y de una Sub-base en el caso del rígido. Se mencionan las funciones principales de ambas capas y de la capa en donde se apoyan que es la sub-rasante.

- a) **Capa Base.** Tiene como función el soportar las cargas que le trasmite la carpeta y abatir los esfuerzos inducidos por las cargas rodantes, de tal manera que lleguen a las capas subyacentes con la intensidad que éstas lo resistan. Tiene como objetivo económico que al aumentar su espesor, se reduce el espesor en la carpeta que sirve como superficie de rodamiento.
- b) **Capa Sub-base.** Es una capa de transición entre la capa de base y la capa sub-rasante. Se le atribuye una función económica cuando no es necesario usar un material de mayor calidad y por consiguiente de mayor costo. Sirve como un colchón que absorbe las deformaciones de las terracerías, debido a cambios volumétricos por efecto de humedad y rebote elástico.
- c) **Capa Sub-rasante.** Debe resistir los esfuerzos que le transmita el pavimento, debido al paso de los vehículos. Toma los esfuerzos que le transmita el pavimento y lo hace llegar a las terracerías o terreno natural de tal forma que éstas lo resistan fácilmente. Debe evitar que se contamine la parte inferior del pavimento con los materiales que forman las terracerías o el terreno natural. Sirve también para uniformizar los espesores requeridos del pavimento al compensar las variaciones de resistencia en las terracerías o el terreno natural.

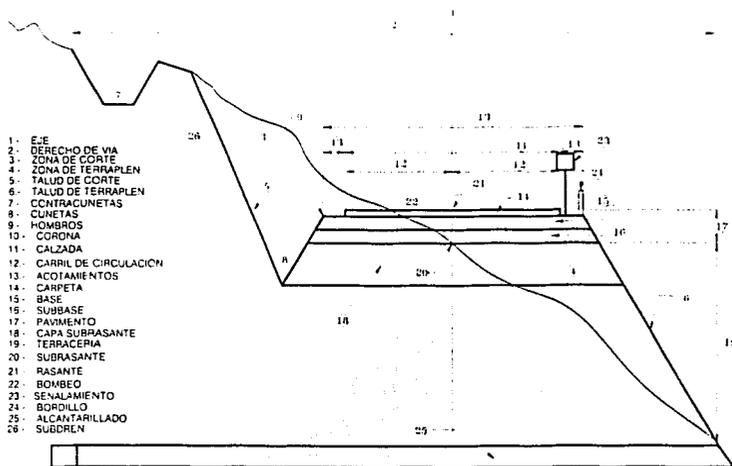


FIGURA I. 1 "SECCIÓN EN BALCÓN DE UN CAMINO". EN ESTA SECCIÓN SE APRECIAN LAS CAPAS ANTERIORMENTE DESCRITAS.

### **I.3.2. MATERIALES QUE LO CONFORMAN**

Como se ha mencionado anteriormente, lo que distingue a un pavimento de otro, es el material con que esta construida la superficie de rodamiento.

#### **PAVIMENTOS FLEXIBLES**

- a) **Materiales pétreos.** Son suelos inertes, provenientes de playones de ríos o arroyos, de depósitos naturales denominados minas o de roca. Sus características más importantes son: Granulometría, dureza, forma de la partícula y adherencia con el asfalto.
- b) **Productos asfálticos.** Cemento Asfáltico: el asfalto también llamado cemento asfáltico, es el último residuo de la destilación del petróleo y a temperaturas normales es sólido y de color café oscuro. Para mezclarse con los materiales pétreos, debe calentarse a 140° C, por lo que es necesaria una planta.

#### **PAVIMENTOS RÍGIDOS**

El concreto hidráulico es un material pétreo artificial, elaborado al mezclar parte de agua y cemento Portland con arenas y gravas, en proporciones tales que se produzca la resistencia y la densidad deseadas.

Los cementos Portland se llaman hidráulicos porque fraguan y se endurecen al reaccionar con el agua. Esta reacción se llama hidratación. Es una reacción química en la que se combinan el cemento y el agua para formar una masa parecida a la de la piedra.

El agua a utilizar para la elaboración del concreto es casi cualquier agua natural que pueda beberse y que no tenga sabor u olor notable.

Los agregados ocupan generalmente un 60 a 80 por ciento del volumen del concreto. Por lo que, sus características influyen en las propiedades del mismo. Estos agregados deben satisfacer ciertos requisitos y deben consistir en partículas limpias, duras, resistentes y durables, libres de sustancias químicas, recubrimientos de arcilla o de otros materiales finos que puedan afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento.

El cemento Portland debe cumplir los requisitos químicos y físicos expresados en las tablas 1 y 2 del anexo I. El agua utilizada para fabricar el concreto necesita cumplir los requisitos indicados en la tabla 3 del anexo I y en la tabla 4 del anexo I se muestran las características que deben cumplir los agregados finos y gruesos.

Los concretos que se utilizan en la losa son de resistencia relativamente alta, generalmente comprendida entre 200 y 400 kg/cm<sup>2</sup>. Las losas pueden ser de concreto simple, reforzado o pre-esforzado; de acuerdo al tipo de esfuerzo a que este sometida.

#### I.4. VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL DISEÑO

Para el diseño de un pavimento en carreteras, las variables que intervienen son regularmente las mismas: aún si se trata de un pavimento flexible o un pavimento rígido.

Este conjunto de variables las podemos agrupar en tres partes: Económico, Clima y Tránsito.

1) Económico. El análisis económico proporciona una base sobre la cual se puede tomar una decisión final, aunque la justificación económica no es ciertamente el único factor a considerar. La planeación adecuada de una carretera debe incluir los costos de construcción, mantenimiento y operación. Al considerar estudios de costo del pavimento se pueden distinguir dos tipos de mantenimiento: el principal y el de rutina, como mantenimiento principal se puede considerar el dar una nueva superficie a la carpeta o reconstruir la superficie para que quede en su condición original, el mantenimiento de rutina incluye la corrección de fallas del pavimento a medida que van ocurriendo, más que durante periodos específicos. Los costos de operación se refieren a dos tipos de costo, uno al costo de tránsito del vehículo que es función de la carretera y tipo de vehículo. El otro el costo agregado de usuario que resulta del retraso del tránsito ocasionado por el cierre del camino.

2) Clima. Los pavimentos están expuestos a muchos factores ambientales y diversas condiciones regionales, como son la temperatura, precipitación pluvial, nivel de aguas freáticas, topografía y características del suelo. Es importante reconocer que en condiciones desfavorables, tales factores pueden provocar la falla del pavimento aún en ausencia de tránsito. El pavimento, como sistema dinámico, debe ser capaz de sobrellevar las incesantes fuerzas destructivas de la naturaleza. Los mecanismos generales por los que el medio ambiente influencia al comportamiento del pavimento es: el efecto en las propiedades de los materiales, el efecto sobre la integridad de los materiales, como su durabilidad y el efecto en el cambio volumétrico y en el equilibrio interno de los esfuerzos del sistema.

3) Tránsito. El tránsito varía en intensidad y en número de vehículos, en calidad y peso de los mismos y en una carga móvil, repetida, causante de los esfuerzos transitorios. El conocimiento de las características del tránsito que se utiliza o utilizará en el camino que se va a construir es útil para el proyecto de la sección transversal, de una vía convirtiéndose en el principal elemento que se debe tomar en cuenta, ya que el transporte terrestre es el motivo de la obra.

## Capítulo

## II

# PAVIMENTOS FLEXIBLES

### II.1. MATERIALES QUE COMPONEN EL PAVIMENTO FLEXIBLE

La carpeta asfáltica es la capa superior de un pavimento flexible que proporciona la superficie de rodamiento para los vehículos, y que se elabora con materiales pétreos y productos asfálticos. La carpeta asfáltica se apoya sobre una capa llamada base y esta a su vez sobre la capa llamada sub-base.

La sub-base se puede apoyar sobre una sub-rasante mejorada y esta a su vez sobre el cuerpo de terraplén.

Esta carpeta proporciona la superficie de rodamiento uniforme y bien aglutinada de tal manera que no se le desprendan partículas que puedan dañar a los vehículos, con respecto a los materiales que lo forman: la carpeta esta constituida por agregados pétreos mezclados con un producto asfáltico.

#### Diferentes formas de preparación de asfalto para las carpetas asfálticas:

Tratamientos superficiales.- Son las carpetas asfálticas comprendidas por uno, dos o tres riegos y por capas de materiales pétreos clasificados de mayor a menor; para aplicar el siguiente riego se deberá esperar hasta que la carpeta anterior sea planchada y barrida.

Macadam asfáltico.- El macadam asfáltico o de penetración es una carpeta asfáltica que consiste en capas sucesivas de piedras progresivamente más pequeñas de abajo hacia arriba.

Mezcla en el lugar.- La mezcla asfáltica en el lugar se lleva a cabo revolviendo los agregados pétreos con el producto asfáltico mediante el uso de motoconformadoras o empleando mezcladoras ambulantes.

Mezcla en planta.- La mezcla en planta con dosificación por volumen se lleva a cabo calentando el asfalto y muchas veces calentando al agregado pétreo. Como la dosificación de los agregados se hace por volumen, no resulta una mezcla de alta calidad a no ser que su control sea estricto. Debido a la incertidumbre en la dosificación, estas mezclas resultan casi iguales a las elaboradas en el camino con mezcladoras ambulantes.

TESIS COL  
FALLA DE ORIGEN

**Concreto asfáltico.**- El concreto asfáltico son mezclas que se elaboran en plantas estacionarias, calentando los agregados y empleando cemento asfáltico, debido a la dosificación resulta un concreto de alta calidad.

En las últimas décadas se ha utilizado de forma considerable el concreto asfáltico, el cual a pesar de tener una falla frágil y parecida a la del concreto hidráulico, resiste mucho menos que este, por lo que se incluye en los pavimentos flexibles. Para evitar que la carpeta se agriete debido a pequeñas deformaciones de base, esta debe construirse rígida con cemento Portland o cal a fin de que los módulos de elasticidad de ambas capas se parezcan en lo más posible.

### II.1.1. MATERIALES PÉTREOS

Los materiales pétreos para construir carpetas asfálticas son suelos inertes, provenientes de ríos o arroyos, de depósitos naturales denominados minas o de rocas, los cuales, por lo general requieren de cribado y triturado para su utilización.

Los materiales que requieren ser cribados son poco o nada cohesivos ya que durante el proceso de extracción quedan sueltos y deben ser cribados mediante medios mecánicos, asegurando la separación y eliminación de partículas mayores que las establecidas en el proyecto.

Los materiales deberán ser cribados según las siguientes condiciones:

- 1) Por mallas habilitadas para eliminar partículas mayores de 25 mm (1"); 19 mm (3/4"); 13 mm (1/2"); o de 6 mm (1/4")
- 2) Por varias mallas para la producción de materiales pétreos necesarios para la construcción de sellos o sobre carpetas: materiales tipo 3-A, 3-B, o 3-E con 2 mallas.

Los materiales denominados con el número tres, deberán tratarse para eliminar el polvo superficial adherido por su extracción utilizando algún proceso de lavado.

Los materiales que requieren ser triturados parcial o totalmente y cribados deberán obtenerse mediante los mismos procesos descritos anteriormente para materiales de sub-base y base, tanto en cuestión de ubicación de bancos, extracción de material, transporte, triturado y almacenado para ser mezclado con algún material asfáltico.

Las características más importantes que deben tener los materiales pétreos para carpetas asfálticas son granulometría, dureza, forma de la partícula y adherencia con el asfalto. La granulometría es de mucha importancia y debe satisfacer las normas correspondientes, pues como los materiales pétreos se cubren por completo con el asfalto, si la granulometría cambia, de igual forma cambia la superficie a cubrir, ya que la superficie por revestir resulta mas afectada al aumentar o disminuir los finos que cuando hay un cambio en las partículas gruesas, las especificaciones toleran mas los cambios en las partículas gruesas que en la de finos. Al estudiar cada tipo de carpeta asfáltica, se mencionaran las granulometrías necesarias y las tolerancias correspondientes.

Los tamaños máximos a utilizar serán de trascendencia en el resultado final, ya que un tamaño máximo de 19 mm dará por resultado una textura áspera, con buen coeficiente de fricción, la mezcla demandará contenidos de asfalto razonables (6-7% para áridos comunes); pero exigirá espesores de carpeta mínimos de 4 cm y normales de 7 cm. En los cuales se llegan a presentar problemas para lograr los niveles finos dentro de normas. Tamaño máximo de 13 mm mejora la calidad de nivelación, permite espesores de carpeta mínimos de 3 cm con consumos de asfalto entre 7 y 8.5% pero da como resultado superficies más lisas con bajo coeficiente de fricción; que pueden obligar a tomar acciones posteriores para mejorarlo. Finalmente mezclas con tamaño máximo de 6.4 mm producen carpetas con espesores mínimos de 2 cm. Texturas finas y cerradas con alta calidad topográfica, por su espesor mínimo pueden tenderse de manera rápida con gran precisión pero requieren de concentraciones de asfalto elevadas (entre 9-12%)

Como consecuencia de lo anterior, se tiene que el tamaño recomendable de los agregados pétreos para las vías terrestres (carreteras) es de 19 mm, ya que con una adecuada dosificación con agregados finos se puede lograr un acabado adecuadamente nivelado. Los dos tamaños restantes tienen sus pros y sus contras, según el uso que se les desee dar.

Dependiendo del tipo de planta que se vaya a emplear para fabricar el concreto asfáltico, los materiales se separaran por tamaños, por ejemplo, de 9 a 13 mm. De 13 a 9.5 mm, de 9.5 a 6.4 mm y de 6.4 a polvo. Esta separación facilitará si se hace una buena dosificación para obtener en la máquina la curva granulométrica más acorde a los requerimientos de proyecto.

## II.1.2. CEMENTOS ASFÁLTICOS.

El cemento asfáltico es en general, un residuo de la destilación de crudos de petróleo. Mediante una adecuada combinación de adicicionantes, se pueden lograr productos con características tanto en elasticidad, grado de dureza, temperatura de fusión (ya que a temperatura ambiente son rígidos) y grado de fraguado. Con clasificaciones variadas se identificaran por sus características físicas y sobre todo por el tiempo de fraguado. Así se tiene que los cementos del no. 2 al no. 4 son del tipo lento, trabajan a temperaturas de fusión bajas y son elásticos; los del no. 5 al no. 8 son del tipo medio en todas sus características, estos son los mas empleados. Por último se tienen los del no. 9 al no. 12, los cuales son de fraguado rápido, de alta temperatura de trabajo y de alta dureza.

El asfalto, tambien llamado cemento asfáltico, es el último residuo de la destilación del petróleo y a temperaturas normales es solido y de color café oscuro. Para mezclarse con los materiales pétreos se debe de calentar a temperatura de 140 °C, por lo que es necesaria una planta. El cemento asfáltico cuando reúne buenas características, se somete a un proceso de refinación posterior para obtener el cemento asfáltico o sea el asfalto basico para la elaboración de los demás materiales asfálticos utilizables en carpetas. Los procesos de refinación empleados pueden ser:

A) Método de destilación.

B) Método de extracción de solventes.

Existen varios tipos de cementos asfálticos, el ofrecido en la República Mexicana es el cemento asfáltico no.6, las normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) a las que están sujetas se muestran en la tabla II.1, mencionadas en el anexo no. 2. Analizando la tabla II.1 se pueden ver que los asfaltos rebajados son el producto de la mezcla del cemento asfáltico con las fracciones ligeras del petróleo, denominadas dichas fracciones solventes o diluyentes.

### II.1.3. REBAJADOS ASFÁLTICOS Y EMULSIONES ASFÁLTICAS

#### REBAJADOS ASFÁLTICOS

Con el fin de poder trabajar con el cemento asfáltico a temperaturas menores es necesario fluidificarlo, para ello se producen los rebajados asfálticos, los cuales se fabrican diluyendo el concreto asfáltico en gasolina, tractolina (también conocida como petróleo diáfano), diesel o aceites ligeros. Los asfaltos rebajados se pueden dividir en:

- Asfaltos rebajados de fraguado lento: son materiales asfálticos líquidos compuestos de un cemento asfáltico y un disolvente de baja volatilidad, diesel o aceite ligero.
- Asfaltos rebajados de fraguado medio: son materiales asfálticos líquidos, compuestos de un cemento asfáltico y un disolvente del tipo del queroseno.
- Asfaltos rebajados de fraguado rápido: son materiales asfálticos líquidos, compuestos de un cemento asfáltico y un disolvente del tipo de la nafta o gasolina ligera.

#### EMULSIONES ASFÁLTICAS

Para tener un producto asfáltico que se pueda aplicar o mezclar con pétreos húmedos, se fabrican las emulsiones asfálticas, en las que el cemento asfáltico se suspende en agua por medio de un emulsificante y un estabilizador. De acuerdo con el emulsificante usado, se producen emulsiones aniónicas y catiónicas, estas últimas resisten mayores humedades en los pétreos. Las emulsiones también son de fraguado rápido, medio y lento de acuerdo al porcentaje de cemento asfáltico.

Se llama emulsión a un sistema compuesto por 2 líquidos inmiscibles, de los que uno se dispersa en el otro en forma de gotas diminutas, llamándose al primero fase dispersa y al segundo fase continua. En las emulsiones asfálticas (en las 2 fases) si se agitan agua y asfalto en caliente, se obtiene una emulsión que solo dura el tiempo de agitación, tan pronto como cesa esta, las partículas de asfalto se unen formando una masa separada del agua.

Para lograr emulsiones estables es necesario introducir un tercer componente, el emulgente llamado emulsificante, que se concentra en la capa interfacial de ambos componentes, modificando las propiedades del conjunto y haciendo estable la emulsión.

Dependiendo del agente emulsificante, las emulsiones pueden ser aniónicas si los glóbulos de asfalto tienen carga electro-negativa y catiónica si los glóbulos asfálticos tienen carga electropositiva. Son los materiales líquidos estables, formados por dos fases no mezclables, en las que la fase continua de la emulsión está formada por agua y la fase discontinua por pequeños glóbulos de asfalto.

Los glóbulos de asfalto son de tamaño coloidal (2 micras) y para preparar las emulsiones se usan mezcladores de alta velocidad o molinos coloidales.

## II.2 DISEÑO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE

### II.2.1 VARIABLES DE DISEÑO

Los factores que intervienen en el comportamiento de un pavimento modificando su capacidad de servicio, constituyen argumentos fundamentales que deben hacerse intervenir en las gráficas de diseño, en las cuales también deberá aparecer el nivel de falla aceptada o el parámetro de comportamiento.

Las variables de diseño pueden agruparse en tres categorías:

#### A. - Variables estructurales:

Comprenden características tales como espesores de las diferentes capas, medidas de resistencia de materiales y resistencia de conjunto del pavimento; se considera a los esfuerzos cortantes como la principal causa de falla estructural de un pavimento, por lo que la propiedad fundamental que deberán tener los suelos que lo componen y que se hará intervenir en el diseño es la resistencia al esfuerzo cortante.

Además de estos esfuerzos, sobre los pavimentos actúan otros adicionales producidos por la aceleración y frenaje de los vehículos y esfuerzos de tensión desarrollados en los niveles superiores de la estructura y a cierta distancia del área cargada, al deformarse esta verticalmente hacia abajo.

#### B. - Variable de carga

El soportar las cargas impuestas por el tránsito dentro del nivel de deterioro y paulatina destrucción previstos por el proyecto, es la primera condición que debe cumplir el pavimento. Dentro de este grupo deben considerarse aquellas características como el tipo de ejes, ya sean sencillos o tandem, cargas aplicadas, presiones de contacto, cubrimiento, tránsito mezclado y tránsito equivalente.

Los pavimentos están sujetos a cargas móviles y los efectos de estas son menos conocidos y diferentes que los de las cargas estáticas. Aunado a esto, estas cargas

actuantes son repetitivas y afectan a la larga a la resistencia de las capas de relativa rigidez, en este caso a las carpetas asfálticas y a las bases estabilizadas, donde se pueden presentar los fenómenos de fatiga que son difíciles de analizar y cuantificar.

La repetición de las cargas es causa de la rotura de granos que modifica la resistencia de la capa, también produce la interpenetración de partículas granulares en las capas de suelo más fino. Así, la resistencia de los materiales que forman los pavimentos deben interesar por:

B.1) La capacidad de carga que pueden desarrollar las capas que constituyen el pavimento para soportar adecuadamente las cargas de tránsito.

B.2) La capacidad de carga de la capa sub-rasante, que constituye el nexo de unión entre el pavimento y la terracería para soportar los esfuerzos transmitidos y transmitir a la vez esfuerzos a las terracerías a niveles convenientes.

### C.- Variables climáticas y regionales

Incluyendo todas aquellas características climáticas, topográficas y aspectos locales que afectan el comportamiento de los pavimentos, entre las variables climáticas más importantes se encuentran la precipitación anual, la temperatura y el régimen de lluvia.

Es evidente que en los programas de investigación sobre pavimentos deben hacerse intervenir todas aquellas variables de diseño que se consideran significativas, además se debe elegir un sistema confiable para determinar el comportamiento del pavimento, mediante el cual se pueda comparar la eficiencia de los diferentes diseños, en otras palabras la investigación debe permitir relacionar las variables de diseño con el comportamiento del pavimento.

## **II.2.2. TRÁNSITO**

Una de las funciones principales de la estructura del pavimento es la de resguardar la sub-rasante de las cargas impuestas por el tránsito. El proyectista deberá diseñar un pavimento que resista un gran número de aplicaciones repetidas de cargas de magnitud variable. Los factores de carga principales que son además importantes en el diseño de pavimentos flexibles son:

- 1) Magnitud de la carga por eje (y ruedas)
- 2) Volumen y composición de la carga por eje.
- 3) Presión de las llantas y área de contacto.

Por lo común, la magnitud de la carga máxima se controla mediante los límites legales de carga. Con frecuencia, se emplean investigaciones de tránsito y estudios de carga para establecer la magnitud relativa y la ocurrencia de las diferentes cargas a que está sometido el pavimento. La predicción o estimación del tránsito total que rodará sobre un pavimento durante su vida de diseño es difícil, pero es obviamente una tarea importante.

## ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

La mayoría de los procedimientos de diseño se utilizan para un incremento en el volumen del tránsito con base en la experiencia, empleando algunas tasas estimadas de crecimiento.

Se puede afirmar que son variados los factores que intervienen en el comportamiento de un pavimento por lo cual debe realizarse un análisis más detallado del tránsito y de sus características, que intervienen en el diseño de una sección estructural.

Podemos decir que las deficiencias en cuanto a diseño por tránsito, se deben principalmente a dos motivos que son:

- Evaluación incorrecta del tránsito inicial
- Cambios e incrementos futuros

De esta manera para un adecuado diseño por tránsito, se tienen que tomar en cuenta las siguientes características que se detallan a continuación.

### TIPOS DE VEHÍCULOS

Para definir el tipo de vehículos que circulan por un camino se usa la siguiente clasificación:

- a) Atendiendo a su clase

Clase	Nomenclatura
Automóvil	A
Autobús	B
Camión	C
Tractor	T
Semiremolque	S
Remolque	R

FIGURA II.1. NOMENCLATURA DE VEHÍCULOS.

b) De acuerdo a su número de ejes:

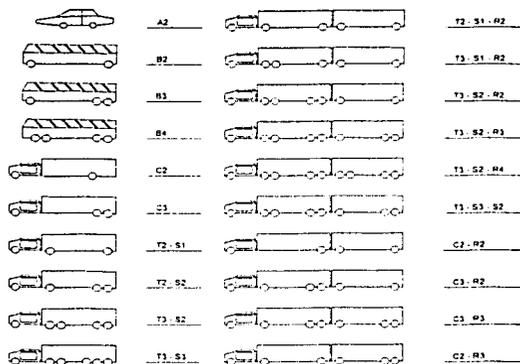


FIGURA II.2. VEHÍCULOS AUTORIZADOS PARA CIRCULAR POR LA RED VIAL

**Tipo A.** Corresponden a los automóviles y a los camiones ligeros con capacidad hasta de 3 ton. Denominados A2 y A2' respectivamente.

**Tipo B.** Autobuses de dos, tres y cuatro ejes denominados B2, B3 y B4, respectivamente.

**Tipo C.** Son los camiones de dos a cuatro ejes (C2, C3 y C4), así como los tractores de dos y tres ejes (T2, T3), con semi-remolque de uno a tres ejes (S1 a S3) o sea T2-S1, T2-S2, T2-S3, T3-S3, los camiones de dos y tres ejes (C2 y C3) con remolque de dos y tres ejes R2 y R3 o sea C2-R2, C3-R2, C3-R3 y los tractores con semi-remolque y cuyas combinaciones autorizadas son T2-S1-R2, T2-S2-R2, T3-S1-R2, T3-S2-R2, T3-S2-R3 y T3-S2-R4.

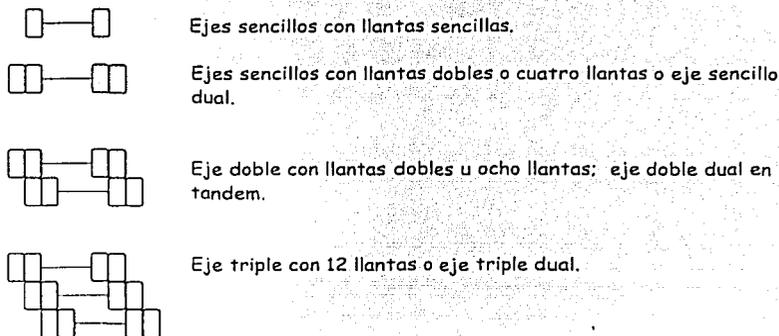
Al observar los datos de vialidad a nivel nacional, más del 50% de los vehículos que pasan por un lugar corresponden al tipo A, es decir más del 50% son automóviles o camionetas con capacidad hasta de 3 ton y cada día la cantidad de automóviles que circulan por las carreteras es mayor.

La alternativa adecuada, es propiciar el transporte masivo siempre y cuando este sea cómodo, seguro y económico para el usuario, lo que tendría las siguientes consecuencias favorables para la red vial:

- ❖ Descongestionaría la sección estructural.
- ❖ Incrementaría la vida útil de la sección.
- ❖ Se podrían aprovechar más adecuadamente los recursos para el sector transportes.

DISPOSICIÓN DE LAS LLANTAS Y CARGAS CORRESPONDIENTES.

La disposición autorizada para los diferentes tipos de vehículos es la siguiente:



Con relación a las cargas máximas autorizadas:

Tipo de eje	Peso autorizado en kg en camino tipo A
Un eje sencillo con dos llantas	5,000
Un eje sencillo con cuatro llantas	10,000
Dos ejes en tandem con dos llantas cada eje	4,500/eje
Dos ejes en tandem con cuatro llantas cada eje	9,000/eje
Tres ejes o más ejes sencillos con cuatro llantas cada eje.	7,500/eje

FIGURA II.3. TIPOS DE EJES Y PESOS EN kg.

EFFECTOS DEL INCREMENTO DE CARGAS TRANSMITIDAS A LA SUPERFICIE DE RODAMIENTO.

Los resultados obtenidos por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), quien realizo un análisis en Ottawa, en el estado de Illinois a escala natural demostrando la equivalencia del daño que se presenta con diferentes combinaciones de ejes y sus cargas correspondientes.

Las experiencias se remontan a los tramos de prueba de Maryland y WASHO (Western Association of State Highway Officials) en el sureste de Idaho en 1951 y 1952 en donde se eligieron como cargas un eje equivalente a 18,000 lb. O 8,2 ton, y para eje en tandem a la correspondiente a 32,000 lb. O 15 ton por ser los pesos más usuales.

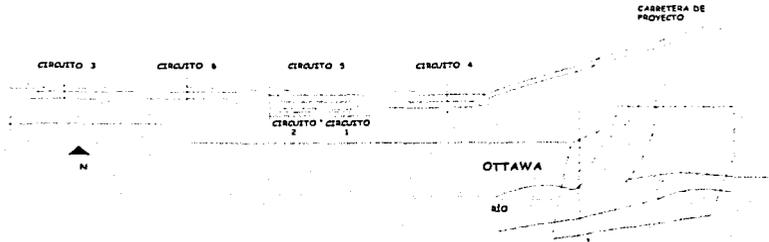


FIGURA II.4. TRAMOS DE PRUEBAS (ASSTHO)

Coefficiente de equivalencia de daño.

La AASHTO después de haber realizado diferentes tramos de prueba, encontró que los coeficientes de equivalencia de daño en la superficie, con respecto al daño que reproduce un eje estándar esta dado por la siguiente ecuación:

$$F_D = \left[ \frac{\text{Carga}}{\text{Eje Real}} \cdot \frac{\text{Carga}}{\text{Eje Estándar}} \right]^4$$

El eje estándar es igual al eje equivalente.

Para ejes sencillos si  $L_s$  es la carga por eje real, la expresión es:

$$F_D = \left[ \frac{L_s}{8.2} \right]^4 \quad ; \quad L_s \text{ en ton.}$$

En el caso de ejes en tandem, si  $L_T$  es la carga por eje real en tandem la expresión se convierte en:

$$F_D = \left[ \frac{L_T}{15} \right]^4 \quad ; \quad L_T \text{ en ton.}$$

También puede afirmarse que para igualdad de daño:  $L_T = 1.8 L_s$

La repetición de cargas y la acumulación de sus efectos sobre el pavimento, como la fatiga es fundamental para él calculo. Se tendrá en cuenta las máximas presiones de contacto, las solicitaciones tangenciales en tramos especiales (curvas, zonas de drenado y aceleración).

El método del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), desde 1962, ha realizado estudios con tramos de prueba, en la denominada pista circular donde se ensayan pavimentos con diferentes estructuras y condiciones de cada carga a escala natural, la pista esta ubicada en un foso donde se aloja la estructura del pavimento y un marco giratorio de tres brazos conectados a una flecha central, que tienen en sus extremos un par de llantas de camión que ruedan sobre la superficie del pavimento hasta provocar la falla, donde se observa la relación de la estructura contra la carga.

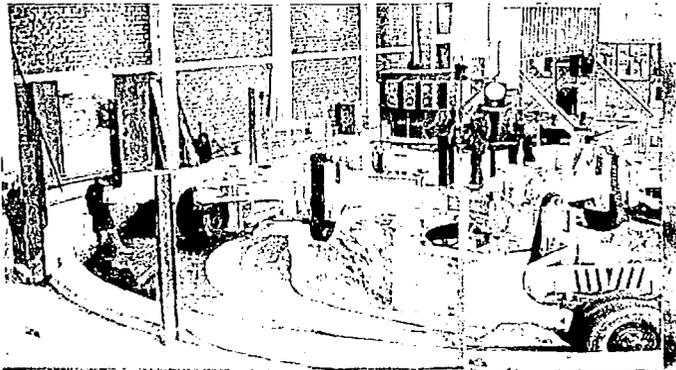


FIGURA II.5. PISTA CIRCULAR Y ELEMENTOS QUE LA COMPONENTEN.

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

De esta forma el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) propuso además de un método de diseño, los coeficientes de daño para los diferentes tipos de vehículos autorizados los que para profundidades que van desde la superficie de rodamiento hasta los 60 cm de profundidad, estos aparecen en el fascículo 444 de este Instituto de noviembre de 1981 en el Apéndice E.

Los Coeficientes de daño bajo carga máxima, se incrementan a medida que aumenta el peso de los vehículos; a manera de ejemplo para  $Z = 0$  sobre la superficie de rodamiento, el coeficiente de daño para el vehículo A2 es de 0.004 y para la misma profundidad para el vehículo T3-S3 el coeficiente de daño bajo carga es de 6.00 es decir se requiere por cada sección 1,500 vehículos A2 para provocar el mismo daño que un solo vehículo T3-S3.

En general los coeficientes de daño para autobuses y camiones con la profundidad, se incrementan es decir el coeficiente de daño de un vehículo T3-S2 para  $Z = 0$  es de 5, en cambio para  $Z = 60$  cm es de 5.761; es decir el mayor daño no se produce en la superficie de rodamiento sino a 60 cm de profundidad, que es donde generalmente se encuentra la capa sub-rasante o cuerpo del terraplén.

A continuación se muestra la variación del coeficiente de equivalencia de daño para diferentes pesos por eje sencillo y una variación semejante para diferentes pesos por eje en tandem y como se observa, crecen en forma exponencial.

Coeficiente de equivalencia para Ejes Sencillos		Coeficiente de equivalencia para ejes Tandem	
Carga por eje sencillo (Ton)	Coeficiente de daño	Carga por eje en Tandem (Ton)	Coeficiente de daño
2.0	0.003	4.0	0.005
4.0	0.05	8.0	0.08
6.0	0.28	9.0	0.129
8.0	0.90	12.0	0.40
10.0	2.21	16.0	1.29
12.0	4.60	20.0	3.16
14.0	8.40	24.0	6.55

FIGURA II.6. COEFICIENTES DE EQUIVALENCIAS.

TESIS CON  
 FOLIO DE ORIGEN

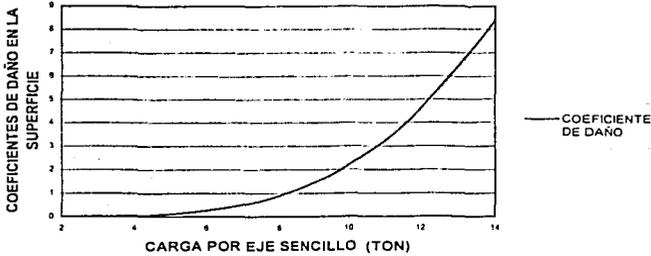


FIGURA II.7. COEFICIENTES DE EQUIVALENCIA PARA EJES SENCILLOS.

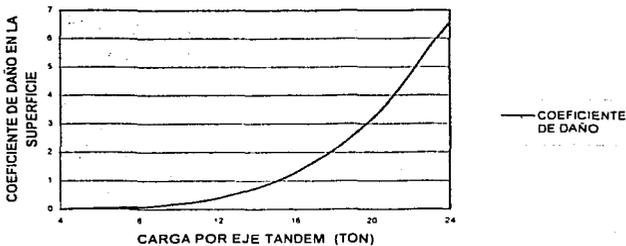


FIGURA II.8. COEFICIENTES DE EQUIVALENCIA PARA EJES TANDEM.

**NÚMERO DE REPETICIONES DE CARGA POR CADA PUNTO DE LA SUPERFICIE DE RODAMIENTO**

La experiencia en los tramos observados indica que con más de 3000 vehículos pesados, la fatiga por los efectos de la repetición de cargas dadas por el tránsito deteriora la sección estructural, entendiéndose por fatiga la falla de la estructura bajo la continua repetición de un esfuerzo. Se muestra que a mayor número de repeticiones de ejes equivalentes de 8.2 ton. se requiere un espesor mayor del pavimento.

Al hacer el diseño de un pavimento se podrá observar la forma como interviene el concepto de fatiga propiciado por repetición de cargas dadas por el tránsito.

Un esfuerzo pequeño propiciado por las cargas de los vehículos en comparación con aquel que hace fallar a la estructura con una sola aplicación, puede aplicarse muchas veces sin daño, pero uno mayor causaría la ruptura con un número menor de aplicaciones, lo cual indica que una carpeta flexible sujeta a una gran repetición de carga podría comportarse mejor y deteriorarse menos si tiene la flexibilidad necesaria para absorber las deformaciones sucesivas que produzcan las cargas rodantes o una gran resistencia de manera que el esfuerzo propiciado por la repetición de cargas resulte pequeño comparado con el esfuerzo o resistencia que tiene la sección estructural.

## VELOCIDAD PERMISIBLE DEL TRÁNSITO

La experiencia ha demostrado que las cargas de los vehículos con velocidad pequeña o estática producen más deterioros que dichas cargas a mayor velocidad, lo cual se comprueba en los pavimentos pues se deterioran más los carriles de ascenso que los de descenso, así como los pavimentos de aeropuertos que sirven como calles de rodaje, cabeceras y/o plataformas.

Una cosa semejante sucede al cruzar un puente, la reacción natural del conductor al acercarse a un puente o paso desnivel es frenar y por lo tanto producir mayor tracción.

### II.2.3 SUELO

El pavimento no funciona de manera independiente, si no que el funcionamiento de cada una de sus partes, además de depender entre sí, también está condicionada al comportamiento del terreno natural o de cimentación.

Un diseño apropiado de los sistemas de pavimento flexible debe abarcar la total interpretación de las características esenciales de los materiales que lo forman y de aquellos sobre los que está cimentado. Las características del material requerido pueden variar, dependiendo de la naturaleza del procedimiento de diseño.

**Cuerpo del Terraplén (CT)** Este debe construirse con material apropiado que tenga pocos cambios volumétricos bajo variaciones de humedad y sirva para alcanzar el nivel de la rasante del proyecto. Para la construcción del cuerpo del terraplén de una obra vial, dependiendo del tipo de terreno en que se construya, se utilizan materiales provenientes de los cortes o de los préstamos.

**Capa Subyacente (SBY)** Cuando el camino se encuentra al nivel del terreno natural o en una sección en corte y una en terraplén, y el terreno en el que se va apoyar es de mala calidad también se llega a usar una capa de mejoramiento llamada subyacente, con objeto de reducir los efectos perjudiciales de ese suelo natural como son deformaciones y expansiones, o reducir espesor de pavimento. Esta capa generalmente se construye entre la capa sub-rasante y el cuerpo del terraplén o el terreno natural.

**Capa Sub-rasante (SBR)** Es una capa de transición entre el terreno natural o el cuerpo del terraplén y el pavimento, sirve para evitar que se contamine la parte inferior del pavimento con materiales que forman las terracerías o el terreno natural. Cuando el material del terreno es de buena calidad, únicamente se conforma y compacta, usándose como capa sub-rasante. En el caso de que el terreno sea roca, se usa la capa subyacente y la sub-rasante para absorber las irregularidades que resulten al efectuar un corte, aunque no necesariamente.

**Sub-base (SB)** Es una capa de transición entre la capa de base y la sub-rasante a la cual se atribuye una función económica cuando no es necesario usar un material de mayor calidad y por consiguiente mayor costo; aún a costa de incrementar los espesores. El material usado en esta capa debe ser procesado, extendido y compactado de acuerdo con lo que suscriban las especificaciones de cada proyecto o las Normas para Construcción e Instalación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)

**Base (B)** Capa constituida con material seleccionado, de mejor graduación y resistencia que la capa de sub-base. El incremento en su resistencia se debe a la trabazón que existe entre las partículas originada por la forma en general, angulosa de las mismas.

Quando el material del que se pueda disponer de alguna de las capas mencionadas anteriormente no cuente con la calidad requerida, suele mejorarse con aditivos tales como cemento, puzolanas, sulfatos de calcio, cal o asfalto, y entonces el pavimento pasa a ser del tipo mejorado.

## II.2.4 MEDIO AMBIENTE

En el diseño de la propia estructura del pavimento interesa su comportamiento bajo efectos de temperatura y humedad. Son objeto de consideración las temperaturas extremas y estacionales, así como el régimen e intensidad de las precipitaciones, punto de ubicación del nivel freático, geología y topografía de la zona que son premisas que deben tomarse en cuenta en los aspectos constructivos, donde también debe tenerse en cuenta la selección de los materiales y determinados elementos colaterales, como el drenaje.

El clima o medio en que se ha de construir un pavimento flexible influye decisivamente en la vida útil, resistencia y otras características de los diferentes materiales que conforman el pavimento y sub-rasante. Es probable que los dos factores climáticos más importantes sean la temperatura y la humedad.

La magnitud de la temperatura y sus fluctuaciones afectan las propiedades de ciertos materiales. Por ejemplo, las temperaturas altas ocasionan que el concreto asfáltico pierda estabilidad, en tanto que a temperaturas bajas se vuelve duro y rígido. También, las temperaturas bajas y las fluctuaciones de la misma se asocian con las "ampollas de congelación" y con los daños provocados por las heladas y los deshielos. Si los materiales granulares no están graduados de manera apropiada, pueden levantarse debido a las heladas. De la misma manera, la sub-rasante, si se congela, puede presentar grandes pérdidas de resistencia. Ciertos materiales estabilizados (tratados con cal, cemento y cenizas ligeras de óxido de calcio) pueden sufrir daños substanciales si se someten a un gran número de ciclos congelación - deshielo.

Así mismo, la humedad actúa sobre las características de muchos materiales. La humedad es un factor de importancia en los daños relacionados con las heladas. Los suelos de la sub-rasante y otros materiales de pavimentación se debilitan en forma apreciable cuando se saturan y ciertos suelos arcillosos presentan cambios de volumen substanciales que ha inducido la humedad.

## II.3 PROCESO CONSTRUCTIVO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

### II.3.1 CONCRETO ASFALTICO

Las carpetas de concreto asfáltico son las que se construyen mediante el tendido y compactación de mezclas elaboradas en caliente, en una planta estacionaria, utilizando cementos asfálticos.

Es importante señalar que existe también el *concreto asfáltico ahulado*. Sin embargo, como este tipo de concreto asfáltico no es motivo del presente trabajo; en el anexo del capítulo II, se hace una descripción general de dicho concreto.

## ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

Hay dos tipos fundamentales de plantas para preparación de mezclas asfálticas; la de baches con capacidades de entre 0.23 y 2.8 ton/hr, las cuales eran buenas en su tiempo; pero en la actualidad son obsoletas, ya que con las modernas llamadas de producción continua se producen de 90 a 350 ton/hr o más.

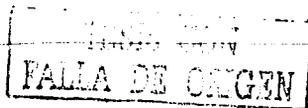
Las plantas de producción continua solo están limitadas por el tamaño de sus elementos, ya que trabajan basándose en gastos de fluidos: uno de áridos y otro de asfalto; si los dispositivos para calentar los materiales, mezclarlos y almacenarlos mientras se dispone de ellos son suficientemente grandes, la producción llega a ser importante. Las plantas mayores, económicamente operables están en el volumen de producción de 300 a 350 ton/hr.

Complicados mecanismos computarizados se encargan de controlar el flujo de los materiales, los áridos son entregados en flujo continuo a razón de litros o kilos por segundo a una banda transportadora. Cada tolva tiene una compuerta que se abrirá tanto como lo requiera la curva granulométrica adecuada. La banda arroja los materiales al tambor secador; en este un potente succionador elimina el polvo en suspensión. Los áridos son secados y se calientan en este tambor y al salir son rociados mediante una tobera a presión con el volumen de asfalto requerido, este también caliente. Los agregados pintados con el asfalto caen en una tolva de donde son tomados por un elevador que contribuye a revolver y uniformizar la mezcla con los cangilones con los que esta dotado. La mezcla asciende y cae a depositarse en un silo de almacenamiento desde el que llegara a los vehículos para su transporte.

Aunque bien controladas las plantas continuas funcionan de manera impresionante, basta una pequeña falla para que una gran cantidad de mezcla asfáltica se eche a perder. Por ejemplo, si los áridos o el cemento asfáltico no están a la temperatura adecuada, la bomba del aspersor de asfalto funciona irregularmente, o el propio aspersor resulta obstruido, la mezcla obtenida resulta heterogénea, con partes secas, sin asfalto, porque no se adhirió a los áridos o el aglutinante. La gran velocidad de producción obliga a la empresa y a la supervisión a estar atentos a fin de detectar cualquier falla a tiempo.

El laboratorio juega un papel importante en todas las etapas de fabricación de una buena carpeta asfáltica. Desde la etapa de estudios para la ubicación del banco de préstamo hasta la explotación del mismo, ya que deben de indicar cual es el estrato mejor para las mezclas asfálticas, buscando siempre los materiales más compactos, menos fisurados y más sanos (que estén carentes de contaminación polvosa) Durante la trituración estarán atentos a las granulometrías que se obtengan, bien sea que se vaya a producir base asfáltica con tamaño máximo de agregados de 25 mm o carpeta con tamaño máximo de agregados de 19-13 mm, recomendando en su caso las separaciones por tamaños que resultan más convenientes para lograr que la planta de fabricación del concreto asfáltico produzca la mejor granulometría.

Así mismo probara la afinidad de los materiales de base asfáltica y carpeta con los productos asfálticos, especificando de ser necesarios los aditivos para mejorarla. A partir de una granulometría ideal obtenida en el laboratorio, llevaran a cabo las pruebas Marshall para conocer los resultados óptimos de:



- ✓ Estabilidad de la mezcla: que consiste en una prueba de resistencia a la compresión anular en muestras cilíndricas de dimensiones y fabricación especificadas
- ✓ Contenido óptimo de cemento asfáltico
- ✓ El porcentaje de vacíos de la muestra óptima (por Norma entre 2 y 4 %)
- ✓ Flujo de la muestra: es la deformación de la muestra cilíndrica bajo compresión anular al momento de la falla por ruptura (3-8 %)

Posteriormente se vigilara que en la planta de asfaltos el producto sea el especificado, que los materiales estén separados por tamaños conforme a sus recomendaciones y que se tenga previsto el aditivo para mejorar la afinidad del material pétreo con el cementante, si es requerido.

Participará en las pruebas de calibración de las plantas tratando de lograr que la curva granulométrica se apegue a la ideal obtenida en el laboratorio. También constatará que el asfalto y el aditivo se dosifiquen en las cantidades especificadas y ya sobre la mezcla producida hará ajustes al estudio de Marshall para hacer lo congruente con lo que la planta pueda fabricar realmente.

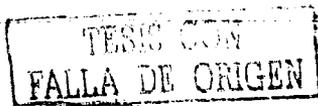
La mezcla en planta se lleva a cabo generalmente calentando el asfalto y también el agregado pétreo, ya sea en plantas de mezclado continuo o en plantas dosificadoras.

Plantas de mezclado continuo: los agregados básicos para la elaboración de la mezcla asfáltica, que generalmente se encuentran almacenados en bancos especiales y de fácil acceso a la planta de tratamiento, son introducidos al alimentador en frío, el cual consiste en una o más unidades subdivididas en compartimentos de paredes inclinadas que pueden dar cabida a varios tamaños de agregados, permitiendo de esta manera iniciar el ciclo continuo de trabajo para la elaboración del asfalto.

Una vez que el material es introducido en el alimentador se envía por medio de bandas transportadoras al secador con el fin de igualar la temperatura. Ya en el secador el flujo continuo de agregados recibe secado máximo mediante el contacto con la llama y los gases calientes, el secador consiste de un horno cilíndrico giratorio que lleva en uno de sus extremos el quemador de gas o aceite y en el otro un elevador circular para que los agregados ya calientes, sean dirigidos hacia el colector de polvos; este último es otro depósito cilíndrico cuya función es la de retirar el polvo adherido a los agregados por medio de la fuerza centrífuga y de aire inyectado a presión.

Posteriormente las cribas se encargan de clasificar los agregados y de enviarlos por medio de bandas transportadoras a los compartimentos de la tolva alimentadora, con el fin de abastecer continuamente la planta, esta tolva se controla por medio de un medidor automático que permite dosificar la mezcla deseada.

Finalmente los agregados que provienen de la tolva alimentadora, al igual que el asfalto proporcionado por una bomba y a una temperatura elevada, es recibida en una caja mezcladora, en donde por medio de unas espas se realiza el mezclado, descargando la mezcla en los camiones que lo distribuirán al lugar en donde se va a emplear.



Plantas dosificadoras. este tipo de plantas podrá ser basándose en volumen o peso. Cuando la dosificación de los agregados se hace por volumen, la mezcla no resulta de alta calidad a no ser que su control sea estricto. Debido a la incertidumbre de la dosificación por volumen, este tipo de mezclas resulta casi iguales a las elaboradas en el camino con mezcladora ambulante, por lo que su uso no se ha generalizado.

Por otra parte las mezclas dosificadas por peso en las plantas estacionarias generalmente emplean concretos asfálticos, los que debido a la precisión de su dosificación resultan de alta calidad. El agregado pétreo para la mezcla es secado y calentado entre los 133°C y los 177 °C en la planta antes de entrar en la mezcladora.

Después de calentado el agregado se cribara en los tamaños especificados que se depositaran en compartimentos listos para ser mezclados con el cemento asfáltico. Una vez calentados y separados los diversos tamaños de agregados se procederán a pensarlos exactamente, proporcionando sus cantidades de acuerdo al proyecto de manera que la mezcla resultante se ajuste a la granulometría especificada. El material pétreo dosificado se introduce en la mezcladora y a continuación se añade el cemento asfáltico para proceder al mezclado. El cemento asfáltico se calienta en pilas o tanques apropiados que produzcan calentamiento uniforme y no mayor de 177 °C. Las cantidades de cemento asfáltico deberán de fijarse según el proyecto. Antes de iniciar la construcción de la carpeta, la base hidráulica deberá estar totalmente impregnada y barrida para dejarla exenta de materiales y polvo.

Posteriormente se dará un riego de liga con una petrolizadora en toda la superficie que vaya a quedar cubierta con la carpeta y a lo largo del tramo que se vaya a trabajar, este riego deberá de aplicarse antes de iniciar el tendido de la carpeta basándose en asfalto del tipo FR-3 en proporción a lo marcado en el proyecto.

En este caso el ingeniero residente deberá de tener mucho cuidado para realizar estos trabajos y tener el control de los mismos. En el caso de la planta estacionaria o dosificadora se deberá de cuidar la temperatura de la mezcla, la cual deberá de estar entre los 120 °C y los 150 °C al salir de la misma. El concreto asfáltico deberá de transportarse en camiones de volteo con cajas metálicas, las cuales deberán de estar limpias para evitar que la mezcla se adhiera a la misma y la cuantificación en volumen varíe al momento de realizar el tendido. El camión al salir de la planta debe de ser cubierto con una lona en toda el área de la caja para que se conserve libre de polvo la mezcla, evitando también la perdida de calor durante el trayecto de la planta al lugar de tendido.

Tendido y compactación. El tendido se simplifica con el empleo de máquinas terminadoras Marca Finisher, con el uso de estas se tiende franjas solo limitadas por el tamaño de la máquina, en espesores que pueden variar en el caso de carpetas entre 2 cm para materiales finos y de 4 a 12 cm para los normales. En efecto hay terminadoras que permiten tirar anchos de 12 m aunque las comunes permiten tirar franjas del orden de 4.5 con el máximo de sus extensiones. Maquinas modernas permiten con elementos hidráulicos variar al antojo del operador el ancho de la franja entre su mínimo y su máximo simplemente pulsando los botones de control. Las pavimentadoras de asfalto constan de dos unidades básicas, que son el tractor y la regla emparejadora. las funciones principales del tractor son

recibir, entregar, dosificar y esparcir el asfalto que se recibe al frente de la maquina y se tiene que pasar a la parte delantera de la regla emparejadora. El tractor de igual forma remolca a la regla emparejadora, la cual tiene como función tender el asfalto al ancho y profundidad deseados y proveer el acabado inicial y la compactación.

El asfalto se puede suministrar a la pavimentadora mediante el empleo de un camión. Los camiones abastecedores son empujados por la pavimentadora con los rodillos de empuje que tienen en la parte delantera las cuales se ponen en contacto con las ruedas del camión abastecedor y lo empujan hacia adelante a medida que el camión va descargando el material dentro de la tolva de la pavimentadora. El residente de la obra debe checar la temperatura de la mezcla asfáltica al momento de la descarga a la tolva de la pavimentadora la cual deberá de ser como mínimo de 110 °C y será tomada con la ayuda de un termómetro de punta y registrada para llevar el control del proceso constructivo.

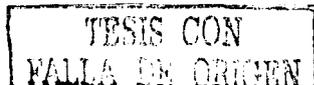
Si por alguna cuestión la mezcla asfáltica pierda temperatura, ya sea por el transcurso de la planta a la obra o por un mal tapado del camión que transporta a esta y la temperatura fuera inferior a 110 °C la mezcla deberá de ser devuelta a la planta o desechada; por lo cual deberá de tenerse comunicación constante con la planta para detener los acarrees si los tiempos de espera empiezan a incrementarse en la zona de tendido, ya sea por descomposturas en la maquinaria, lluvia inesperada o cualquier otro factor.

La maquina recibe al frente la mezcla enviada desde la planta, mediante un transportador de cadena lo remite a la parte posterior en donde un gusano sin fin lo distribuye a todo lo ancho de la misma y una placa que se mantiene caliente por medio de quemadores de diesel lo enrasa y mediante vibración lo acomoda uniformemente produciendo la primera compactación superficial al paso de la maquina; en caso de requerirse un grupo de personas utilizando rastrillos metálicos afina la capa, reduciendo espesores o recargando las zonas más bajas.

La placa enrasadora es controlada mediante tornillos que permiten afinar los espesores a los lados y al centro de la maquina permitiendo ajustarlos a medida que el tendido avanza. Si se necesitan ajustes para mantener o cambiar el espesor de la capa se deben de ejecutar en pequeños incrementos, los cambios del grueso de la capa se deben finalizar antes de ejecutar cualquier otro ajuste; esto produce transiciones suaves en el grueso de la capa y reduce la posibilidad de formar una capa ondulada debido al exceso de corrección y deberán de verificarse mediante el empleo de un escantillón marcado con el grueso de la capa, enterrándola en la capa tendida que va dejando la regla emparejadora.

Las juntas de construcción longitudinales cuando el tendido se realice en dos franjas con un intervalo de mas de un día deberá de ligarse con asfalto FR-3 antes de iniciar la otra franja de carpeta asfáltica, así como las juntas transversales deberán de recortarse a 45° antes de iniciar el siguiente tendido de la mezcla.

Una vez que la temperatura ha descendido a niveles adecuados (90 °C a 105 °C para el cemento número 6), se procede a la compactación inicial empleando aplanadora con rodillos en Tandem (dos rodillos lisos alineados) Si la temperatura es aun elevada, se observara que se forma un bordo adelante del rodillo frontal (corrimiento de la carpeta), si es baja, la huella de los rodillos es apenas visible; siendo correcta la temperatura si no hay presencia



## ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

de bordo y la huella dejada por las orillas de los rodillos se borra al pasar nuevamente el compactador.

Por último se emplearan planchas de rodillo liso para borrar las huellas que hayan dejado los compactadores neumáticos. Como ya se dijo el concreto asfáltico al momento de tenderse deberá tener una temperatura mínima de entre 100 °C y 110°C y al momento de terminar su compactación de 70 °C.

La aplanadora se moverá siempre de una orilla de la franja hacia la otra: si se trata de la segunda franja, la primera pasada montara la mitad del rodillo sobre la franja anterior y la otra sobre la nueva, a fin de garantizar que la zona de unión quede adecuadamente compactada. La aplanadora, una vez que ha terminado de cubrir la franja reiniciara el proceso para al menos dar dos pasadas a media huella, o sea montando el centro de los rodillos sobre la línea del borde de la pasada anterior.

Terminada la compactación inicial se hace entrar un compactador neumático autopropulsado con llantas que trabajando también a media huella pasara sobre la franja tantas veces como se requiera para obtener la compactación especificada (ordinariamente el 95% del peso volumétrico del material suelto determinado en la prueba Marshall)

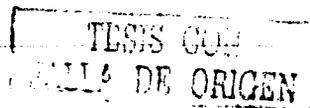
En la actualidad se cuenta con máquinas que cuentan con rodillos metálicos en tandem que pueden trabajar rodando simplemente o bien produciendo vibración en uno o en los rodillos; este equipo permite acelerar notablemente el proceso de compactación de la carpeta asfáltica.

El procedimiento consistirá en dar dos pasadas a media huella con los rodillos sin vibrar y a continuación dar de dos a cuatro vibrando en frecuencia de baja a media, si se realizan pruebas preliminares ayudara a ajustar el método. En este caso el uso del rodillo neumático seguirá siendo recomendado para asegurar el cierre de la estructura de la capa, posteriormente y para asegurar sobre todo que la zona de unión entre las franjas quedado adecuadamente cerrada se deberá proceder a añadir compactación en sentido transversal a todo el ancho de la zona. Este proceso se recomienda realizarse preferentemente al día siguiente de que se complete el ancho total de la carpeta, a medio día aproximadamente para aprovechar el calentamiento ocasionado por el sol.

Por lo anterior se destaca la conveniencia de reducir la longitud de las franjas tendidas en beneficio de lograr el ancho total en corto tiempo. Al terminar cada jornada el extremo longitudinal de las franjas deberá procurarse que no quede alineado a fin de evitar la coincidencia de la línea de unión.

Para dar por terminado el tramo deberá de hacerse un chaflán en las orillas y compactarlos así como verificar la alineación, perfil, sección, compactación, acabado y espesores de proyecto y obtener el reporte del laboratorio.

Una vez terminada la compactación y fría la mezcla se revisara la permeabilidad de la mezcla. Si el índice de permeabilidad de la carpeta una vez terminada es mayor de 10 deberá dársele un riego de sello, prestando especial atención a las zonas de unión entre franjas. Utilizando una broca cilíndrica abierta se obtendrán especímenes que permitirán revisar el grado de compactación alcanzado por comparación con el máximo del procedimiento Marshall. Adicionalmente servirá para observar la forma en que quedo



acomodada la mezcla comprobando que no haya habido clasificación de las partículas; de ser necesaria la muestra servirá para verificar la estabilidad.

Dentro de algunos de los problemas que se pueden presentar son los de calidad clasificados en dos tipos:

Originados por la calidad deficiente de los materiales tanto pétreos como asfálticos, los cuales se pueden apreciar en una curva granulométrica defectuosa, la cual puede deberse a las carencias de tamaños, para lo cual se debe de corregir la trituración o la separación por cribado. Otra forma de apreciar la mala calidad de la carpeta asfáltica ocurre por ruptura en las partículas gruesas durante la compactación, consecuencia de materiales blandos; generalmente en el límite de aceptación de la prueba de desgaste. De igual forma se puede presentar fraguado precipitado de la mezcla que puede ser por bajas temperaturas ambientales (no se recomienda tender mezcla debajo de los 18 °C) o por utilizar un cemento asfáltico del tipo rápido (del No 8 al No. 12)

Otra falla que normalmente se presenta es por fallas durante el proceso de fabricación y tendido, se tiene así una carpeta porosa por falta de control de la granulometría o una carpeta cerrada que es indicadora de exceso de finos. Así mismo se puede tener la carpeta abierta que es indicadora de falta de compactación. Si la falla no es producida por fallas de granulometría, recompactando con equipo neumático pesado en ambos sentidos se logra corregir la falla.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Capítulo

## III

# PAVIMENTOS RÍGIDOS

### III.1. MATERIALES QUE COMPONEN EL PAVIMENTO RÍGIDO.

#### III.1.1. CEMENTO PORTLAND

El cemento a utilizar para la elaboración del concreto será preferentemente Pórtland, de marca aprobada oficialmente, la cual deberá cumplir lo especificado en las normas NMX-C-414-1999-ONNCCCE. Si los documentos del proyecto o una especificación particular no señalan algo diferente, se emplearán los denominados CPO (Cemento Pórtland Ordinario) y CPP (Cemento Pórtland Puzolánico), dependiendo del caso y con sub-clasificación 3OR, 4O y 4OR. Estos tipos de cementos corresponden principalmente a los que anteriormente se denominaban como Tipo I y Tipo II.

Es importante que se cumpla con los requisitos físicos y químicos que se señalan en las cláusulas 4.01.02.004-B y 4.01.02.004-C de las Normas de Calidad de los Materiales de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT)

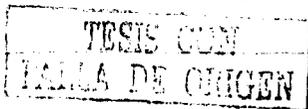
El cemento en sacos se deberá almacenar en sitios secos y aislados del suelo, en acopios de no más de siete metros de altura.

Si el cemento se suministra a granel, se deberá almacenar en sitios aislados de la humedad. La capacidad mínima de almacenamiento deberá ser la suficiente para el consumo de un día o una jornada de producción normal.

Todo cemento que tenga más de dos meses de almacenamiento en sacos o tres en silos, deberá ser examinado por el Supervisor del proyecto, para verificar si aún es susceptible de utilización.

#### III.1.2 AGUA

El agua que se emplee en la fabricación del concreto deberá cumplir con la norma NMX-C-122, debe ser potable, y por lo tanto, estar libre de materiales perjudiciales tales como aceites, grasas, materia orgánica, etc. En general, se considera adecuada el agua que sea apta para el consumo humano. No deberá contener cantidades mayores de las sustancias químicas que las que se indican en la tabla III.01, en partes por millón.



## ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

El contenido de sulfatos, expresado como  $SO_4 =$ , no podrá ser mayor de un gramo por litro (1 gr/l) Su determinación se hará de acuerdo con la norma American Society for Testing Materials (ASTM) D-516. Su contenido de ión cloro, determinado según norma ASTM D-512, no podrá exceder de seis gramos por litro (6 gr/l)

Substancias Perjudiciales	ppm máximo
Sulfatos (convertidos a $Na_2SO_4$ )	1,000
Cloruros (convertidos a NaCl)	1,000
Materia Orgánica (óxido consumido en medio ácido)	50
Turbiedad y/o lignito	1,500

El pH, medido según norma ASTM D-1293, no podrá ser inferior a 5 (cinco)

TABLA III.1. SUSTANCIAS PERJUDICIALES EN EL AGUA

### III.1.3 AGREGADOS

Estos materiales se sujetarán al tratamiento necesario para cumplir con los requisitos de calidad que se indican en cada caso, debiendo el contratista prever las características en el almacén y los tratamientos necesarios para su posterior utilización. El manejo y/o almacenamiento subsiguiente de los agregados deberá hacerse de tal manera que se eviten segregaciones o contaminaciones con sustancias u otros materiales perjudiciales; se deberá de tener una condición de humedad uniforme, antes de ser utilizados en la mezcla.

a) Grava. El agregado grueso será la grava triturada totalmente, con tamaño máximo de 38mm, resistencia superior a la resistencia del concreto, señalada en el proyecto, y con la secuencia granulométrica que se indica a continuación:

MALLA	% QUE PASA
2" 50.00mm	100
1 ½" 37.50mm	95 - 100
¾" 19.00mm	35 - 70
3/8" 9.50mm	10 - 30
Núm. 4 4.75mm	0 - 5

TABLA III. 2. GRANULOMETRÍA DE LA GRAVA

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

El contenido de substancias perjudiciales en el agregado grueso no deberá exceder los porcentajes máximos que se indican en la tabla III.3:

Substancias perjudiciales	%
Partículas deleznable	0.25
Partículas suaves	5.00
Pedernal como impureza	1.00
Carbón mineral y/o lignito	1.00

TABLA III. 3. SUSTANCIAS PERJUDICIALES EN LA GRAVA

El agregado grueso, además deberá cumplir con los siguientes requisitos de calidad:

- Desgaste "Los Ángeles" 40 % máximo
- Intemperismo acelerado 12% máximo (utilizando sulfato de sodio)

Cuando la muestra este constituida por material heterogéneo y se tengan dudas de su calidad, el especificador podrá ordenar que se efectúen pruebas de desgaste de los Ángeles, separando el material sano del material alterado o de diferente origen, así como pruebas en la muestra constituida por ambos materiales, en la que estén representados en la misma proporción en que se encuentren en los almacenamientos de agregados, ya tratados o en donde vayan a ser utilizados. En ninguno de los casos mencionados se deberán obtener desgastes mayores que cuarenta por ciento (40%).

En el caso de que se tengan dudas acerca de la calidad del agregado grueso, a juicio del Supervisor se llevará a cabo la determinación de la pérdida por intemperismo acelerado, la cual deberá ser mayor de doce por ciento (12%), en el entendido de que el cumplimiento de esta característica no excluye las mencionadas anteriormente.

b) Arena. El agregado fino o arena, deberá de tener un tamaño máximo de 9.51 mm con la secuencia granulométrica que se indica a continuación:

MALLA	% QUE PASA
3/8" (9.50mm)	100
Núm. 4 (4.75mm)	95 - 100
Núm. 8 (2.36mm)	80 - 100
Núm. 16 (1.18mm)	50 - 85
Núm. 30 (600mm)	25 - 60
Núm. 50 (300mm)	10 - 30
Núm. 100 (150mm)	2 - 10
Núm. 200 (75mm)	4 máximo

TABLA III.4. GRANULOMETRÍA DE LA ARENA

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

La arena deberá estar dentro de la zona que establece esta tabla, excepto en estos casos:

- Cuando se tengan antecedentes de comportamiento aceptables en el concreto elaborado con ellas, o bien, que los resultados de la prueba realizados a estos concretos sean satisfactorios; en este caso, los agregados se pueden utilizar siempre que se haga el ajuste apropiado al proporcionamiento del concreto, para compensar las deficiencias en la granulometría.
- El porcentaje de material que pasa la malla #200 está modificado según los límites de consistencia, lo cual se indica en la siguiente tabla:

Limite líquido	Índice plástico	Material máximo permisible en masa que pasa por la criba 0.075 (#200), en porcentaje
Hasta 25	Hasta 5	18
Hasta 25	5-10	16
Hasta 25	10-15	6
Hasta 25	15-20	4
Hasta 25	20-25	1
25-35	Hasta 5	16
25-35	5-10	14
25-35	10-15	11
25-35	15-20	8
25-35	20-25	1
35-45	Hasta 5	15
35-45	5-10	9
35-45	10-15	6
35-45	15-20	2
35-45	20-25	1
45-55	Hasta 5	9
45-55	5-10	8
45-55	10-15	5
45-55	15-20	4
45-55	20-25	1

TABLA III. 5 AJUSTE GRANULOMÉTRICO DE LA ARENA

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

La arena no deberá tener un retenido mayor de 45%, entre dos mallas consecutivas; además deberá cumplir con los siguientes requisitos de calidad:

- Equivalente de arena\*\* 80% máximo
- Módulo de finura 2.30 mínimo y 3.10 máximo
- Intemperismo acelerado 10% máximo (empleado sulfato de sodio)

\*\* Al ser modificado el porcentaje de material que pasa la malla #200, según los límites de consistencia, el equivalente de arena también debe ser modificado.

El contenido de sustancias perjudiciales en la arena no deberá exceder los porcentajes máximos siguientes:

Substancias perjudiciales	% máx
Partículas deleznable	1.00
Carbón mineral y/o lignito	1.00

TABLA III. 6. SUSTANCIAS PERJUDICIALES EN LA ARENA

En el caso de que se tengan dudas acerca de la calidad del agregado fino, a juicio de la Secretaría se llevará a cabo la determinación de la pérdida por intemperismo acelerado, la cual no deberá ser mayor de 10%, en el entendido de que esta condición no excluye las mencionadas anteriormente.

c) **Reactividad.** Deberá verificarse mediante análisis petrográficos y/o la prueba química rápida que los agregados (grueso y fino), para la elaboración de la mezcla de concreto, no sean potencialmente reactivos.

d) **Concreto** El diseño de la mezcla, utilizando los agregados provenientes de los bancos ya tratados, será responsabilidad del productor de concreto, quien tiene la obligación de obtener las resistencias y todas las demás características para el concreto fresco y endurecido, así como las adecuadas para lograr los acabados del pavimento. Durante la construcción, la dosificación de la mezcla de concreto hidráulico se hará en peso y su control durante la elaboración se hará bajo la responsabilidad exclusiva del Proveedor, es conveniente que el suministro se realice por los proveedores profesionales de concreto.

Especímenes de prueba: Se deberán de tomar muestras de concreto para hacer especímenes de prueba y determinar la resistencia a la flexión durante el colado. Especímenes de prueba adicionales podrán ser necesarios para determinar adecuadamente la resistencia del concreto, por temprana edad, limite a la apertura del pavimento al tránsito. El procedimiento seguido para el muestreo del concreto deberá cumplir con la norma ASTM C 172.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

La frecuencia de muestreo será de 6 especímenes para prueba de módulo de ruptura y 3 más para determinar el módulo elástico y resistencia a la compresión por cada 150 m<sup>3</sup> de producción de concreto. En el caso de la determinación del módulo de ruptura, se ensayarán dos especímenes a los 3 y 7 días de colado, y los otros dos restantes a los 28 días, en el caso de la determinación del módulo de elasticidad, resistencia a la compresión, se ensayará un espécimen por cada prueba a los 3 y 7 días de colado y el restante a los 28 días de transcurrido el colado.

La apertura al tránsito vehicular del pavimento no podrá realizarse antes de que el concreto haya alcanzado una resistencia a la tensión por flexión o Módulo de Ruptura del 75% como mínimo, de la especificada en el proyecto. En caso de ser necesario, con la ayuda de un consultor capacitado, se podrán revisar los esfuerzos actuantes a los que estará sometido el pavimento y se permitirá abrir al tráfico cuando la relación entre esfuerzo actuante y resistente sea de 0.5.

En la siguiente tabla se muestra algunos valores de Resistencia del concreto recomendado. Modulo de resistencia (MR)

Tipo de proyecto	MR kg/cm <sup>2</sup>
Autopistas y carreteras	48.00
Zonas industriales y urbanas	45.00
Urbanas secundarias	42.00

TABLA III.7. RESISTENCIA DEL CONCRETO RECOMENDADO.

e) Trabajabilidad. El revenimiento promedio de la mezcla de concreto deberá especificarse de acuerdo con el procedimiento de colocación a utilizar:

- Para tendido con cimbra deslizante deberá ser de 5cm ± 1.5cm al momento de su colocación.
- Para colados con cimbra fija deberá ser de 10cm ± 2cm al momento de su colocación.

Las mezclas que no cumplan con este requisito deberán ser destinadas a otras obras de concreto como cunetas y drenajes; no se permitirá su colocación para la losa.

El concreto deberá ser uniformemente plástico, cohesivo y manejable. El concreto manejable es definido como aquel que puede ser colocado sin que se produzcan demasiados vacíos en su interior y en la superficie y no debe presentar una apariencia pastosa.

Cuando aparezca agua, en la superficie del concreto, en cantidades excesivas después del acabado, se deberá efectuar inmediatamente una corrección por medio de una o más de las siguientes medidas:

- a) Rediseño de la mezcla.
- b) Adición de relleno mineral o de agregado fino.
- c) Incremento del contenido del cemento.
- d) Uno de un aditivo inclusor de aire o equivalente, previamente aprobado.

f) **Membrana de curado.** Para el curado de la superficie del concreto recién colado, deberá emplearse una Membrana de Curado de emulsión en agua y base de parafina de color claro, el que deberá cumplir con los requisitos de calidad que se describen en las normas ASTM C171, ASTM C309, Tipo 2, Clase A, ASSTHO M148, Tipo 2, Clase A, FAA Ítem P-610-2.10. Este tipo de membranas evitan que se tapen las espreas de los equipos de rociado.

Deberá aplicarse apropiadamente para proveer un sello impermeable que optimiza la retención del agua de la mezcla, el pigmento blanco refleja los rayos solares ayudando a mantener la superficie más fresca y prevenir la acumulación de calor.

g) **Acero de refuerzo.** El acero de refuerzo necesario para la construcción del pavimento se utiliza en las juntas, ya sea como pasadores de cortante, pasajuntas o como barras de amarre para mantener los cuerpos del pavimento unidos.

### III.2. DISEÑO DE UN PAVIMENTO RÍGIDO

#### III.2.1 VARIABLES DE DISEÑO.

Las variables de diseño se pueden agrupar de la forma siguiente:

- 1) Espesor
- 2) Serviciabilidad
- 3) Tráfico
- 4) Transferencia de carga
- 5) Propiedades del concreto
- 6) Resistencia de la sub-rasante
- 7) Drenaje
- 8) Confiabilidad

**ESPESOR.** El espesor del pavimento de concreto es la variable que se pretende determinar al realizar un diseño. El efecto del espesor se ve afectado por todas las demás variables que intervienen en los cálculos.

Es importante especificar lo que se diseña, ya que a partir de espesores regulares una pequeña variación puede significar una variación importante en la vida útil.

**SERVICIABILIDAD.** El procedimiento de Diseño de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) predice el porcentaje de pérdida de serviciabilidad ( $\Delta$  PSI) para varios niveles de tráfico y cargas de ejes. Entre mayor sea el  $\Delta$  PSI, mayor será la capacidad de carga del pavimento antes de fallar.

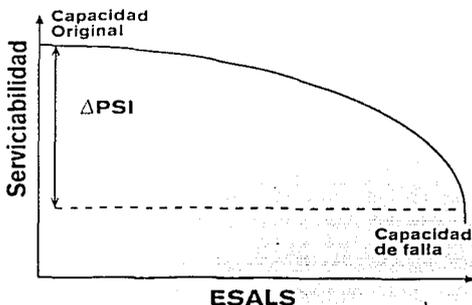


FIGURA III.1 GRAFICA DE SERVICIABILIDAD VS. (ESALS) EJES EQUIVALENTES

Índice de Servicio	Calificación
5	Excelente
4	bueno
3	Bueno
2	Regular
1	Malo
0	Intransitable

La serviciabilidad se define como la habilidad del pavimento de servir al tipo de tráfico (autos y camiones) que circulan en la vía, se mide en una escala del 0 al 5 en donde 0 (cero) significa una calificación para pavimento intransitable y 5 (cinco) para un pavimento excelente. La serviciabilidad es una medida subjetiva acerca del pavimento, sin embargo la tendencia es poder definirla con parámetros medibles, los son: el índice de perfil, índice de rugosidad internacional, coeficiente de fricción, distancias de frenado, visibilidad, etc.

Serviciabilidad inicial (Po)- Es la condición que tiene un pavimento inmediatamente después de la construcción del mismo.

Los valores recomendados por ASSTHO para este parámetro son:

- > Para pavimento de Concreto = 4.5
- > Para pavimento de Asfalto = 4.2

Usando buenas técnicas de construcción, el pavimento de concreto puede tener una serviciabilidad  $P_o = 4.7$  ó  $4.8$

Mientras mejor se construya inicialmente un pavimento, es decir, mientras mejor índice de serviciabilidad inicial tenga, mayor será su vida útil, porque las curvas de deterioro se comportan de manera paralela o con el mismo gradiente para unas condiciones determinadas, como se muestra en la siguiente grafica.

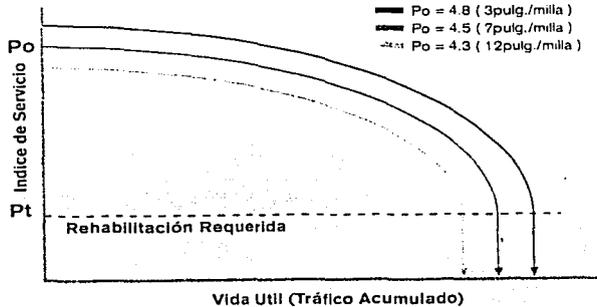


FIGURA III.2. GRAFICA DE ÍNDICE DE SERVICIO VS. VIDA ÚTIL.

Serviciabilidad Final (Pt)- La serviciabilidad final tiene que ver con la calificación que esperamos tenga el pavimento al final de su vida útil. Los valores recomendados de serviciabilidad final  $P_t$  para el caso de México, son:

- |                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| > Autopistas                     | 2.5 |
| > Carreteras                     | 2.0 |
| > Zonas industriales             | 1.8 |
| > Pavimentos Urbanos Principales | 1.8 |
| > Pavimentos Urbanos secundarios | 1.5 |

**TRÁFICO.** El tráfico es una de las variables más significativas del diseño de pavimentos y sin embargo es una de las que más incertidumbre presenta al momento de estimarse. Es importante hacer notar que debemos de contar con la información más precisa posible de tráfico para el diseño, ya que de no ser así podríamos tener diseños inseguros o con un grado importante de sobre diseño.

La metodología de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) considera la vida útil de un pavimento relacionada al número de repeticiones de carga que podrá soportar el pavimento antes de llegar a las condiciones de servicio final predeterminadas para el camino. El método ASSTHO utiliza en su formulación el número de repeticiones esperadas de carga de ejes equivalentes, debemos de transformar los ejes de Pesos Normales, de los vehículos que circularan por el camino en ejes equivalentes de 18 kips (8.2 ton) también conocidos como ESAL's.

El ASSTHO diseña los pavimentos de concreto por fatiga. La fatiga significa el número de repeticiones ó ciclo de carga y descarga que actúan sobre un elemento. Al establecer una vida útil de diseño, en realidad lo que se esta haciendo es tratar de estimar, en un periodo de tiempo el número de repeticiones de carga a las que estará sometido el pavimento.

La vida útil mínima que se debe de diseñar un pavimento rígido es de 20 años, es común realizar diseños para 30, 40 ó más de 50 años. También deberá de contemplar el crecimiento del tráfico durante su vida útil, que depende en gran medida del desarrollo económico-social de la zona en cuestión. Del mejoramiento de las características del pavimento se puede generar tráfico atraído e igualmente se debe considerar la capacidad de tráfico de la vía.

$$T_{vu} = T_{pa} \times FCT$$

Donde:

$T_{vu}$  = Tráfico en la vida útil

$T_{pa}$  = Tráfico durante el primer año

FCT = Factor de crecimiento del tráfico, que depende de la Tasa de Crecimiento Anual y de la vida útil.

Tasa de Crecimiento Anual Este tipo de tasa depende de algunos factores, como el desarrollo económico - social, la capacidad de la vía, etc.

Es normal que el tráfico vehicular vaya aumentando con el paso del tiempo, hasta que llega a un punto de saturación en el que se mantiene prácticamente sin crecer.

Es conveniente prever este crecimiento de tráfico, tomando en consideración una tasa de crecimiento anual con la que se calcula un factor de crecimiento del tráfico. La tasa de crecimiento puede variar de acuerdo a los tipos de vehículos, puede crecer más unos tipos que otros.

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

A medida que un camino se va congestionando de tráfico su crecimiento se va haciendo más lento, este efecto debemos considerarlo una Tasa de Crecimiento Equivalente, para considerar las variaciones en el crecimiento durante la vida útil. Es importante investigar adecuadamente la tasa de crecimiento apropiada para el caso particular que se esté considerando. A continuación se muestra algunos valores típicos de tasa de crecimiento, sin embargo estos puede variar según el caso.

<i>Caso</i>	<i>Tasa de crecimiento</i>
Crecimiento normal	1% a 3%
Vías complementarias Saturadas	0% a 1%
Con tráfico inducido*	4% a 5%
Alto crecimiento*	mayor al 5%

\* solamente durante 3 a 5 años

TABLA III.8. TASA DE CRECIMIENTO ANUAL

Factor de Crecimiento del Tráfico- El factor de crecimiento del tráfico considera los años de vida útil, más un número de años adicionales debidos al crecimiento propio de la vida.

$$FCT = \frac{(1-g)^n - 1}{g}$$

Donde:

g = Tasa de Crecimiento  
n = Años de Vida Útil

TABLA III.9 FACTOR DE CRECIMIENTO DEL TRAFICO

Factor de Sentido- Del total del tráfico que se estima para el diseño del pavimento deberá determinarse el correspondiente a cada sentido de circulación, esto se realiza mediante la introducción del Factor de Sentido, cuyos valores recomendados son:

- > Un sentido de Circulación                    1.0
- > Doble sentido de Circulación                2.0

Factor de Carril- El factor de carril es un coeficiente que nos permite estimar qué tanto del tráfico en el sentido de diseño circula por el carril de diseño. En una vía de un solo carril en el sentido de circulación de diseño, obviamente el 100% del tráfico circulará por ese carril que al mismo tiempo será nuestro carril, de diseño. En una vía con dos carriles en el sentido de diseño, dependiendo del tipo de camino, carretero o urbano, y de que tan

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

saturada esté la vía, es posible que sobre el carril de diseño circule entre un 50% a un 80% del tráfico en ese sentido.

El ASSTHO recomienda algunos valores, sin embargo no necesariamente deben utilizarse.

Número de carriles	Factor de carril
1	1.00
2	0.80 a 1.00
3	0.60 a 0.80
4	0.50 a 0.75

TABLA III. 10. FACTOR DE CARRIL

Factor de Equivalencia del Tráfico.- Las fórmulas que permiten convertir el número de ejes de pesos normales a ejes equivalentes dependen del espesor del pavimento, de la carga de eje, del tipo de eje y de la serviciabilidad final que pretendemos para el pavimento. A continuación se muestran dichas fórmulas.

$$Fec = \frac{W_{118}}{W_{1x}}$$

$$\text{Log } \frac{W_{1x}}{W_{118}} = 4.62 \text{Log}(18 + 1) - 4.62 \text{Log}(Lx + L_2) + 3.28 \text{Log}(L_2) + \frac{G_1}{Bx} - \frac{G_1}{B_{18}}$$

$$G_1 = \text{Log } \frac{4.5}{4.5} \frac{Pt}{1.5}$$

$$Bx = \frac{1 + 3.63(Lx + L_2)^{5.20}}{(D + 1)^{8.46} (L_2)^{3.52}}$$

Donde:

$W_{1x}$  = Número de aplicaciones de carga definida al final del tiempo t

$W_{118}$  = Número de aplicaciones de carga equivalente al final del tiempo t

$Lx$  = Carga de eje en kips

$L_2$  = Código de eje cargado:

$L_2 = 1$  Para eje sencillo

$L_2 = 2$  Para eje Tandem

$L_2 = 3$  Para eje Tridem

$G_1 = f(Pt)$

$B_{18}$  = Valor de Bx cuando  $L_x = 18$  y  $L_2 = 1$

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

Es importante hacer notar que los ejes equivalentes se calculan de manera diferente para un pavimento rígido que para uno flexible. Cuando se multiplica el tráfico por los diferentes factores de equivalencias, se obtienen los ESAL's (Ejes Sencillos Equivalentes).

El tráfico pesado es el que más daño produce a los pavimentos, por lo que se deberá estimar con la mayor precisión posible. Para citar un ejemplo diremos que el daño que produce una sola aplicación de carga de un camión semi-remolque de 36 ton., equivale al daño que producen 9,523 repeticiones de carga de un automóvil.

Otro factor importante a considerar es la sobrecarga. Debemos de conocer con certeza los pesos de los ejes de los vehículos que estarán circulando sobre el pavimento que estamos diseñando, ya que las sobrecargas generan un daño importante al pavimento y su crecimiento es de orden exponencial.

**TRANSFERENCIA DE CARGAS.** La transferencia de carga es la capacidad que tiene una losa del pavimento de transmitir fuerzas cortantes a sus losas adyacentes, con el objeto de minimizar las deformaciones y los esfuerzos en la estructura del pavimento, mientras mejor sea la transferencia de cargas mejor será el comportamiento de las losas del pavimento.

El método de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) considera la transferencia de cargas mediante el factor de transferencia de cargas  $J$ . La efectividad de la transferencia de cargas entre losas adyacentes depende de varios factores:

- Cantidad de tráfico
- Utilización de pasajuntas
- Soporte lateral de las losas

Una manera de transferir la carga de una losa a otra es mediante la trabazón de agregados que se genera en la grieta debajo del corte de la junta, sin embargo esta forma de transferir carga solamente se recomienda para vías con tráfico ligero.

La utilización de pasajuntas es la manera más conveniente de lograr la efectividad en la transferencia de cargas, los investigadores recomiendan evaluar dos criterios para determinar la conveniencia de utilizar pasajuntas. Utilizar pasajuntas cuando:

- a) El tráfico pesado sea mayor al 25% del tráfico total.
- b) El número de ejes equivalentes de diseño sea mayor de 5.0 millones de Esal's (ejes sencillos equivalentes)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El Coeficiente de transferencia de carga considera el esfuerzo de transferencia a través de la junta o grieta.

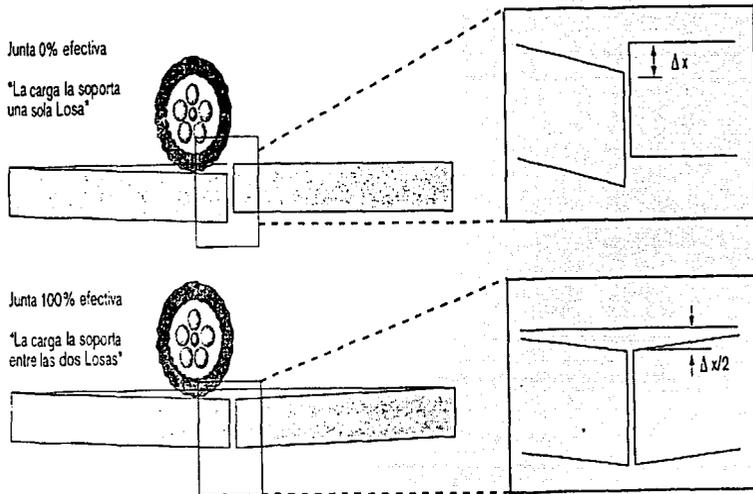
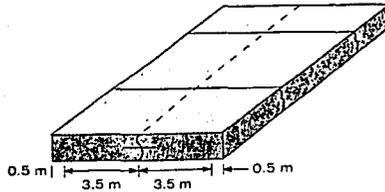


FIGURA III.3. EFICIENCIA DE LA JUNTA.

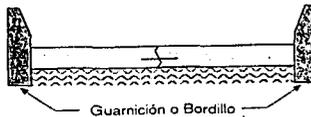
SE CON  
FALLA DE ORIGEN

Soporte lateral- El confinamiento que produce el soporte lateral contribuye a reducir los esfuerzos máximos que se generan en el concreto por efecto de las cargas. Un pavimento de concreto puede considerarse lateralmente soportado cuando tenga algunas de las siguientes características en su sección:

- Carril Ancho  $\geq 4.0$  m



- Confinamiento con Guarniciones o Banquetas



- Con Acotamientos Laterales

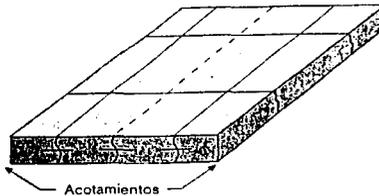


FIGURA III.4. CARACTERÍSTICAS DE LA SECCIÓN.

Pasajuntas.- Barra de acero redondo liso de  $f_y = 4,200 \text{ kg/cm}^2$ , que no se debe de adherir al concreto permitiendo el libre movimiento de losas longitudinalmente, pero si deben de transferir verticalmente parte de la carga aplicada en una losa a la adyacente. Se colocan perfectamente alineadas a la mitad del espesor de la losa.

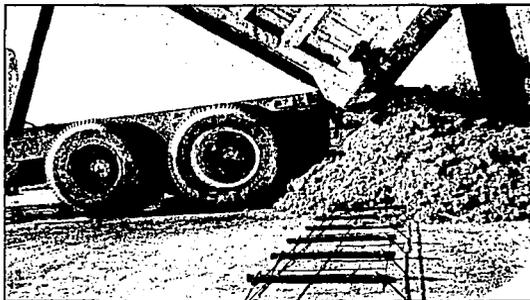


FIGURA III.5. PASAJUNTAS.

El diámetro, longitud y separación de las pasajuntas esta principalmente en función del espesor de las losas. Algunas recomendaciones prácticas para la selección de la Barra son las siguientes:

Espesor de Losa		Barras de Pasajuntas					
		Diámetro		Longitud		Separación	
mm	in	mm	in	cm	in	cm	in
13 a 15	5 a 6	19	3/4	41	16	30	12
15 a 20	6 a 8	25	1	46	18	30	12
20 a 30	8 a 12	32	1 1/4	46	18	30	12
30 a 43	12 a 17	38	1 1/2	51	20	38	15
43 a 50	17 a 20	45	1 3/4	56	22	46	18

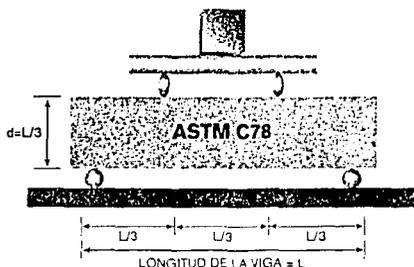
Propiedades del concreto. Son dos las propiedades del concreto que influyen en el diseño de un pavimento de concreto y en su comportamiento a lo largo de su vida útil:

- > Módulo de Ruptura (MR)
- > Módulo de Elasticidad del Concreto ( $E_c$ )

**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.**

**Módulo de Ruptura (MR).**- Debido a que los pavimentos de concreto trabajan principalmente a flexión, es recomendable que su especificación de resistencia sea acorde con ello, por eso el diseño considera la resistencia del concreto trabajando a flexión, que se le conoce como Módulo de Ruptura (MR) normalmente especificada a los 28 días.

El módulo de ruptura se mide mediante ensayos de vigas de concreto, aplicándoles cargas en los tercios de su claro de apoyo. Esta prueba esta normalizada por la ASTM C78.



**FIGURA III.6. PRUEBA PARA DETERMINAR EL MÓDULO DE RUPTURA.**

Los valores recomendados para el Módulo de Ruptura varían desde los 41 kg/cm<sup>2</sup> (583 psi) hasta los 50 kg/cm<sup>2</sup> (711 psi) a 28 días, dependiendo del uso que vayan a tener. Enseguida se muestran valores recomendados, que el diseñador deberá de elegir de acuerdo a un buen criterio.

Tipo de Pavimento	Modulo de ruptura (MR) recomendado	
	kg/cm <sup>2</sup>	Psi
Autopistas	48.0	682.7
Carreteras	48.0	682.7
Zonas industriales	45.0	640.1
Urbanas principales	45.0	640.1
Urbanas secundarias	42.0	597.4

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Módulo de Elasticidad. El Módulo de Elasticidad del concreto esta íntimamente relacionado con su Módulo de Ruptura y se determina mediante la norma ASTM C469. Existen varios criterios con los que se puede estimar el Módulo de Elasticidad a partir del Módulo de Ruptura. Los dos más utilizados son:

- >  $E_c = 6750 \times MR$
- >  $E_c = 26,454 \times MR^{0.77}$

Nota: Estas fórmulas se aplican con unidades inglesas.

**RESISTENCIA DE LA SUBRASANTE.** La resistencia de la sub-rasante es considerada dentro del método por medio del Módulo de Reacción del Suelo K, que se puede obtener directamente mediante la prueba de placa.

El módulo de reacción del suelo corresponde a la capacidad cortante que tiene el terreno natural en donde se soportará el cuerpo del pavimento. El valor del módulo de reacción (K) se puede obtener directamente del terreno mediante la prueba de placa ASTM D1195 y D 1196. El valor de K representa el soporte (terreno natural y terraplén, si lo hay) y se puede incrementar al tomar la contribución de la sub-base.

Cuando se diseña un pavimento es probable que se tenga diferentes valores de K a lo largo del tramo por diseñar, el método de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) recomienda utilizar el valor promedio de los módulos de K para el diseño estructural.

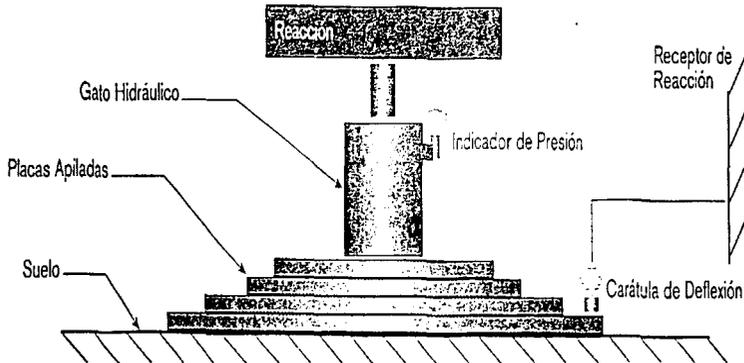


FIGURA III.7. PRUEBA DE LA PLACA.

**DRENAJE.** En cualquier tipo de pavimento, el drenaje, es un factor determinante en el comportamiento de su estructura a lo largo de su vida útil, y por lo tanto lo es también en el diseño del mismo. Es importante evitar que exista presencia de agua en la estructura de soporte, de presentarse esta situación afectará en gran medida la respuesta estructural del pavimento.

Enseguida se mencionaran algunos aspectos que debemos de cuidar para evitar que el agua penetre en la estructura de soporte:

- Mantener perfectamente selladas las juntas del pavimento.
- Sellar las juntas entre pavimento y acotamiento o cuneta.
- Colocar barreras rompedoras de capilaridad.
- Utilizar cunetas, bordillos, lavaderos, contracunetas, subdrenajes, etc.
- Construir o aprovechar los drenajes pluviales en las ciudades.

Tener agua atrapada en la estructura del pavimento produce efectos nocivos tales como:

- Reducción de la resistencia de los materiales granulares no ligados.
- Pérdida de la sub-rasante.
- Expulsión de finos.
- Levantamientos diferenciales de suelos expansivos.
- Expansión por congelamiento de suelo.

Algunos de estos fenómenos se pueden minimizar cuando se utilizan bases estabilizadas con cemento o bases de relleno fluido. Los valores recomendados para el coeficiente de drenaje deberán estar entre 1.0 y 1.10

**CONFIABILIDAD.** Los factores estadísticos que determinan el comportamiento de los pavimentos son:

- Confiabilidad (R)
- Desviación estándar

Confiabilidad- Es "la probabilidad de que un pavimento desarrolle su función durante su vida útil en condiciones adecuadas para su operación".

Clasificación funcional	Urbano	Rural
Autopistas	85% - 99.9%	89% - 99.9%
Arterias principales	80% - 99%	75% - 99%
Colectoras	80% - 95%	75% - 95%
Locales	50% - 80%	50% - 80%

TABLA III.11. CONFIABILIDAD RECOMENDADA POR ASSTHO.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

También se puede entender la confiabilidad como un Factor de Seguridad y ante esa situación se debe reflexionar en los valores de confiabilidad que se deben utilizar en México, con el mejor de los criterios, al hacer un diseño para un pavimento.

TIPO DE PAVIMENTO	CONFIABILIDAD R
Autopistas	95%
Carreteras	80%
Rurales	70%
Zonas industriales	65%
Urbanas principales	60%
Urbanas secundarias	50%

TABLA III. 12. CONFIABILIDAD RECOMENDADA PARA MÉXICO.

Como la Confiabilidad se puede relacionar con un Factor de Seguridad, se presentan los factores de seguridad aproximados a los que corresponde la confiabilidad. Estos factores de seguridad van asociados con la Desviación Estándar "So" (error estándar combinado)

Desviación Estándar "So"	50%	60%	70%	80%	90%	95%
0.30	1.00	1.19	1.44	1.79	2.42	3.12
0.35	1.00	1.23	1.53	1.97	2.81	3.76
0.39	1.00	1.26	1.6	2.13	3.16	4.38
0.40	1.00	1.26	1.62	2.17	3.26	4.55

TABLA III. 13. RELACIÓN ENTRE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR Y EL FACTOR DE SEGURIDAD.

$$FS_{ASSTHO} = 10^{(Z_r \cdot S_o)}$$

"Zr". Desviación estándar

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

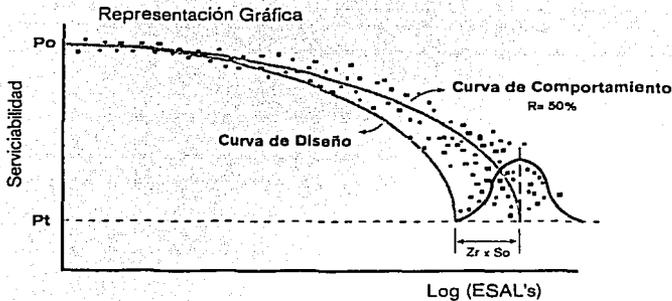


FIGURA III.8. GRAFICA DE SERVICIABILIDAD VS. EJES SENCILLOS EQUIVALENTES (ESAL's)

### III.2.2. TRÁNSITO

En esta sección se menciona algunos de los aspectos del tráfico y a la ingeniería de tránsito que debemos tomar en cuenta en el proyecto de una vialidad. El objetivo es que el diseñador conozca los fundamentos de la ingeniería de tránsito y que, cuando sea necesario profundizar en estos temas para complementar el diseño de una vialidad, pues ya con las bases serán más fáciles las consultas en publicaciones especializadas.

Enseguida se resalta con letra negrita la definición de Ingeniería de tránsito y más adelante la definición del proyecto geométrico

*a) Ingeniería de Tránsito* La Ingeniería de Transporte es la aplicación de los principios tecnológicos y científicos a la planeación, al proyecto funcional, a la operación y a la administración de las diversas partes de cualquier modo de transporte, con el fin de proveer la movilización de personas y mercancías de una manera segura, rápida, confortable, conveniente, económica y compatible con el medio ambiente.

La Ingeniería de Tránsito es aquella fase de la ingeniería de transporte que tiene que ver con la planeación, el proyecto geométrico y la operación del tránsito por calles y carreteras, sus redes, terminales, tierras adyacentes y su relación con otros modos de transporte.

Así define estas dos áreas el Instituto de Ingenieros del Transporte (ITE) Es decir, que el Proyecto Geométrico es una etapa de la Ingeniería de Tránsito, la cual es un subconjunto de la Ingeniería del Transporte.

El Proyecto geométrico de calles y carreteras es el proceso de correlación entre sus elementos físicos y las características de operación de los vehículos, mediante el uso de las matemáticas, la física y la geometría. En este sentido, vialidad queda definida, geoméricamente, por el proyecto de su eje en planta (alineamiento horizontal), y en perfil (alineamiento vertical), y por el proyecto de su sección transversal.

**b) Volumen de tránsito.**- Al proyectar una calle o carretera, la selección del tipo de vialidad, las intersecciones, los accesos y los servicios, dependen fundamentalmente del volumen del TRÁNSITO o demanda que circulará durante un intervalo de tiempo dado, de su variación, de su tasa de crecimiento y de su composición.

Los errores que se cometan en la determinación de estos datos ocasionará que la carretera o calle funcione con volúmenes de TRÁNSITO inferiores a los esperados, o mal, con problemas de congestionamiento por volúmenes de tránsito altos, superior a los proyectados.

Los estudios sobre volúmenes de tránsito son realizados con el propósito de obtener información relacionada con el movimiento de vehículos sobre puntos ó secciones específicas dentro de un sistema vial. Estos datos de volúmenes de tránsito son expresados con respecto al tiempo y de su conocimiento se hace posible el desarrollo de estimaciones razonables de la calidad de servicio prestado a los usuarios.

Se define como volumen de TRÁNSITO al número de vehículos que pasan por un punto o sección transversal dados los datos, de un carril o una calzada, durante un periodo determinado y se expresa como:

$$Q = \frac{N}{T}$$

Donde:

Q = Vehículos que pasan por unidad de tiempo  
(Vehículos/periodo)

N = Número total de vehículos que pasa (vehículos)

T = Período determinado (unidades de tiempo)

**b.1) Volúmenes de tránsito absolutos o totales.**- Es el número total de vehículos que pasan durante un lapso determinado, dependiendo de la duración de tal lapso determinado, se tienen los siguiente volúmenes de tránsito totales o absolutos:

- Tránsito anual (TA):  
Es el número total de vehículos que pasan durante un año.
- Tránsito mensual (TM):  
Es el número total de vehículos que pasan durante un mes.
- Tránsito semanal (TS):  
Es el número total de vehículos que pasan durante una semana.
- Tránsito diario (TD):  
Es el número total de vehículos que pasan durante un día.

## ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

- Tránsito horario (TH):  
Es el número total de vehículos que pasan durante una hora.
- Tasa de flujo o flujo (q):  
Es el número total de vehículos que pasan durante un periodo inferior a una hora.

b.2) Volúmenes de Tránsito Promedio Diarios.- Se define el volumen de Tránsito promedio diario (TPDI), como el número total de vehículos que pasan durante un periodo dado (en días completos) igual o menor a un año y mayor que un día, dividido entre el número de días del periodo.

De acuerdo al número de días de este periodo, se presentan los siguientes volúmenes de tránsito promedio diarios, dados en vehículos por día:

- Tránsito promedio diario anual (TPDA):  
 $TPDA = TA/365$
- Tránsito promedio diario mensual (TPDM):  
 $TPDM = TM/30$
- Tránsito promedio diario semanal (TPDS):  
 $TPDM = TS/7$

b.3) Características de los Volúmenes de Tránsito. Los volúmenes de tránsito siempre deben ser considerados como dinámicos, por lo que solamente son precisos para el periodo de duración de los aforos. Sin embargo, debido a que sus variaciones son generalmente rítmicas y repetitivas, es importante tener un conocimiento de sus características para programar aforos, relacionar volúmenes en un tiempo y lugar con volúmenes de otro tiempo y lugar, así como prever, con la debida anticipación, la actuación de las fuerzas dedicadas al control del tránsito, la labor preventiva y la de conservación.

Por lo tanto es fundamental, en la planeación y operación de la circulación vehicular, conocer las variaciones periódicas de los volúmenes de tránsito dentro de las horas de máxima demanda, durante el día, la semana y los meses del año; aún mas, también es importante conocer las variaciones de los volúmenes de tránsito en función de su distribución por carriles, su distribución direccional y su composición.

Distribución y Composición del Volumen de Tránsito. La distribución de los volúmenes de tránsito por carriles debe ser considerada, tanto en el proyecto como en la operación en un sentido, el flujo se asemeja a una corriente hidráulica. Así, al medir los volúmenes del tránsito por carril, en zona urbana, la mayor velocidad y capacidad se logra, generalmente, en el carril del medio; las fricciones laterales, como paradas de autobuses y taxis y las

vueltas izquierdas y derechas causan un flujo mas lento en los carriles extremos, llevando el menor volumen el carril cercano a la acera.

En carretera, a volúmenes bajos y medios suele ocurrir lo contrario, por lo que se reserva el carril cerca de la faja separadora central para vehículos más rápidos y para rebases, y se presentan mayores volúmenes en el carril inmediato al acotamiento. En autopistas de tres carriles con altos volúmenes de tránsito, rurales o urbanas, por lo general hay mayores volúmenes en el carril inmediato a la faja separadora central.

En cuanto a la distribución direccional, en las calles que comunican el centro de la ciudad con la periferia de la misma, el fenómeno común que se presenta en el flujo de tránsito es de volúmenes máximos hacia el centro en la mañana y hacia la periferia en la tarde y noche. Es una situación semejante al flujo y reflujo que hay los fines de semana, cuando los vacacionistas salen de la ciudad el viernes o sábado y regresan el domingo en la tarde. Este fenómeno se presenta, especialmente, en arterias de tipo radial.

En cambio, ciertas arterias urbanas que comunican a centros importantes, no se registran variaciones direccionales marcadas en los volúmenes de tránsito. Un ejemplo de éstos puede citarse en el caso del Anillo Periférico de la Ciudad de México, en su tramo entre el Viaducto y Naucalpan, tanto en las horas de máxima demanda de la mañana como en la tarde, no hay mucha diferencia entre los volúmenes entre uno u otro sentido, porque la distribución direccional es equilibrada.

En los estudios de volúmenes de tránsito es útil conocer la composición y variación de los distintos tipos de vehículos. La composición vehicular se mide en términos de porcentaje sobre el volumen total. Por ejemplo, porcentaje de automóviles, de autobuses y de camiones. En los países mas adelantados, con un mayor grado de motorización, los porcentajes de autobuses y camiones en los volúmenes de tránsito son bajos.

En cambio, en países con menor grado de desarrollo, el porcentaje de estos vehículos grandes y lentos es mayor. En nuestro medio, a nivel rural es común encontrar porcentajes típicos o medios del orden del 60 % en automóviles, 10 % en autobuses y 30 % en camiones, con variaciones de + 10 % dependiendo del tipo de carretera, la hora del día y día de la semana.

Variación Diaria del Volumen del Tránsito.- Se han estudiado cuáles son los días de la semana que llevan los volúmenes normales de tránsito. Para carreteras principales, de lunes a viernes los volúmenes son estables; los máximos se registran, generalmente, durante el fin de semana, ya sea el sábado o el domingo, debido a que durante estos días, por esta carretera, circula una alta demanda de usuarios de tipo turístico y recreacional.

En carreteras secundarias de tipo agrícola, los máximos volúmenes se presentan entre semana. En las calles de la ciudad, la variación de los volúmenes de tránsito diario no es pronunciada entre semana, están más o menos distribuidos en los días laborables, sin embargo, los más altos volúmenes ocurren el viernes. También vale la pena mencionar con referencia a la variación diaria de los volúmenes de tránsito tanto en el ámbito urbano como rural, que se presentan máximos en aquellos días de eventos especiales, como Semana Santa, Navidad, fin de año, competencias deportivas nacionales e internacionales, etc.

Variación Mensual del Volumen de Tránsito. Hay meses que las calles y carreteras presentan variaciones notables del volumen. Los más altos volúmenes de tránsito se registran en Semana Santa, en las vacaciones escolares y a fin de año, por las fiestas y vacaciones navideñas.

Los volúmenes de tránsito promedio diarios que caracterizan cada mes son diferentes, dependiendo, también de la categoría y del tipo de servicio que presten las calles y carreteras. Sin embargo, no es grande el patrón de variación de cualquier vialidad de año a año, a menos que ocurran cambios importantes en suelo, en los usos de la tierra, o se construyan nuevas calles o carreteras que funcionen como alternas.

#### b.4) Volúmenes a Futuro.

➤ Relación entre los volúmenes de tránsito promedio diario, anual y semanal.

El comportamiento de cualquier fenómeno o suceso estará mucho mejor caracterizado cuando se analiza todo su universo. En este caso, el tamaño de su población está limitado en el espacio y en el tiempo por las variables asociadas al mismo.

Con respecto a volúmenes de tránsito, para obtener el tránsito promedio diario anual, (TPDA), es necesario disponer del número total de vehículos que pasan durante el año por el punto de referencia, mediante aforos continuos a lo largo de todo el año, ya sea en períodos horarios, diarios, semanales o mensuales. Muchas veces esta información anual es difícil de obtener, al menos en todas las vialidades, por los costos que ello implica; sin embargo, se pueden obtener datos en las casetas de cobro para las carreteras de cuota y mediante contadores automáticos instalados en estaciones maestras en la mayoría de las carreteras de la red vial primaria de la nación.

En estos casos, muestras de los datos, sujetas a la misma técnica de análisis, permiten generalizar el comportamiento de la población. No obstante, antes que los resultados se puedan generalizar, se debe analizar la variabilidad de la muestra para así estar seguros, con cierto nivel de confiabilidad, que ésta se puede aplicar a otro número de casos no incluidos y que conforman parte de las características de la población.

Por lo anterior, en el análisis de volúmenes de tránsito, la media poblacional o tránsito promedio diario anual, (TPDA), se estima con base en la media muestral ó tránsito promedio diario semanal, (TPDS), según la siguiente expresión:

$$TPDA = TPDS \pm A$$

Donde:

A = Máxima diferencia entre el TPDA y el TPDS

## ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

El valor de A, sumado o restado del TPDS, define el intervalo de confianza dentro del cual se encuentra el TPDA. Para un determinado nivel de confianza, el valor de A es:

$$A = K E$$

Donde:

K = Número de desviación estándar correspondiente al nivel de confiabilidad deseado.

E = Error estándar de la media.

Estadísticamente se ha demostrado que las medidas de diferentes muestras, tomadas de la misma población, se distribuyen normalmente alrededor de la media poblacional con una desviación estándar equivalente al error estándar. Por lo tanto también se puede expresar que:

$$E = \sigma^1$$

Donde:

$\sigma^1$  = Estimado de la desviación estándar poblacional

$$\sigma^1 = \frac{S}{(n)^{1/2}} \left\{ \frac{(N-n)}{(N-1)} \right\}^{1/2}$$

Donde:

S = Desviación estándar de la distribución de los volúmenes de tránsito, desviación estándar muestral.

n = Tamaño de la muestra en número de días de aforo.

N = Tamaño de la población en número de días del año.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La desviación estándar muestral,  $S$ , se calcula como:

$$S = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (TD_i - TPDS)^2}{n - 1} \right\}^{1/2}$$

Donde:

$TD_i$  = Volumen de tránsito del día  $i$ .

Finalmente la relación entre los volúmenes de tránsito promedio diario anual y semanal es:

$$TPDA = TPDS \pm A$$

$$TPDA = TPDS \pm KE$$

$$TPDA = TPDS \pm K\alpha^1$$

Pronóstico de Volúmenes de Tránsito Futuro.- El pronóstico de volumen de tránsito futuro, por ejemplo el  $TPDA$  del año de proyecto, en el mejoramiento de una carretera existente o en la construcción de una nueva, deberá basarse no solamente en los volúmenes actuales, sino también en los incrementos del tránsito que se espera utilicen la nueva carretera.

Tránsito Actual. El Tránsito Actual (TA) es el volumen de tránsito que usará la carretera mejorada, o la nueva carretera, en el momento de quedar completamente en servicio. En el mejoramiento de una carretera existente, el tránsito actual se compone del tránsito existente (TE) antes de la mejora, más el tránsito atraído ( $TA_t$ ) a ella de otras carreteras, una vez finalizada su reconstrucción total. En el caso de la apertura de una nueva carretera, el tránsito actual se compone completamente de tránsito atraído.

El tránsito actual (TA) se puede establecer a partir de aforos vehiculares sobre las vialidades de la región que influyan en la nueva carretera, estudios de origen y destino, o utilizando parámetros socioeconómicos que se identifiquen plenamente con la economía de la zona. En áreas rurales, cuando no se dispone de estudios de origen y destino ni datos de tipo económico para estudios preliminares, es suficiente la utilización de las series históricas de los aforos vehiculares en términos de los volúmenes de tránsito promedio diario anual (TPDA) representativos cada año. De esta manera, el Tránsito Actual (TA) se expresa como:

$$TA = TE + TA_t$$

Para la estimación del tránsito atraído (TAt) se debe tener un conocimiento completo de las condiciones locales, de los orígenes y destinos vehiculares y del grado de atracción de todas las vialidades comprendidas. A su vez, la cantidad de tránsito atraído depende de la capacidad y de los volúmenes de las carreteras existentes, así por ejemplo, si están congestionadas o saturadas, la atracción será mucho más grande. Los usuarios, componentes del tránsito atraído a una nueva carretera no cambian ni su origen, ni su destino, ni su modo de viaje, pero la eligen motivados por una mejora en los tiempos de recorrido, en la distancia, en las características geométricas, en la comodidad y en la seguridad. Como no se cambia su modo de viaje, a esté volumen de tránsito también se le denomina tránsito desviado.

Incremento del Tránsito. - El incremento del tránsito (IT) es el volumen de tránsito que se espera use la nueva carretera, en el año futuro seleccionado como de proyecto. Este incremento se compone del crecimiento normal del tránsito (CNT), del tránsito generado (TG) y del tránsito desarrollado (TD)

El crecimiento normal del tránsito (CNT) es el incremento del volumen de tránsito debido al aumento normal en el uso de los vehículos. El deseo de las personas por movilizarse, la flexibilidad ofrecida por el vehículo y la producción industrial de más vehículos cada día, hacen que esta componente del tránsito siga aumentando. Sin embargo, deberá tenerse cuidado en la utilización de los indicadores del crecimiento del parque vehicular nacional para propósito de proyecto, ya que no necesariamente reflejan las tasas de crecimiento en el área local bajo estudio, aunque sí existe cierta correlación entre el crecimiento del parque vehicular y el crecimiento del TPDA.

El tránsito generado (TG) consta de aquellos viajes vehiculares, distintos a los del transporte público, que no se realizarían si no se construyera la nueva carretera. El tránsito generado se compone de tres categorías: el tránsito inducido o nuevos viajes no realizados previamente por ningún modo de transporte; el tránsito convertido o nuevos viajes no realizados previamente por ningún modo de transporte; el tránsito convertido a nuevos viajes que previamente se hacían masivamente en taxi, autobús, tren, avión o barco y que por razón de la nueva carretera se harían en vehículos particulares y el tránsito trasladado, consistente en viajes previamente hechos a destinos completamente diferentes, atribuibles a la atracción de la nueva carretera y no al cambio en el uso del suelo. Al tránsito generado se le asignan tasas de incremento entre el 5 y el 25 % del tránsito actual, con un período de generación de uno o dos años después de que la carretera ha sido abierta al servicio.

El tránsito desarrollado (TD) es el incremento del volumen de tránsito debido a las mejoras en el suelo adyacente a la carretera. A diferencia del tránsito generado, el tránsito desarrollado continua actuando por muchos años después de que la nueva carretera ha sido puesta al servicio. El incremento del tránsito debido al desarrollo del suelo adyacente forma parte del crecimiento normal del tránsito, por lo tanto éste no se considera como una parte del tránsito desarrollado. Pero la experiencia indica que en las carreteras construidas con altas especificaciones, el suelo lateral tiende a desarrollarse

más rápidamente de lo normal, generando valores del orden del 5% del tránsito actual. El incremento del tránsito (IT) se expresa así:

$$IT = CNT + TG + TD$$

Tránsito a futuro. Los volúmenes de tránsito futuro (TF), esperado al final del período o año meta seleccionado, para efectos de proyecto, se derivan a partir del tránsito actual (TA) y del incremento del tránsito (IT) Por lo tanto se plantea:

$$TF = TA + IT$$

Sustituyendo en la ecuación del tránsito futuro (TF), encontramos que:

$$TF = TA + IT$$

$$TF = (TE + TA) + (CNT + TG + TD)$$

En la figura siguiente se presentan de manera gráfica los componentes de volumen de tránsito futuro.

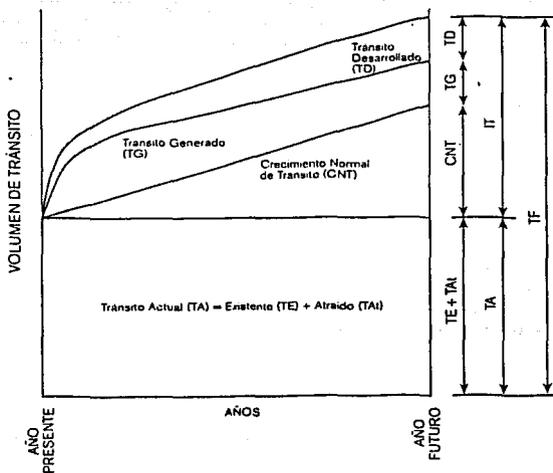


FIGURA III.9. EVOLUCIÓN DEL VOLUMEN DE TRÁNSITO.

### III.2.3 SUELO

En el diseño de pavimentos, es fundamental conocer las propiedades de los suelos que nos permiten entender sus características generales y sus comportamientos. Algunas de estas propiedades se obtienen mediante las pruebas siguientes:

a) **PLASTICIDAD.** Es la capacidad de deformación de los suelos, hasta cierto límite, sin romperse. Por medio de ella se mide el comportamiento de los suelos en todas las épocas. Las arcillas presentan esta propiedad en grado variable. Para conocer la plasticidad de un suelo se usan los límites de Atterbergg:

Límite líquido (LL), Límite Plástico (LP) y Límite de Contracción (LC) Mediante ellos se puede conocer el tipo de suelo en estudio. Todos los límites de consistencia se determinan empleando suelo que pasa por la malla No. 40. La diferencia entre los valores del límite líquido y del límite plástico da como resultado el índice plástico (IP) del suelo.

#### 1) Límite líquido.

Se define como el porcentaje de humedad con respecto al peso seco de la muestra, con el cual el suelo cambia del estado líquido al plástico. De esta forma, los suelos plásticos tienen en el límite líquido una resistencia pequeña al esfuerzo de corte y según Atterberg es de 25 g/cm<sup>2</sup>. El procedimiento para determinar el límite líquido de un suelo es:

- a) Se toman 100 g. de material que pasa la malla No. 40, se colocan en una cápsula de porcelana y con una espátula se hace una mezcla pastosa, homogénea y de consistencia suave, agregándole una pequeña cantidad de agua durante el mezclado.
- b) Se coloca un poco de esta mezcla en la copa de Casagrande, formando una masa alisada de un espesor de 1cm en la parte de máxima profundidad.
- c) El suelo colocado en la copa de Casagrande se divide en la parte media en dos porciones, utilizando un ranurador.
- d) Se acciona la copa a razón de dos golpes por segundo, contando el número de golpes necesarios para que la parte inferior del talud de la ranura hecha se cierre precisamente a 1,27cm (1/2") Si no se cierra entre los 6 y 35 golpes, se recoge el material y se le añade agua y se vuelve a mezclar.
- e) Cuando se cierra en un número de golpes entre los 6 y los 35, se toman 10 g., aproximadamente de suelo en la zona próxima a la ranura cerrada y se determina el contenido de agua de inmediato. Se repite el ensaye y si se obtiene el mismo número de golpes que el primero o no hay diferencia en más de un golpe, se repite el ensaye hasta que tres ensayes consecutivos den una serie conveniente de números.
- f) Se repiten los pasos del b) al e), teniendo el suelo otros contenidos de humedad. De este modo se deben tener, por lo menos, dos grupos de dos a tres contenidos de humedad, uno entre los 25 y 35 golpes y otro entre los 6 y los 10 golpes con el fin de que la curva de fluidez no se salga del intervalo en que puede considerarse recta, según lo expresa Casagrande.

- g) Se unen los tres puntos marcados por el intervalo de 6 a 20 golpes con una línea recta y se señala el punto medio. Se repite para los dos o tres puntos dentro del intervalo de 25 a 35 golpes.
- h) Se conectan los puntos medios con una línea recta que se llama curva de fluidez. El contenido de humedad indicado por la intersección de esta línea a 25 golpes es el límite líquido.

## 2) Límite Plástico.

Es el porcentaje de humedad, con respecto al peso seco de la muestra secada al horno, para el cual los suelos cohesivos pasan de un estado semisólido a un estado plástico. El límite plástico se determina con el material sobrante del límite líquido. Y al que se evapora la humedad por mezclado, hasta obtener una mezcla plástica que sea moldeable. Se forma una pequeña bola que deberá enrollarse enseguida aplicando la suficiente presión a efecto de formar filamentos.

Cuando el diámetro del filamento resultante sea de 3.17mm (1/8") sin romperse se continuará hasta que, cuando al rodillar la bola de suelo, se rompa el filamento al diámetro de 1/8". Se toman los pedacitos se pesan, se secan al horno en un vidrio, vuelven a pesarse ya secos y se determina la humedad correspondiente al límite plástico.

$$L.P. = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100$$

Donde:

L.P. = Humedad correspondiente al límite plástico en %.

Ph = Peso de los filamentos húmedos en gramos.

Ps = Peso de los filamentos secos en gramos.

**b) PRUEBA PROCTOR.** La prueba Proctor se refiere a la determinación del peso por unidad de volumen de un suelo que ha sido compactado por el procedimiento definido para diferentes contenidos de humedad. Su objetivo es determinar el peso volumétrico seco máximo  $\gamma_{máx}$  que puede alcanzar un material y la humedad óptima  $w_o$  a que deberá hacerse la compactación; determinar también, el grado de compactación alcanzado por el material durante la construcción o cuando ya se encuentre construidos los caminos, relacionando el peso volumétrico obtenido en el lugar con el peso volumétrico máximo Proctor.

La prueba Proctor está limitada a los suelos que pasen totalmente la malla No. 4, o que, cuando mucho, tengan un retenido de 10% y que este retenido pase totalmente por la malla 3/8". Cuando el material tenga retenido en la malla 3/8", debe de determinarse la humedad óptima y el peso volumétrico seco máximo con la prueba de Porter Estándar, en lugar de determinarlos con la prueba Proctor, así como también cuando se trate de arenas de río, arenas producto de trituración, tezontles arenosos y en general en todos aquellos materiales que carezcan de cementación.

Procedimiento.

Se toma 3 kg de material previamente secado al sol. Se tamiza por la malla No. 10 y los grumos que se hayan retenido se disgregan perfectamente; se vuelve a tamizar por la misma malla, continuándose este proceso hasta que las partículas que se retengan en la malla no se puedan disgregar. Terminada esta operación se mezcla perfectamente todo el material con la cantidad de agua necesaria para iniciar la prueba. El agua que se adiciona deberá ser la necesaria para que una vez repartida uniformemente, presente una consistencia tal que al ser comprimido en la palma de la mano no deje partículas adheridas a ella ni la humedezca, y que a la vez el material comprimido pueda tomarse con dos dedos sin que se desmorone.

El material que contiene ya la humedad necesaria para iniciar la prueba se tamiza por la malla No. 4, se mezcla para homogeneizarlo y se compacta en el molde cilíndrico en tres capas aproximadamente iguales.

El pisón metálico se deja caer desde una altura de 30 cm. Deberán de darse 30 golpes repartidos uniformemente para apisonar cada capa. Una vez apisonada la última capa se remueve la extensión, eliminándose el excedente de material del molde cilíndrico y se pesa su contenido. A continuación se extrae la muestra compactada del cilindro y se pone a secar una pequeña cantidad de su centro para determinar su humedad.

La muestra que ha sido removida del molde cilíndrico se desmenuza hasta que pasa la malla No. 4, se añaden 60 ml de agua (20% en peso) y se repite el procedimiento descrito. Este tipo de determinaciones continúa hasta que la muestra esté húmeda y se presente una disminución apreciable en el peso del suelo compactado.

El peso volumétrico húmedo para cada contenido de humedad se calcula con la siguiente fórmula:

$$\gamma_h = \frac{P_h}{V_t}$$

Donde:

$\gamma_h$  = Peso volumétrico húmedo en g/cm<sup>3</sup>

$P_h$  = Peso del material húmedo compactado en el molde, en gramos.

$V_t$  = Volumen del molde en cm<sup>3</sup>

El contenido de humedad se calcula con la siguiente fórmula:

$$w = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$

El peso volumétrico seco para cada peso volumétrico húmedo y su correspondiente humedad se calculan por la siguiente fórmula:

$$\gamma_s = \frac{\gamma_h}{1 + \frac{w}{100}}$$

Donde:

- w = Contenido de la humedad en porcentaje
- P<sub>w</sub> = Peso de la muestra húmeda en gramos
- P<sub>s</sub> = Peso de la muestra seca, en gramos
- γ<sub>s</sub> = Peso volumétrico seco, g/cm<sup>3</sup>
- γ<sub>h</sub> = Peso volumétrico húmedo en g/cm<sup>3</sup>

Los pesos volumétricos secos y las humedades correspondientes se utilizan para trazar la curva de peso volumétrico seco-humedad, marcando en el eje de las abscisas los contenidos de humedad. La humedad que genera mayor peso volumétrico es la que permite la mayor compactación del material y se le conoce como humedad óptima de compactación. En la misma gráfica se dibuja la curva de saturación teórica. Esta curva representa la humedad para cualquier peso volumétrico, necesaria para que todos los vacíos que dejan entre sí las partículas sólidas estuvieran llenos de agua.

## Prueba Proctor

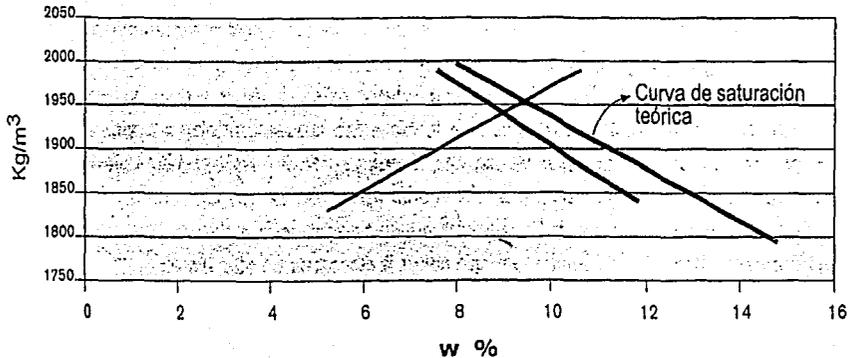


FIGURA III.10. PRUEBA PROCTOR

El peso volumétrico seco correspondiente a la curva de saturación teórica para la humedad se calcula con la fórmula:

$$Y_{scs} = \frac{100D_a}{100 + w_{Dr}} \times 100 (\text{kg/m}^3)$$

Donde:

$Y_{scs}$  = Peso volumétrico seco de la curva de saturación ( $\text{kg/cm}^3$ )

$D_a$  = Densidad absoluta del material que pasa la malla No. 400 en  $\text{g/cm}^3$

$D_r$  = Densidad relativa del material que pasa por la malla No. 40

La curva de saturación teórica tiene por objeto comprobar si la prueba proctor fue correctamente efectuada, ya que la curva de saturación y la curva proctor nunca deben cortarse porque, en la práctica, es imposible llenar totalmente con agua los huecos que dejan las partículas del suelo compactado.

La curva de saturación teórica sirve para determinar si un suelo, en el estado en que se encuentra, es susceptible de adquirir, fácilmente, mayor humedad o mayor peso volumétrico.

Así, una vez hecha la determinación del peso volumétrico y humedad en el lugar se calcula el (%) de huecos llenos de aire con la siguiente fórmula:

$$V_a = \frac{\gamma_{sec} - \gamma_s}{\gamma_s} \times 100$$

Donde:

$V_a$  = Volumen llenos de huecos de aire %.

$\gamma_{sec}$  = Peso volumétrico seco de suelo compactado correspondiente a la humedad  $w$ .

$\gamma_s$  = Peso volumétrico de la curva de saturación teórica correspondiente a la humedad  $w$ .

Si este valor es mayor de 6.5%, el suelo se encuentra en condiciones de adquirir un peso volumétrico mayor con la humedad que contiene; o bien, sin variar su peso volumétrico seco, incrementar su humedad.

#### Prueba Porter estándar.

Esta prueba determina el peso volumétrico seco máximo de compactación Porter y la humedad óptima en los suelos con material mayor de 3/8" y los cuales no se le pueden hacer la prueba Proctor. Esta prueba sirve también para determinar la calidad de los suelos en cuanto a su valor de soporte, midiendo la resistencia a la penetración del suelo compactado y sujeto a un período de saturación.

Esta prueba se lleva a cabo de la siguiente forma:

La humedad óptima de Porter es la humedad mínima requerida por el suelo para alcanzar su peso volumétrico seco máximo cuando es compactado con una carga unitaria de 140.6 kg/cm<sup>2</sup>. Para obtener la humedad óptima y el peso volumétrico seco máximo se toma una muestra de 4 kg de material secado, disgregado y cuarteado. Cuando se ha logrado la disgregación de los grumos se tamiza la muestra por la malla  $\frac{1}{4}$ ". Se le incorpora cierta cantidad de agua, cuyo volumen se anota, y una vez lograda la distribución homogénea de la humedad se coloca en tres capas dentro del molde de prueba, a cada una de ellas se le da 25 golpes con la varilla metálica.

## ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

Al terminar la colocación de la última capa se compacta el material aplicando cargas uniformes y lentamente, procurando alcanzar la presión de  $140.6 \text{ kg/cm}^2$  en un tiempo de 5 minutos, esta presión debe mantenerse durante un minuto, e inmediatamente hacer la descarga en otro minuto.

Si al llegar a la carga máxima no se humedece la base del molde, la humedad de la muestra es inferior a la óptima. A otra porción de 4 kg de material se le adiciona una cantidad de agua 80 ml mayor que y se repite el proceso. Si al aplicar la carga máxima se observa que se humedece la base del molde, el material toma una humedad ligeramente mayor que la óptima de Porter. Para fines prácticos es conveniente considerar que el espécimen se encuentra con su humedad óptima cuando se inicia el humedecimiento de la base del molde, siendo ésta la más adecuada para su compactación.

Se determina la altura del espécimen restando la altura entre su cara superior y el borde del molde de la altura total del molde y con este dato se calcula el volumen del espécimen. Se pesa el espécimen con el molde de compactación, se le resta el peso del molde y se calcula el peso volumétrico.

$$V_h = \frac{Ph}{V_t}$$

Donde:

$\gamma_h$  = Peso volumétrico húmedo en  $\text{g/cm}^3$  o  $\text{kg/cm}^3$

$Ph$  = Peso del material húmedo compactado, dentro Del cilindro Porter,  
en gr o Kg

$V_t$  = Volumen del espécimen en  $\text{cm}^3$  o  $\text{m}^3$

Se extrae el material del molde y se pone a secar a una temperatura constante de 100 a  $110^\circ\text{C}$ , se deja enfriar el material, se pesa y se calcula la humedad y el peso volumétrico seco máximo.

$$w = \frac{Ph - P_s}{P_s} \times 100$$

$$\gamma_s = \frac{V_h}{1 + \frac{w}{100}}$$

Donde:

$P_s$ : Peso de los filamentos secos en gramos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

c) **VALOR RELATIVO DE SOPORTE.** Es un índice de resistencia al esfuerzo cortante en condiciones determinadas de compactación y humedad. Se expresa como el porcentaje de la carga necesaria para introducir un pistón de sección circular en una muestra de suelo respecto a la profundidad de penetración del pistón en una piedra tipo triturada. Por lo tanto, si P2 es la carga en kg necesaria para hacer penetrar el pistón en el suelo en estudio y Px = 1360 kg, la que se precisa para penetrar la misma cantidad en la muestra tipo de piedra triturada, el Valor Relativo de Soporte del suelo es de:

$$VRS = (P2 / 1360) \times 100$$

d) **MÓDULO RELATIVO DE SOPORTE.** Es una característica que se considera constante, lo que implica elasticidad del suelo. Su valor numérico depende de la textura, compacidad, humedad y otros factores que afectan la resistencia del suelo. La determinación de k se hace mediante una placa circular de 30" de diámetro bajo una presión tal que produzca una deformación del suelo de 0.127 cm (0.05") en general se puede decir que el módulo de reacción k es igual al coeficiente del esfuerzo aplicado por la placa entre la deformación correspondiente, producida por este esfuerzo.

### III.2.4 MEDIO AMBIENTE

Para el desempeño de un pavimento rígido es importante tomar en cuenta dos factores ambientales como son: la temperatura y la precipitación.

#### TEMPERATURA

Las variaciones repentinas de temperatura acompañadas por fluctuaciones en el contenido de humedad del suelo causan deformaciones en el sistema del pavimento, lo que puede resultar en el agrietamiento de losas ó en el resquebrajamiento de las juntas. Como todos los materiales son sensibles al cambio volumétrico, debido a los cambios térmicos, el efecto provocado por tales cambios se refleja por la expansión volumétrica o contracción del pavimento.

#### PRECIPITACIÓN

Si se facilita la penetración de precipitaciones pluviales a la estructura de pavimento, ésta acción influirá en las propiedades de estos materiales, y originará la pérdida de soporte.

III.2.5 CONCRETO SIMPLE

Este tipo de pavimento cargará niveles de tránsito en exceso de un millón de cargas equivalentes a 18 kips durante su período de desempeño. El procedimiento de diseño esta basado en el método de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)

Para determinar el espesor de la losa (por medio de gráficas), se estiman los posibles niveles de soporte. Esto se puede ver utilizando la tabla III.14 y las figuras III11, III12, III13, y III.14. Para desarrollar un módulo de reacción efectivo de la sub-rasante. De la tabla 14 se puede mostrar el siguiente ejemplo de este tipo de diseño:  
sub-base:

Tipo	Granular
Espesor (pulgadas)	6.0
Pérdida del soporte, LS	1.0
Profundidad a la Cimentación Rígida	5.0
Espesor proyectado de la losa	9.0

MES	Módulo de la Sub-rasante M <sub>R</sub> (psi)	Módulo de la Sub-base E <sub>SB</sub> (psi)	Valor de k (pci) Compuesto (figura III.11)	Valor de k (pci) sobre cimentación rígida (figura III.12)	Daño Relativo u <sub>r</sub> (figura III.13)
Enero	20,000	50,000	1100	1350	0.35
Febrero	20,000	50,000	1100	1350	0.35
Marzo	2,500	15,000	160	230	0.86
Abril	4,000	15,000	230	300	0.78
Mayo	4,000	15,000	230	300	0.78
Junio	7,000	20,000	410	540	0.60
Julio	7,000	20,000	410	540	0.60
Agosto	7,000	20,000	410	540	0.60
Septiembre	7,000	20,000	410	540	0.60
Octubre	7,000	20,000	410	540	0.60
Noviembre	4,000	15,000	230	300	0.78
Diciembre	20,000	50,000	1100	1350	0.35
Sumatoria Σu <sub>r</sub> =					0.75

TABLA III.14. TABLA PARA ESTIMAR EL MÓDULO DE REACCIÓN EFECTIVO DE LA SUB-RASANTE.

$$\text{Promedio: } v_r = \frac{\sum v_r}{n} = \frac{7.25}{12} = 0.60$$

Módulo de Reacción Efectivo de la sub-rasante = 540  
 Corregido por pérdida de soporte: k (pci) = 170  
 Dado que el valor efectivo de k depende de muchos factores aparte del módulo de resistencia del suelo de cimentación, el primer paso es identificar las combinaciones que se van a considerar y colocarlos al principio de la tabla III. 14.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

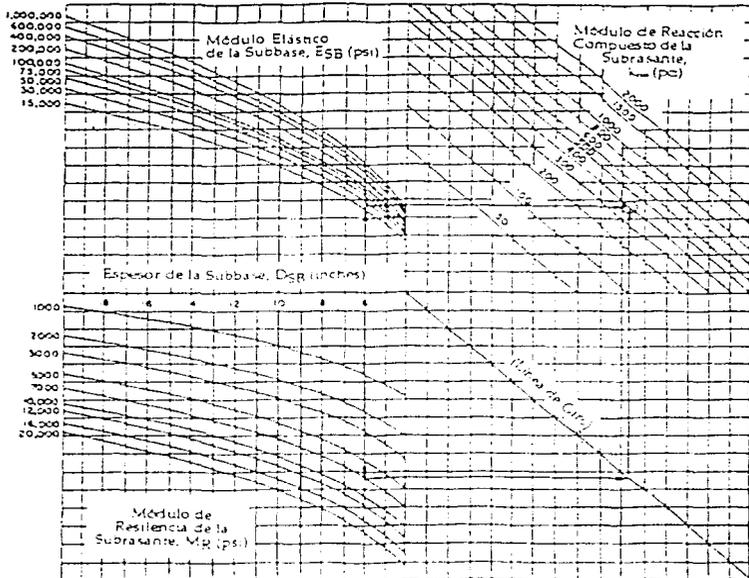


FIGURA. III.11. GRAFICA PARA ESTIMAR EL MÓDULO DE REACCIÓN COMPUESTO DE LA SUB-RASANTE,  $K_s$ , ASUMIENDO UN ESPESOR SEMI-INFINITO DE LA SUB-RASANTE (PRÁCTICAMENTE, UN ESPESOR SEMI-INFINITO ES AQUEL MAYOR DE 3M)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

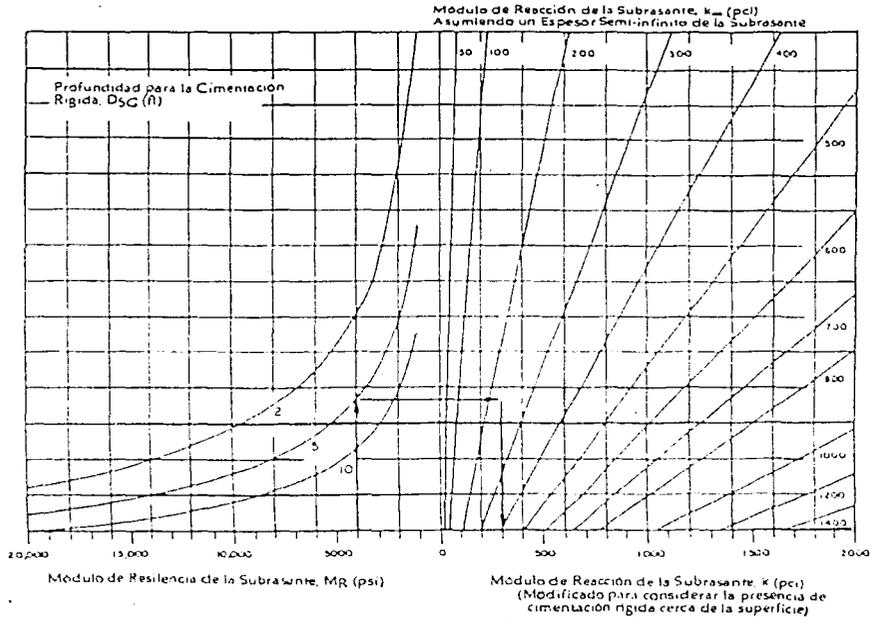


FIGURA III. 12. GRAFICA PARA MODIFICAR EL MÓDULO DE REACCIÓN DE LA SÚB-RASANTE PARA CONSIDERAR LOS EFECTOS DE CIMENTACIÓN RÍGIDA CERCA DE LA SUPERFICIE (3M)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

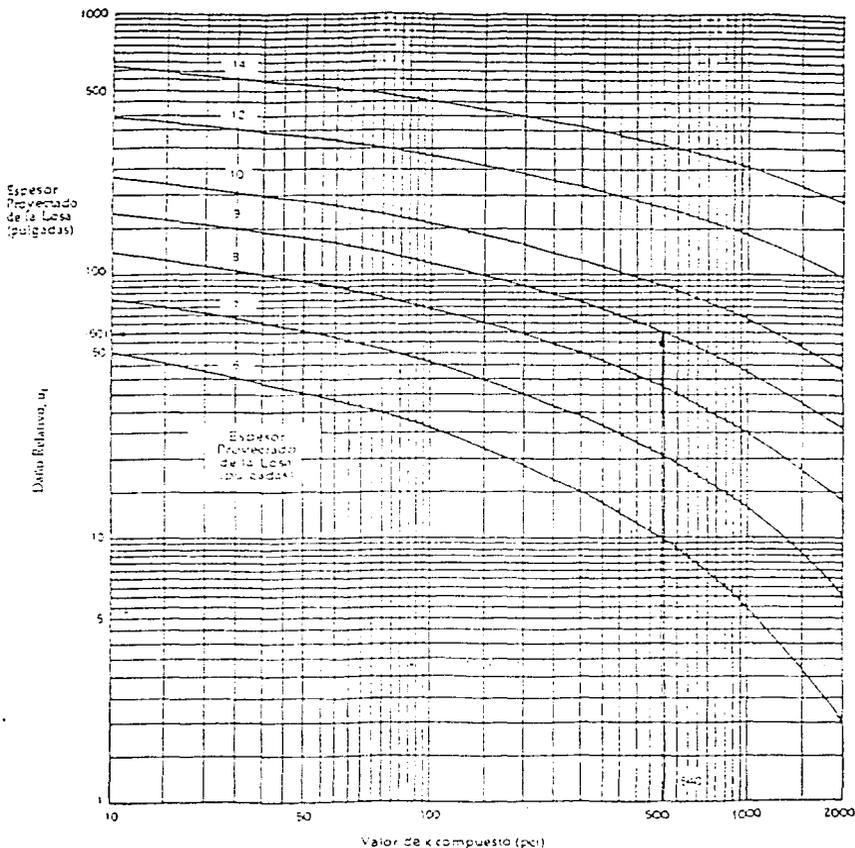


FIGURA III. 13. GRÁFICA PARA ESTIMAR EL DAÑO RELATIVO EN EL PAVIMENTO RÍGIDO BASADA EN EL ESPESOR DE LA LOSA Y EL SOPORTE DE LA CIMENTACIÓN.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

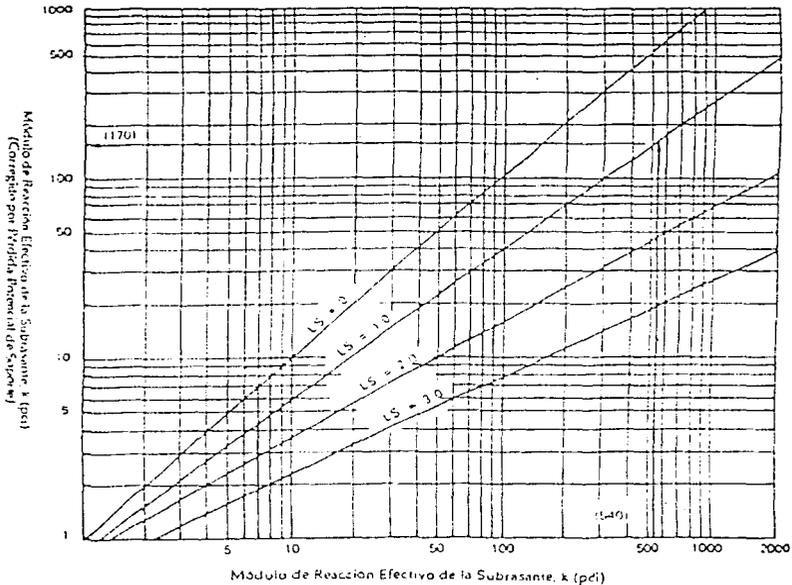


FIG. III. 14. GRÁFICA PARA CORREGIR EL MÓDULO DE REACCIÓN EFECTIVO DE LA SÚB-RASANTE POR PERDIDA POTENCIAL DE SOPORTE DE LA SÚBBASE.

- 1) Tipos de sub-base.- Diferentes tipos de sub-base tiene diferentes resistencias o valores del módulo de elasticidad. La consideración del tipo de sub-base para estimar el valor efectivo de  $k$  proporciona una base para la evaluación de su factibilidad como parte del proceso de diseño.
- 2) Espesor de la sub-base.- los espesores de diseño potenciales para cada tipo de sub-base deben ser también identificados, de manera que su factibilidad pueda ser considerada.
- 3) Pérdida de Soporte.- Este factor se utiliza para corregir el valor efectivo de  $k$  basado en la erosión potencial del material de sub-base.

4) Profundidad al cimiento rígido.- Si la capa firme se encuentra a menos de 3m de la superficie de la sub-rasante por una longitud significativa a lo largo del proyecto, su efecto sobre el valor total de k y el diseño del espesor de la losa para dicho segmento, debe ser considerado.

Como un siguiente paso en el diseño es identificar los valores temporales del modulo de resistencia del suelo de cimentación y colocarlos en la columna 2 de la tabla III.14. Si la longitud de la temporada más corta es medio mes, todas las temporadas deben estar definidas en términos de intervalos consecutivos de medio mes en la tabla.

El tercer paso en la estimación del valor efectivo de k es asignar valores del módulo de elasticidad (resistencia) para cada estación. Estos valores, deben entrar en la columna 3 de la tabla III.14 y deben corresponder a las estaciones que sirvieron para obtener su valor. Para aquellos tipos de sub-base que son insensibles a las variaciones de estación (materiales tratados con cemento), se puede asignar un valor constante al modulo de reacción para cada estación.

Para los materiales sin cementar que es sensibles al cambio de estación un valor del módulo de elasticidad de 50,000 y de 15,000 psi puede ser utilizado para los periodos de congelación y para el deshielo en primavera, respectivamente. Para los materiales sin cementar, la razón del modulo de resistencia de la sub-base al de la sub-rasante no debe exceder de 4 para prevenir una condición artificial.

El cuarto paso es estimar el módulo de reacción compuesto de la sub-rasante para cada estación, asumiendo una profundidad semi-infinita de la sub-rasante y colocarlo en la columna 4 de la tabla III. 14. Esto se logra con Ayuda de la figura III. 11. Obsérvese que el punto de comienzo de ésta gráfica es el espesor de la sub-base, D. Si la losa se coloca directamente sobre la sub-rasante (sin sub-base), el modulo de reacción compuesto se define usando la siguiente relación teórica entre los valores de k de la prueba de flexión de placa y el módulo de elasticidad del suelo de cimentación:

$$k = \frac{M}{19.40}$$

Donde:

M = Módulo de elasticidad del suelo de cimentación.

El quinto paso es obtener el valor de k que incluya el efecto de una cimentación rígida cerca de la superficie. Este paso debe ser eliminado si la profundidad de la cimentación rígida es mayor a 3 m. La figura III. 12. Proporciona una gráfica que puede ser utilizada para estimar el valor modificado de k para cada estación. Se considera el modulo de resistencia del suelo de cimentación y el modulo de reacción compuesto de la sub-rasante así como la profundidad hasta la cimentación rígida. Los valores para cada valor modificado de k deben de ser registrados en la columna 5 de la tabla III. 14.

El sexto paso en el diseño es estimar el espesor requerido de la losa y usar la figura III. 13. Para determinar el daño relativo,  $u_r$ , en cada estación y colocarlos en la columna 6 de la tabla III. 14.

El séptimo paso es sumar todos los valores de daño relativo  $u_r$  (columna 6) y dividir el total entre el número de estaciones (12 o 14) para determinar el daño relativo promedio. El módulo de reacción efectivo es entonces el valor correspondiente al daño relativo promedio (y el espesor proyectado de la losa) en la figura III. 13.

El octavo paso y último en el diseño es ajustar el módulo de reacción efectivo de la sub-rasante para tomar en cuenta la pérdida potencial de soporte debido a la erosión de la sub-base. La figura III. 14. Proporciona la gráfica para corregir el módulo de reacción efectivo de la sub-base en la función del factor de pérdida de soporte. Existe un espacio en la tabla III. 14. Para registrar el valor final de  $k$  para el diseño.

Refuerzo para los pavimentos de concreto:- El acero de refuerzo en el pavimento de concreto evita la ampliación de las grietas producidas por la flexión y mantiene las caras fracturadas en íntimo contacto. En esta forma, el cierre del agregado es conservado, y la introducción de suciedad o de agua es evitada. Pocas veces, si no es que nunca, se toma en cuenta el refuerzo para resistir los esfuerzos de flexión producidos por las cargas o el alabeo.

Es una práctica común colocar el acero de refuerzo cercanamente a la parte superior de la losa. La distancia de la superficie al acero varía de 2.81 a 7.62 cm, siendo la distancia más regular de 5.08 cm.

### III.2.6. JUNTAS

El diseño de juntas en los pavimentos de concreto es el responsable del control del agrietamiento, así como de mantener la capacidad estructural del pavimento y su calidad de servicio en los altos niveles al menor costo anual.

Además las juntas tienen funciones específicas:

- El control del agrietamiento longitudinal y transversal provocado por las restricciones de contracción, combinándose con los efectos de pandeo o alabeo de las losas, así como las cargas del tráfico.
- Dividir el pavimento en incrementos prácticos para la construcción (por ejemplo los carriles de circulación)
- Absorber los esfuerzos provocados por los movimientos de las losas.
- Proveer una adecuada transferencia de carga.
- Darle forma al depósito para el sellado de la junta.

Una construcción adecuada y a tiempo, así como un diseño apropiado de las juntas incluyendo un efectivo sellado, son elementos claves para el buen comportamiento del sistema de juntas.

La necesidad del sistema de juntas es el resultado del deseo de controlar el agrietamiento transversal y longitudinal. Este agrietamiento se presenta por la combinación de varios efectos, entre los que podemos mencionar la contracción por secado del concreto, los cambios de humedad y de temperatura, la aplicación de las cargas del tráfico, las restricciones de la sub-rasante o terreno de apoyo y también por ciertas características de los materiales empleados.

En orden para diseñar un adecuado sistema de juntas se recomienda evaluar las siguientes recomendaciones:

- ✓ Consideraciones ambientales. Los cambios en la temperatura y en la humedad inducen movimientos de la losa, resultando en contracciones de esfuerzos y en alabeos.
- ✓ Espesor de la losa. El espesor del pavimento afecta los esfuerzos de alabeo y las deflexiones para la transferencia de carga.
- ✓ Transferencia de carga. La transferencia de carga es necesaria a lo largo de cualquier junta del pavimento, sin embargo la cantidad requerida de transferencia de carga varía para cada tipo de junta. Cuando se empleen barras de amarre ó pasajuntas, el tipo y el tamaño de las barras influyen en el diseño de juntas.
- ✓ Tráfico. El tráfico es un factor extremadamente importante para el diseño de las juntas. Su clasificación, canalización y la predominancia de cargas en el borde influyen en los requerimientos de transferencia de carga para el comportamiento a largo plazo.
- ✓ Características del concreto. Los componentes de los materiales afectan la resistencia del concreto y los requerimientos de juntas. Los materiales seleccionados determinan las contracciones de la losa, por ejemplo, del agregado grueso influyen en el coeficiente térmico del concreto, en adición a esto los agregados finos tienen una influencia perjudicial en el comportamiento de las juntas. En muchas ocasiones el despostillamiento es el resultado de concentraciones de materiales malos a lo largo de las juntas.
- ✓ Tipo de sub-rasante o terreno de apoyo. Los valores de soporte y las características friccionantes en la interfase del pavimento, con el terreno de apoyo para diferentes tipos de suelos, afectan los movimientos y el soporte de las losas.
- ✓ Características del sellador. El espaciamiento de las juntas influye en la selección del tipo de sellador. Otras consideraciones, como adecuados factores de forma, costos y ciclos de vida también deben tomarse en cuenta para la selección del sellador.
- ✓ Apoyo lateral. El tipo de acotamiento (de concreto, de asfalto, de material granular) afecta el soporte de la orilla del pavimento y la habilidad de las juntas centrales para realizar la transferencia de carga.

- Experiencia pasada. Los datos locales del comportamiento de los pavimentos son una excelente fuente para establecer un diseño de juntas, sin embargo las mejoras a los diseños del pasado con la tecnología actual pueden mejorar significativamente su comportamiento.

a) Agrietamiento.

Un adecuado sistema de juntas está basado en controlar el agrietamiento que ocurre de manera natural en el pavimento de concreto y las juntas son colocadas en el pavimento precisamente para controlar su ubicación y su geometría.

b) Eficiencia de la junta.

La transferencia de carga es la habilidad de la junta de transferir una parte de la carga aplicada de uno al otro lado de la junta y se mide por lo que llamamos como "eficiencia de la junta".

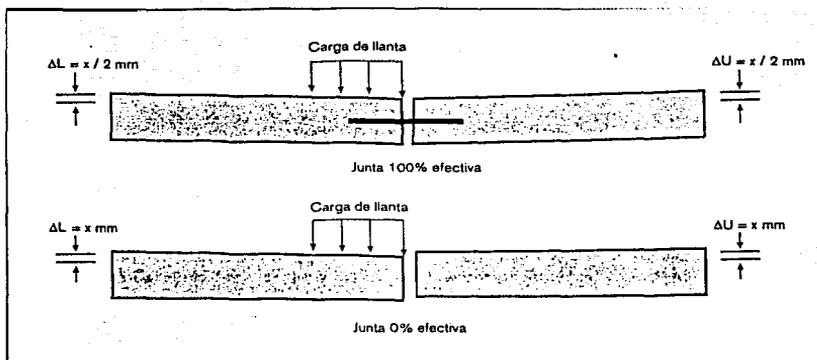


FIGURA III.15. EFICIENCIA DE LAS JUNTAS.

Una junta es 100% efectiva si logra transferir la mitad de la carga aplicada al otro lado de la junta, mientras que un 0% de efectividad significa que ninguna parte de la carga es transferida a través de la junta.

c) Tipos de juntas.

Los tipos de juntas más comunes en los pavimentos de concreto son:

1.- Juntas Transversales de Contracción:

Son las juntas que se construyen transversales al eje central del pavimento y que son espaciadas para controlar el agrietamiento provocado por los efectos de las contracciones como por los cambios de temperatura y de humedad.

2.- Juntas Transversales de Construcción:

Son las juntas colocadas al final de un día de pavimentación o por cualquier otra interrupción a los trabajos (por ejemplo a los accesos o aproches a un puente).

3.- Juntas Transversales de Expansión/Aislamiento:

Estas juntas son colocadas en donde se permita el movimiento de la carpeta sin dañar estructuras adyacentes (puentes, estructuras de drenaje, etc.) o el mismo pavimento.

4.- Junta Longitudinal de Contracción:

Son las juntas que dividen los carriles de tránsito y controlan el agrietamiento donde van a ser colados, en una sola franja, dos o más carriles.

5.- Junta Longitudinal de Construcción:

Estas juntas unen carriles adyacentes cuando van a ser pavimentados en tiempos diferentes.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

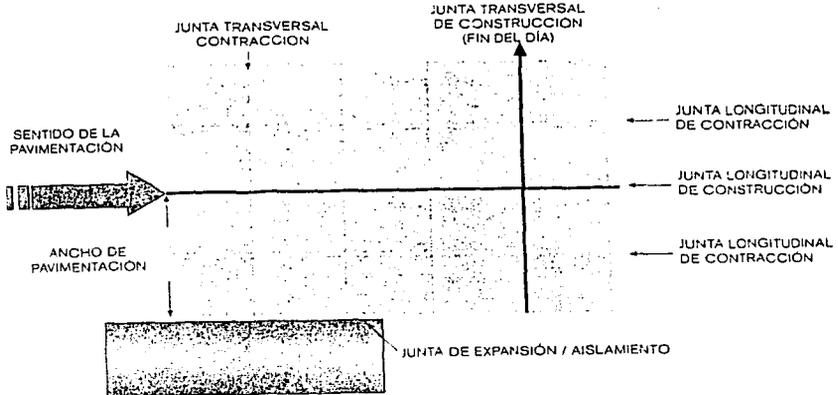


FIGURA III.16. CROQUIS DE LOS TIPOS DE JUNTAS EN UN PAVIMENTO DE CONCRETO.

### III.3 PROCESO CONSTRUCTIVO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS.

#### III.3.1. CONCRETO SIMPLE.

Las nuevas tecnologías de construcción de pavimentos se han desarrollado para cubrir diferentes necesidades y mejorar sustancialmente el comportamiento y el bienestar de los caminos. Estas tecnologías las podemos clasificar de la siguiente manera:

- Pavimentación con Cimbra Deslizantes.
- Pavimentación con Cimbra Fija.

Ambos esquemas de pavimentación se pueden utilizar indistintamente, sin embargo; es más común que las Autopistas, Carreteras y Avenidas Urbanas importantes, utilicen primordialmente la cimbra deslizante y que en pavimentos urbanos en calles se utilice con mayor frecuencia la pavimentación con cimbra fija.

### 1. Preliminares.

En la construcción de pavimentos de concreto se requieren de algunas actividades previas, necesarias para el desarrollo del proyecto (terraceras, base estabilizada con cemento, bache de caja, etc.). Estas actividades se realizan tanto para un pavimento nuevo como para una sobrecarpeta de concreto.

### 2. Cimbra Deslizante.

En pavimento de concreto se considera el uso de la cimbra deslizante como la herramienta necesaria para la formación de una figura geométrica consolidada mediante el deslizamiento continuo de una cimbra alrededor de la masa plástica del concreto, la pavimentación de cimbra deslizante es la maquinaria autopropulsada en la cual va montada la cimbra. El efecto que la pavimentadora hace sobre el concreto se conoce como extrusión, el ejemplo más simple de extrusión es el realizado sobre la pasta de dientes al salir del tubo bajo presión, es claro que el material toma la forma de la boquilla la cual haría las veces de la cimbra que se desliza.

La pavimentación en concreto con cimbra deslizante debe estar precedida de una planeación minuciosa de la actividad diaria, es importante tomar en consideración todos los aspectos que intervienen al momento de planear, para lograr proyectos exitosos. Por lo general este tipo de pavimentaciones maneja grandes volúmenes de concreto y producción diarias que pueden variar entre los 1,500 m<sup>3</sup> a los 2,800 m<sup>3</sup>. Esta productividad, apoyada con una buena planeación, ha hecho posible optimizar los recursos y eficientar el proceso constructivo.

## *PROCESO CONSTRUCTIVO*

### a) Tendido de línea guía.

Con la información del cadenamamiento y cotas de los puntos que sirven para la localización de las barras de soporte de la línea, se procede a colocar cada barra o "pin" en su sitio correspondiente. Estos puntos físicos están marcados con los elementos como clavos metálicos en trozos de madera y pintados para su fácil reconocimiento, a una distancia de 150 cm del punto proyectado y debe estar clavada lo suficiente dentro de la base para garantizar la estabilidad de la línea ante el paso de la pavimentadora, la texturizadora y el personal de la obra. Esta barra o "pin" debe ser metálica y rígida para soportar los golpes de martillo y el uso prolongado en la obra. La línea que une todos los "pines" se conoce como línea de "pines", la distancia entre estos en un trazo plano debe ser entre 8 y 10 m, en curvas horizontales o verticales se deben colocar más próximos, con una

separación máxima de 5.0 m

La separación de los "pines" no debe ser igual que la de los sensores de altura de la máquina, esto para reducir la sincronización de los movimientos en altura de la pavimentadora. Con el fin de tener mayor precisión en el perfil y en los espesores, es importante tener líneas guías a ambos lados de la pavimentadora.

Después de localizadas todas las barras o "pines" se procede a colocar los brazos que soportan la línea guía, estos brazos son metálicos, con la forma adecuada para no interrumpir el tránsito libre de los sensores de la pavimentadora y la texturizadora sobre la línea guía, también debe contar con el mecanismo para ajuste de la altura sobre la barra y de prolongación, para ajustar la distancia de la línea con respecto de la barra y permitir localizarlas sobre el punto correcto. Los brazos tienen la posibilidad de asegurar la línea guía que ésta no se suelte al paso de los sensores o por el movimiento del personal cercano.

Los hilos o cuerdas de la línea pueden ser de alambre, cable, nylon tejido, cuerda de poliestireno o cualquier otro material, por un lado deben ser lo suficientemente fuertes como para resistir la tensión a que se someten y deben ser livianos para que no muevan el alineamiento. La razón de la tensión es reducir las catenarias entre apoyos, el tensionamiento se realiza manualmente o con la ayuda de un carrete metálico que se monta sobre barras o "pines" y debe hacerse antes de insertar o montar el hilo en los soportes, a fin de garantizar una tensión uniforme. Es importante usar elementos de seguridad ante posibles rompimientos de la cuerda o hilo, ya que normalmente los brazos metálicos traen rebabas, que es conveniente limar en los puntos de inserción del cable. Si una cuerda se rompe, es señal de que debe ser cambiada, no añadida.

Es importante aclarar que la varilla del sensor de dirección de la máquina, corre contra el interior de la línea guía y la varilla del sensor de altura o elevación corre por debajo, esto para que no haya elementos que desvíen ninguna de las varillas, excepto la misma línea, por otro lado las varillas no deben flexionarla en forma notoria. La longitud de la cuerda que se tensiona debe ser mayor a 200 metros para reducir errores, el traslape de las cuerdas se debe hacer en una longitud de por lo menos 20 metros.

Una vez tensionada la cuerda o hilo e insertada en el brazo soporte se procede a plomar su punto de contacto con el brazo en el punto físico dado por topografía, esta actividad se inicia soltando las tuercas de ajuste del brazo al "pin" y mediante una plomada de mampostero o un nivel de burbuja se determina el punto al cual debe quedar, para fijar las tuercas.

El ajuste en altura se puede realizar simultáneamente y con los datos entregados por la comisión topográfica, soltando la tuerca de ajuste en altura; con ayuda del nivel de burbuja y un flexómetro se determina la altura de cada punto.

Una vez que se tiene instalada la línea guía debe ser verificada visualmente, cualquier duda debe ser verificada y todo error corregido con topografía.

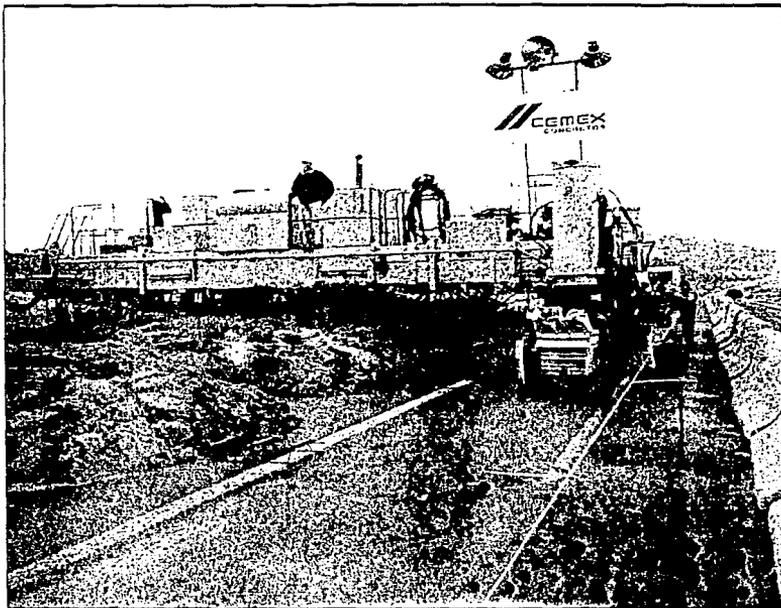


FIGURA III.17. SE PUEDE OBSERVAR EL TENSIONAMIENTO DE LA LÍNEA GUÍA.

b) Preparación de equipos.

Todos los equipos que participan en el tirado o extendido del concreto deben ser probados en vacío, antes de iniciar la recepción del concreto.

En el caso de la pavimentadora, deben activarse sus sistemas hidráulicos, tanto motrices como de transporte, compactación y vibrado del concreto, detectando fugas y conductos en mal estado, enfatizando en la respuesta a las indicaciones de los sensores, tanto en altura como en dirección.

Es importante prevenir la acción de fragmentos de concreto que no hayan sido eliminados en la limpieza diaria y que obstaculicen el desplazamiento de algunas de las partes de la pavimentadora, se recomienda que ésta cuente con un sistema neumático que

permita el uso de pistolas rompedoras de concreto, para facilitar la limpieza y suministro de agua a presión, de igual forma, deben revisarse la calidad de elementos de acabado del concreto, para verificar el tipo de acabado que pueden ofrecer tanto en textura como en uniformidad. Es importante conocer que el perfil de la vía obtenido por la pavimentadora, será el definitivo para el proyecto.

Los vibradores deben estar correctamente localizados, respetando el área frente a cada uno o zona de influencia, entregado por el fabricante y ajustado de acuerdo a la cabeza hidrostática proyectada en la colocación y el tipo de concreto a colocar, esto último solo influirá de acuerdo a la experiencia del operario o el constructor con mezclas similares.

Otros vibradores, presentes en la pavimentadora son los vibradores de piso. Están localizados sobre las placas metálicas (float-pan) que se instalan a la salida del concreto de la placa de extrusado o profile-pan, estos vibradores y las placas que conforman el float-pan deben revisarse tanto en su estado y limpieza, para garantizar un buen acabado del pavimento.

El float-pan debe tener la posibilidad de dar el bombeo de la vía, su sistema de soporte para que quede "flotando", y el ajuste hidráulico para las pendientes debe ser igualmente revisado.

El dispositivo para formar la corona o bombeo de la carretera se debe probar en todo su conjunto, aunque no todos los proyectos lo requieran, tanto la formación del bombeo a la entrada (en el strike off) como en la placa de extrusado y en las indicaciones que el operador de la máquina recibe de la localización de estos elementos. En la sección de la placa o molde de extrusado (profile-pan), el ajuste se hace liberando cada tuerca de fijación de las planchas y alineándolas de acuerdo a la pendiente o pendientes transversales requeridas para una sección, esta alineación se puede hacer mediante un ajuste hidráulico que poseen algunas máquinas o manualmente si no se cuenta con él, alineando con la ayuda de un hilo o lamina metálica recta, finalmente se asegura todo el sistema.

Se debe notar que en caso de coronas o bombeos de la losa, otros elementos deben ser ajustados para dar la forma, entre ellos los vibradores y el tornillo repetidor, que no tiene ajuste pero se recortan la longitud de los pasos centrales.

El mecanismo hidráulico de ajustes es fundamental para dar la forma correcta en tramos de transición recto, con doble pendiente, curvo con una sola y en este sentido debe haber un apoyo continuo de la comisión topográfica del proyecto.

Posteriormente se encuentra el final finisher o lana metálica de la pavimentadora, su revisión se hace por la calidad del movimiento en zigzag y el estado de la superficie. Este es un elemento que da un buen acabado siempre que se encuentre en perfecto estado, y el concreto sea homogéneo. La decisión de utilizar esta llana ó de dejarle todo el trabajo a las llanas manuales se debe tomar en los primeros metros de pavimento.

1. LANA DE ORIGEN

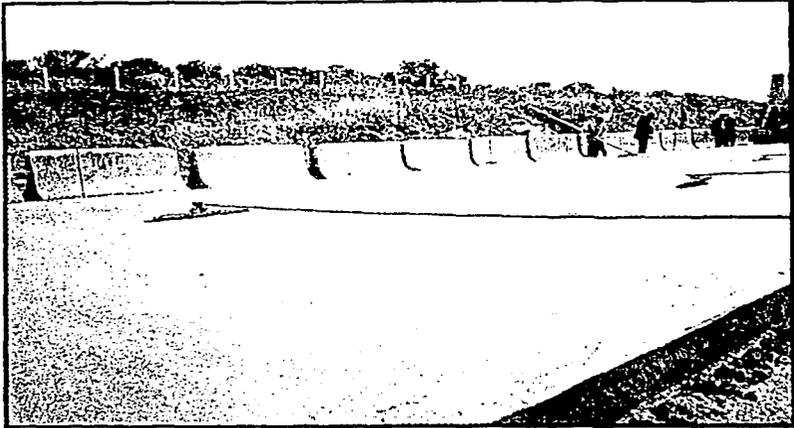


FIGURA III. 18. LLANA OSCILATORIA FINAL

En cuanto a los sensores, hay que tener en cuenta que existen muchos tipos de sensores y aunque los más usados en pavimentos son los hidráulicos, existen también eléctricos, láser y sónicos. Cada tipo de sensor debe ser usado e instalado de acuerdo a las recomendaciones del fabricante y por personal de experiencia. Normalmente las pavimentadoras usan cuatro sensores de altura, aunque algunas solo usan dos, con cuatro se puede tener un mayor control del espesor de la losa, sin embargo con dos sensores y un excelente trabajo de topografía y perfilado de la rasante, se pueden lograr buenos resultados.

Los sensores de altura están localizados adelante y atrás de la máquina y haciendo contacto en cada extremo con la línea guía. En este caso es importante notar que algunas pavimentadoras traen los sensores traseros unos metros atrás de profile pan o molde de extrusión y en su caso de curvas verticales cerradas, se corre riesgo de una variación fuerte del espesor de la losa.

Las varillas de los sensores de altura deben fijarse tan cerca de la horizontal como sea posible y a la misma distancia del equipo a la línea de guía, normalmente entre 20 y 25cm. La presión de la varilla a la línea guía se podrá ajustar cuando sea necesario durante la pavimentación. El sensor tiene o debe tener una contra balanza a fin de ajustar la presión con esta, y con el ajuste del tornillo amortiguador se controla la "sensibilidad" del sensor, con el fin de reducir los movimientos bruscos y continuos.

## ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

La separación de los pines de la línea de guía no debe corresponder a la separación entre sensores, con esto se logrará que los dos sensores no estén al mismo tiempo en valles o en picos de las catenarias, formadas en la línea guía, y mejorar así el perfil de la vía.

En cuanto a la texturizadora se debe probar la respuesta de los sensores a las variaciones de la línea guía, el estado de los elementos de texturizado (tanto yute como peine de cerdas metálicas o plásticas según sea el proyecto) y el estado de los orificios de las espreas o aspersores de membrana de curado, también el estado del depósito de membrana y de los tubos conductores.

Otros equipos que deben ser probados son las cortadoras de discos para el concreto y los reflectores de emergencia. En algunos proyectos se cuenta con equipos esparciadores o colocadores del concreto, para facilitar la labor de la pavimentadora y lograr un mayor rendimiento.

### c) Inicio de los trabajos.

Antes de iniciar la jornada de pavimentación deben revisarse todas las medidas de seguridad y tomar todas las precauciones para el personal de la obra. Para iniciar se deberán revisar los siguientes puntos:

- 1.- Revisión de todo el equipo involucrado en la pavimentación.
- 2.- Que se cuente con una distancia aceptable de tramo a pavimentar.
- 3.- Disponibilidad de los materiales, tanto en volumen como en calidad.
- 4.- Reservas en almacén y en obra.
- 5.- Equipos de ensayo en buen estado y con personal disponible.
- 6.- Herramientas necesarias para la colocación del concreto:
  - Flotadores manuales
  - Aspersores
  - Vibradores manuales.
- 7.- Comunicación por radio entre el frente de trabajo y planta.
- 8.- Equipo y agua suficiente para humedecer la capa rasante.
- 9.- Colocación de la línea guía.
- 10.- Verificar la junta fría y la correcta colocación de la pasajuntas.
- 11.- Revisar el pronóstico del tiempo.

Es importante tener la base o rasante saturada para recibir el concreto, las bases con falta de agua pueden absorber agua del concreto y reducir la hidratación del cemento ocasionando bajas resistencias.

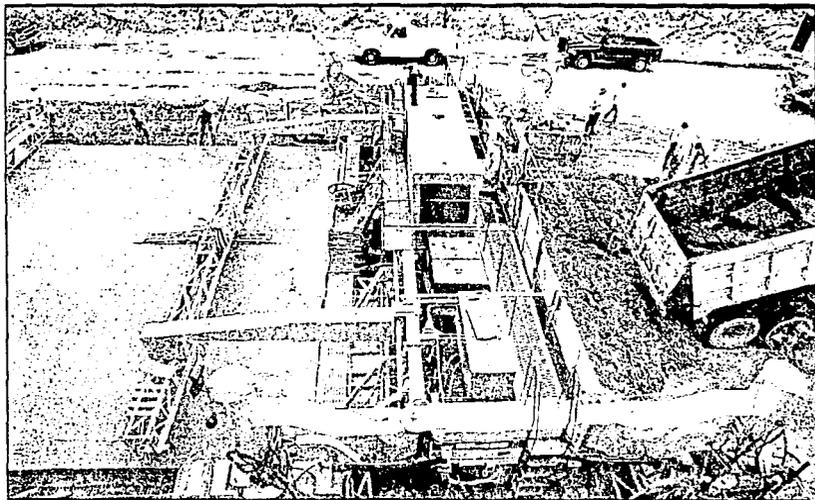


FIGURA III. 19. PAVIMENTADORA DE CIMBRA DESLIZANTE.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

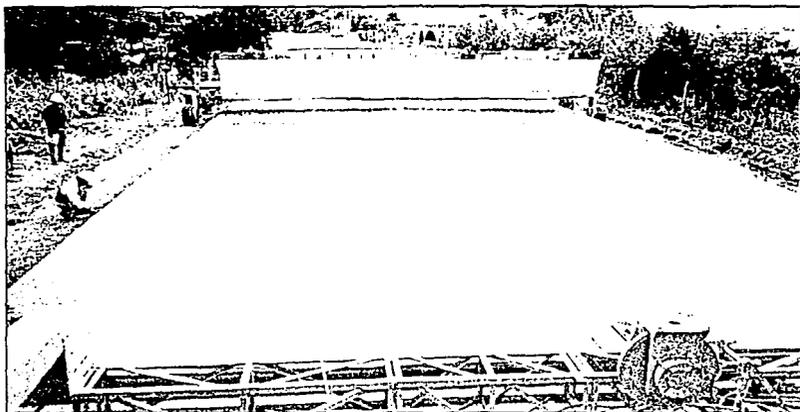


FIGURA III. 20. PAVIMENTO TERMINADO DESPUÉS DEL PASO DE LA MAQUINA.



FIGURA III. 21. LLANA OSCILATORIA FINAL

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

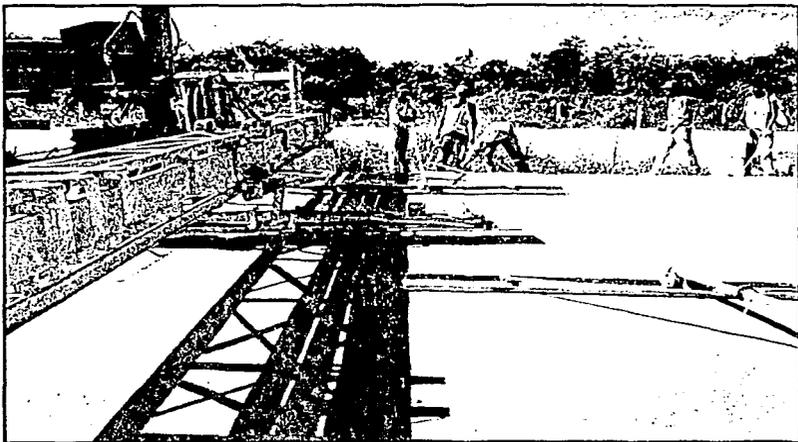


FIGURA III. 22. LLANA OSCILATORIA FINAL

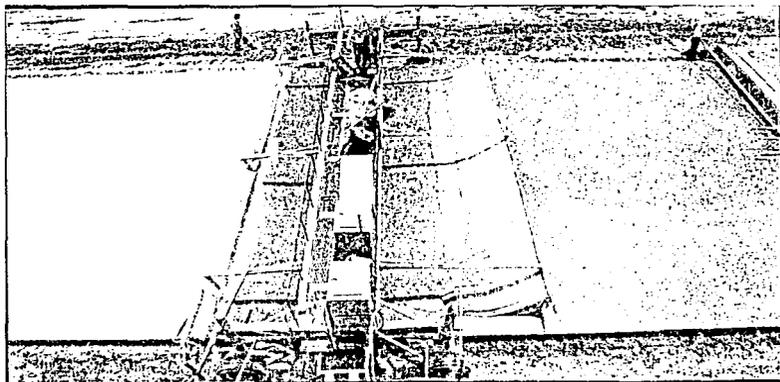


FIGURA III. 23. TEXTURIZADORA, CURADORA.

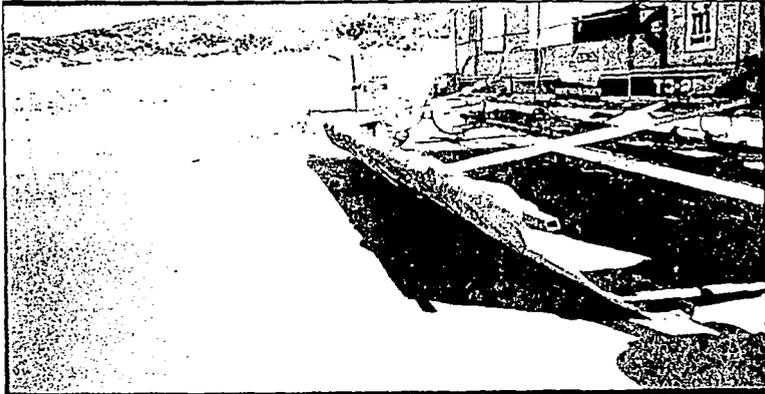


FIGURA III. 24. TEXTURIZADORA, ALTERNATIVA CON PASTO SINTETICO.

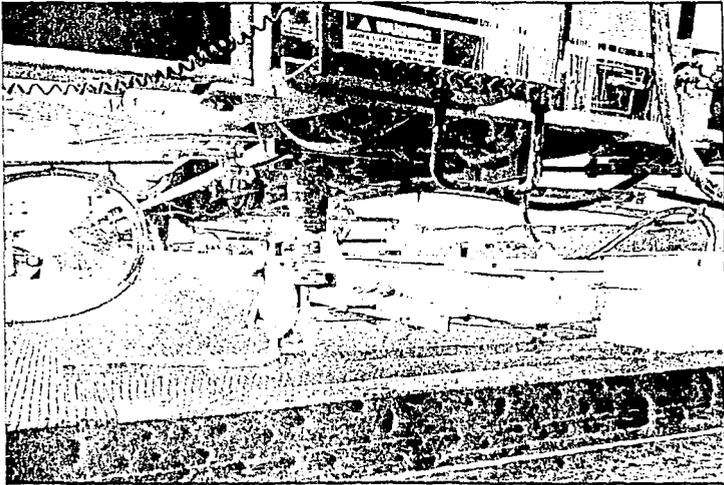


FIGURA III. 25. TEXTURIZADO TRANSVERSAL.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

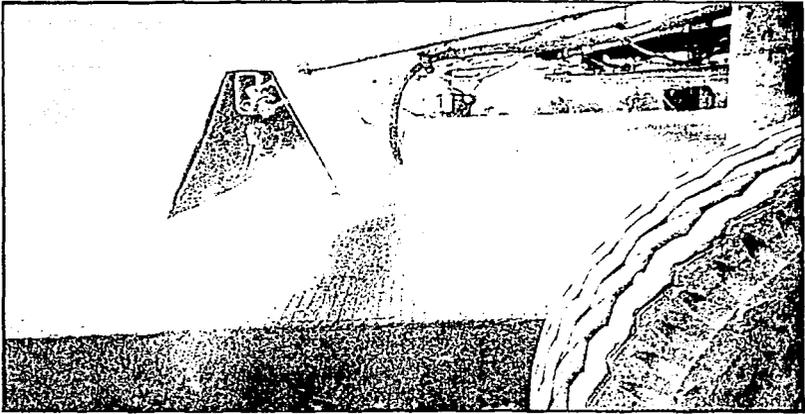


FIGURA III. 26. APLICACIÓN DE MEMBRANA.

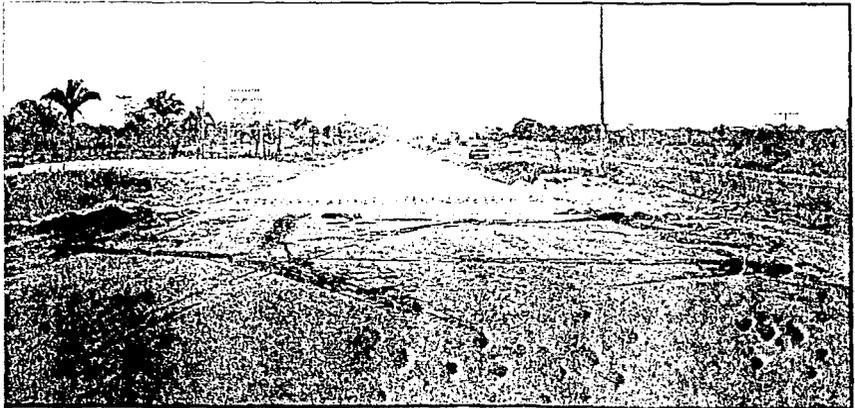


FIGURA III. 27. JUNTA FRÍA DEL FIN DEL DÍA.

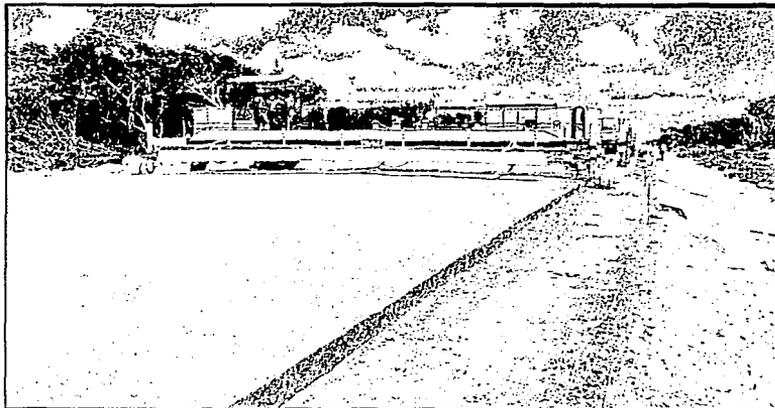


FIGURA III. 28. PAVIMENTO CON BOMBEO AL CENTRO.

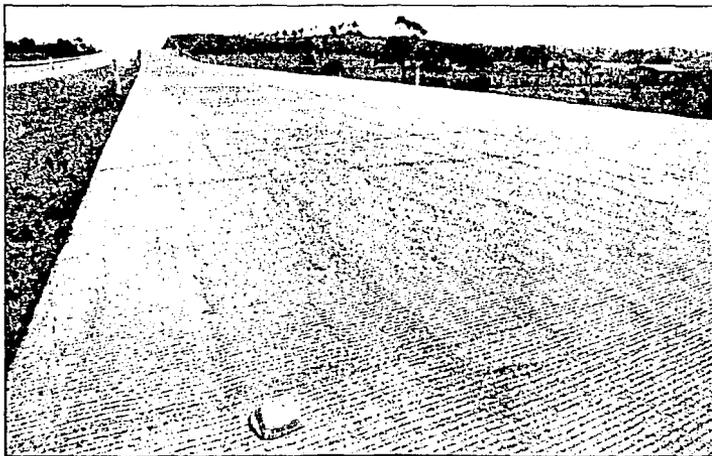


FIGURA III. 29. ACABADO FINAL DE UN PAVIMENTO TERMINADO.

TESTE COM  
FALLA DE ORIGEN

III.3.2 A BASE DE JUNTAS.

Los sistemas de construcción de juntas se basan en el principio de controlar las grietas que se presentan por causas naturales en los pavimentos de concreto. Las juntas se colocan en el pavimento para controlar la ubicación y geometría del agrietamiento.

a) Juntas transversales de contracción.

Las juntas transversales de contracción sirven básicamente para controlar el agrietamiento en el pavimento.

El diseño adecuado de la junta y la construcción correcta, son actividades críticas en el comportamiento general del pavimento. Muchos problemas derivados de la pérdida de la capacidad de servicio del pavimento se han presentado en juntas mal diseñadas.

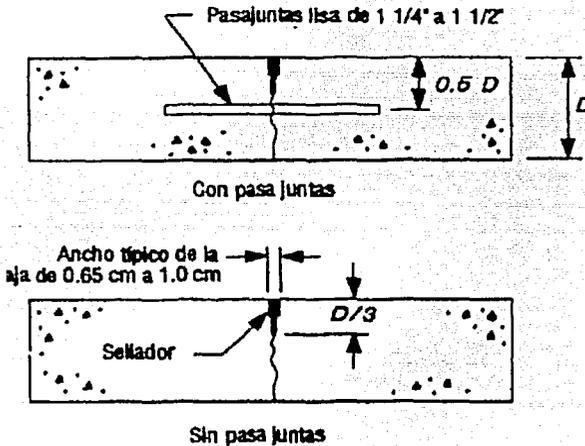


FIGURA III.30. JUNTAS TRANSVERSALES DE CONTRACCIÓN.

## ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

Las juntas esviadas constituyen una variación de las juntas transversales de contracción que a menudo se usan en pavimentos sin refuerzo y sin pasajuntas. Una junta esviada es una junta transversal de contracción inclinada 1.20 m en 7.30 m. La orientación del esviamiento es tal, que el ángulo obtuso en la orilla exterior del pavimento coincide con el lado de salida de la junta.

El esviamiento no es un sustituto de las pasajuntas o de la transferencia mecánica de carga. El esviamiento es efectivo para juntas sin pasajuntas, en rutas de bajo volumen de tráfico. Se recomienda el uso de pasajuntas de transferencia de carga en pavimentos carreteros que soporten un tráfico de camiones apreciable.



Se necesitan aplicar buenos procedimientos constructivos para obtener la capacidad óptima de transferencia de carga. Tanto la trabazón entre agregados como la transferencia mecánica de carga deben tenerse en cuenta durante la construcción.

La interacción entre partículas se basa en la consolidación adecuada y en la uniformidad del concreto. Ya que estos factores también resultan vitales para otras propiedades del concreto, tales como la resistencia y la durabilidad. Como resultado, en la mayoría de los casos se logra una buena trabazón entre partículas de agregado.

### a.1) Colocación

Se deben de colocar las pasajuntas por medio de inserción mecánica o de dispositivos de transferencia de carga (canastillas para pasajuntas). La introducción mecánica implica un dispositivo de sujeción a la pavimentadora de cimbra deslizante la cual coloca las pasajuntas a través de un proceso de inserción y vibrado. Los dispositivos de transferencia de carga constan de estructuras de alambre o silletas que guardan y sostienen las pasajuntas a la profundidad adecuada y con la alineación correcta.

La colocación de pasajuntas es importante e implica una verificación cuidadosa poco después de haberse iniciado las operaciones de pavimentación. Las tolerancias en alineación y localización proporcionan límites que una vez rebasados puedan poner en entredicho el comportamiento de la junta, pero que permiten cierta holgura para trabajos de construcción pesada, las operaciones de construcción pueden requerir de ajustes para tomar en cuenta las variaciones de las condiciones de trabajo.

*a.2) Movimiento de las pasajuntas.*

Las dovelas necesitan una buena lubricación para permitir el movimiento del concreto a lo largo de la superficie de la barra. La aplicación de un lubricante a base de parafina, de una emulsión asfáltica, de un desmoldeante para cimbra, o de grasa estándar constituye una lubricación excelente.

Un espesor máximo de lubricación antiadherente de 0.13 mm o menos proporcionará un ajuste suficiente y una buena consolidación del concreto alrededor de la barra pasajuntas. Las copas más gruesas de antiadherente pueden dar lugar a un aflojamiento de las pasajuntas y a una menor eficiencia de la junta.

La falta de un buen antiadherente podría generar esfuerzos excesivos en la junta y dar lugar a fallas en la misma.

Las pasajuntas deben satisfacer la especificación A615 de la ASTM. La consolidación del concreto en el área de la junta y alrededor de las pasajuntas también es importante. La consolidación afecta la transferencia de cargas, la resistencia del concreto y su durabilidad.

*a.3) Dispositivos para juntas.*

Los dispositivos soldados para pasajuntas son marcos de alambre, que sostienen a las barras en el lugar previsto. Con frecuencia se le conoce como canastillas.

Un mecanismo eficiente para fijar la estructura de barras pasajuntas a sub-bases estabilizadas (rígidas) es una grapa que se coloca sobre los lambrones de la cuerda inferior y se clavan a la sub-base. La capacidad del material de sub-base para sostener la grapa u otro dispositivo de sujeción, será la que determine el número de grapas necesarias para fijar el armazón o canastilla.

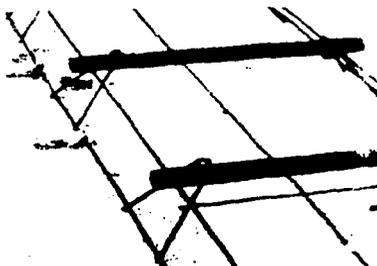


FIGURA III.31. GRAPAS PARA FIJAR LAS CANASTILLAS O SILLETAS DE LAS PASAJUNTAS

#### a.4) Aserrado.

El aserrado con disco es el método más confiable para cortar las juntas transversales de contracción. El corte inicial del disco proporciona un plano de debilidad en el que se iniciará el agrietamiento. Puede necesitarse una segunda operación de aserrado para lograr el factor de forma, necesario para que el sellador tenga un buen comportamiento.

El aserrado deberá iniciarse tan pronto como sea posible después de alcanzarse la resistencia necesaria. En condiciones normales se empieza a hacer los cortes entre 4 y 12 horas después del colado, dependiendo de las condiciones de curado y del tipo de sub-base. Las condiciones extremas de temperatura ameritan una mayor atención a los detalles. Los climas cálidos pueden inducir una mayor rapidez de contracción lo cual implica iniciar el aserrado antes de las cuatro horas. Las temperaturas más frías pueden retrasar el desarrollo de resistencia del concreto, descartando las operaciones de aserrado dentro de las primeras 24 horas o más, siguientes a la colocación del pavimento.

El corte inicial del disco para formar un plano de debilidad en el concreto endurecido, deberá tener cuando menos la tercera parte del espesor de la losa ( $D/3$ ) con un ancho mínimo de 317 mm (1/8") En la mayor parte de los casos, cada una de las juntas se deberá aserrar inmediatamente después de la pavimentación.

Al estar sobre una sub-rasante natural o sobre sub-base granulares, las juntas iniciales deben a veces aserrarse a intervalos comprendidos entre 18 y 24 m en forma inicial, mientras que las juntas intermedias se deben aserrar posteriormente. Las sub-bases rígidas estabilizadas requieren que toda las juntas transversales de contracción se corten consecutivamente, a fin de evitar el agrietamiento fuera de control.

Se usa un corte ensanchado para establecer el factor de forma adecuado para la caja donde se aplicará el material sellante especificado. Los cortes ensanchados se hacen generalmente dentro de los siete días siguientes a la pavimentación y al aserrado final.

Las dimensiones de la caja del sellador de la junta varía entre 6 y 13 mm de ancho y 19 y 44 mm de profundidad, dependiendo de la separación entre juntas y del material de sello. Es recomendable conservar el ancho inicial de la caja de la junta en menos de 9.5 mm esto es suficiente para colocar la mayoría de los selladores y para permitir en el futuro el resellado de la junta.

La selección del tipo de disco cortador (abrasivo/seco o diamante/húmedo) depende del tipo de agregados del concreto. Los agregados varían entre blandos (fáciles de cortar) y duros (difíciles de cortar)

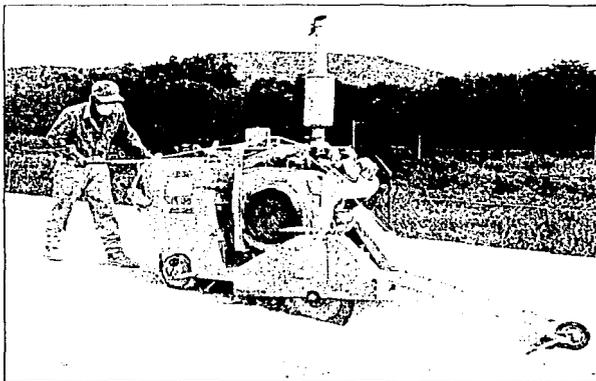


FIGURA III.32. EL TIEMPO PARA ASERRAR LAS JUNTAS DE CONTRACCIÓN ES CRITICO.

#### a.5) Limpieza

Las paredes de la caja de sellado necesitan limpiarse perfectamente, para garantizar una buena adherencia del sellador y un buen funcionamiento a largo plazo.

*a.6) Operaciones de sellado.*

Los selladores líquidos necesitan aplicarse uniformemente. La caja de la junta debe llenarse de la parte inferior hacia arriba, para evitar que queden atrapadas burbujas de aire. No es recomendable rebasar ni llenar completamente la ranura. Una buena costumbre consiste en remeter el sellador cuando menos entre 3 y 6 mm por debajo de la superficie del pavimento. Esto permite que el sellador se expanda durante el rellenado de las juntas en verano. Si no se deja remetido, el sellador se puede extruir hacia la superficie del pavimento donde el tráfico lo puede desplazar de la ranura.

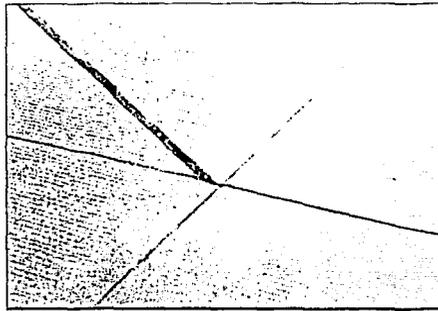


FIGURA III.33. SELLADO DE LA JUNTA

*b) Juntas transversales de construcción.*

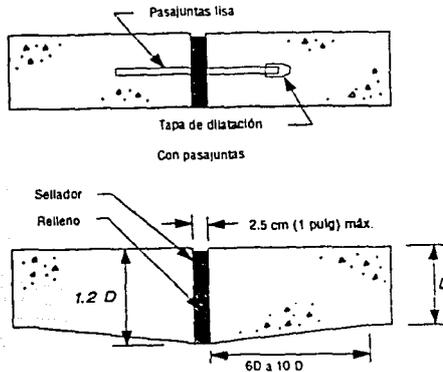
Las juntas transversales de construcción, se instalan al término de la operación diaria de colocación del pavimento o cuando ocurre algún otro tipo de interrupción.

Comúnmente se refieren a las juntas transversales de construcción como cabeceros. Una cabecera es el lugar en que se reanuda la colocación del pavimento al día siguiente. Si la junta transversal de construcción se debe colocar dentro del tercio medio de un tablero proyectado y la pavimentación se realiza adyacente a una losa existente, se deberá ligar la junta. Con varillas de sujeción se evitará el movimiento y virtualmente se eliminará la posibilidad de desarrollar una grieta de afinidad en la losa vecina. Para proporcionar la transferencia de carga los diámetros de las varillas de sujeción deben ser los mismos que se especifican para las pasajuntas.

El método más común para construir la cabecera, es ejecutar la operación de pavimentación para que termine en un tablón de cabecera. La instalación de una tabla de

cabecero implica maniobras por parte del personal que pueden dar lugar a una superficie rugosa. Se colocan pasajuntas a través de la tabla de cabecera en perforaciones hechas con antelación. La consolidación adicional con vibradores manuales debe garantizar un embebimiento satisfactorio de las pasajuntas. Antes de reanudar la pavimentación se quita la madera de cabecera.

Las juntas de construcción transversales no requieren de aserrado inicial. Las dimensiones de la caja de la ranura y las operaciones de limpieza y sellado son las mismas que se usan en las juntas de contracción.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

FIGURA III.34. JUNTA TRANSVERSAL DE CONSTRUCCIÓN

*c.1) Juntas de dilatación con pasajuntas.*

En las juntas transversales de dilatación un extremo de cada barra pasajuntas esta dotado de un tapón de expansión. Este tapón de expansión permite que la dovela se mueva libremente a medida que la junta se dilata y se contrae. La tapa debe ser lo suficientemente larga como para cubrir cuando menos 5 cm de la espiga y debe proporcionar un ajuste hermético. La tapa debe estar equipada con un tope que evite que la tapa se salga de la barra durante la colocación una buena ubicación del tope proporcionará una cobertura mínima de la barra pasajuntas igual a 6 mm más el ancho de la junta de dilatación.

Los mismos requisitos de colocación y alineamiento para pasajuntas exigidos para las juntas de contracción, se aplican a los pasajuntas de expansión. Los dispositivos de

transferencia de carga se colocan normalmente a la mitad del espesor, espaciados entre sí (centro a centro) y un diámetro de 32 mm para losas de 20 a 24 cm de espesor, y de 38 mm para espesores de 25 cm o mayores. Se recuerda recubrir las barras con epoxico para impedir la tendencia a la corrosión en climas extremos.

Una canastilla de dilatación sostiene y alinea las barras pasajuntas y al mismo tiempo sostiene el material de relleno.

Es importante la alineación de la canastilla o sostén de las barras pasajuntas, a fin de permitir el movimiento de la junta.

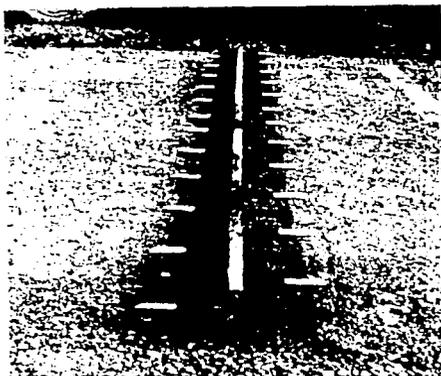


FIGURA III.35. JUNTA TÍPICA DE DILATACIÓN CON PASAJUNTAS. NÓTESE LA ESPIGA DE LAS PASAJUNTAS Y EL MATERIAL DE RELLENO.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

c.2) Juntas de dilatación sin pasajuntas.

Para el caso de juntas de dilatación sin pasajuntas, las caras de las juntas se deben engrosar para reducir los esfuerzos por cargas, desarrollados a lo largo del fondo de la losa. Las losas contiguas deben engrosarse un 20% a lo largo de la junta de dilatación.

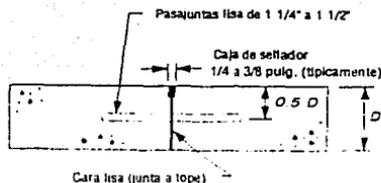


FIGURA III.36. JUNTA TRANSVERSAL DE DILATACIÓN.

d) Junta longitudinal de contracción.

Las juntas longitudinales de contracción se aserran en forma parecida a las juntas transversales de contracción. Con equipo a base de cimbra deslizante, las barras se pueden colocar a mano o mecánicamente por medio de un dispositivo de inserción. Las varillas se introducen a la mitad del espesor con un cierto espaciamiento.

La programación de las operaciones de aserrado para juntas longitudinales no es tan crítica como en el caso de juntas transversales de contracción. En sub-bases rígidas estabilizadas el aserrado de la junta longitudinal debe iniciarse lo más pronto posible, siguiendo con el aserrado longitudinal una vez que las juntas transversales se hayan aserrado inicialmente.

En las épocas con grandes variaciones de temperatura el aserrado debe iniciarse lo más pronto posible.

Generalmente no se necesita una caja para una junta longitudinal de contracción. Un corte de disco de 3.2 a 9.5 mm de ancho es suficiente. La profundidad del corte inicial del concreto endurecido deberá ser cuando menos la tercera parte del sensor de la losa ( $D/3$ ).

Cuando se requiera una caja para sellador un corte inicial con una sierra de discos múltiples de trazo, o con dos discos para dar el corte escogido que se desea. El ancho y espesor de la ranura debe corresponder con las dimensiones deseadas de la caja.

TESIS CON  
FALLA DE CUMPLIR

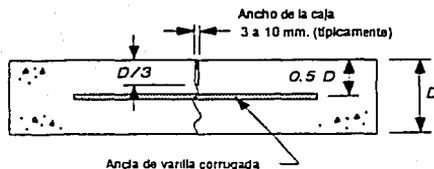


FIGURA III.37. JUNTA LONGITUDINAL DE CONTRACCIÓN.

*e) Juntas longitudinales de construcción.*

Existen tres métodos básicos de colocación de las varillas de sujeción en juntas longitudinales de construcción. El método más común es usar varillas de sujeción dobladas a 90°. Estas se introducen en la parte lateral de la losa durante la pavimentación. Las varillas se enderezan antes de pavimentar los carriles adyacentes.

Otro método consiste en hacer barrenos en la cara de la junta longitudinal. Luego se introducen las varillas de sujeción en las perforaciones y se fijan con una inyección de resina epóxica.

Independientemente del método de colocación de las varillas de sujeción es importante que las varillas de sujeción queden firmemente fijas en su lugar. Se necesita que las varillas de sujeción proporcionen la adecuada resistencia a la extracción para que puedan funcionar correctamente.

Las varillas de sujeción dobladas a 90° deben fabricarse con acero ASTM Grado 40 o según especificaciones de otros aceros comerciales. En las juntas longitudinales de construcción se necesita una caja de ranura más ancha (hasta de 13 mm) para tomar las variaciones en la localización del borde a medida que avanza el proceso de pavimentación. Las operaciones de aserrado y de sellado son semejantes a las que se aplican para las juntas longitudinales de contracción.

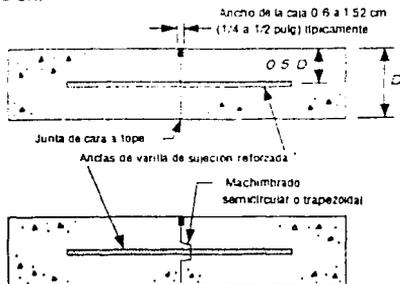


FIGURA III.38. JUNTA LONGITUDINAL DE CONSTRUCCIÓN.

## Capítulo IV

# ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS

Debido a que la infraestructura de las carreteras es fundamental para el desarrollo y crecimiento económico de un país, se le debe de dar la importancia que requiere para tener una correcta planeación, diseño y construcción debido a la gran inversión que se hace así como para un correcto mantenimiento.

Si se toma en cuenta la clasificación de los dos tipos de pavimentos en los cuales se han clasificado (flexibles y rígidos), se cuentan con estas opciones de las cuales se seleccionará la mejor en función de múltiples factores o criterios de selección.

Es importante hacer notar que para tomar la decisión entre una y otra solución deberá tenerse en cuenta las condiciones locales y particulares de cada proyecto, mismas que tendrán repercusiones en los costos finales.

A continuación se presenta la comparativa de algunos factores que son importantes y se deben tomar en cuenta antes de elegir entre pavimento rígido (concreto hidráulico) y el pavimento flexible (concreto asfáltico)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### IV.1 ANÁLISIS DE COSTO DE CICLO DE VIDA

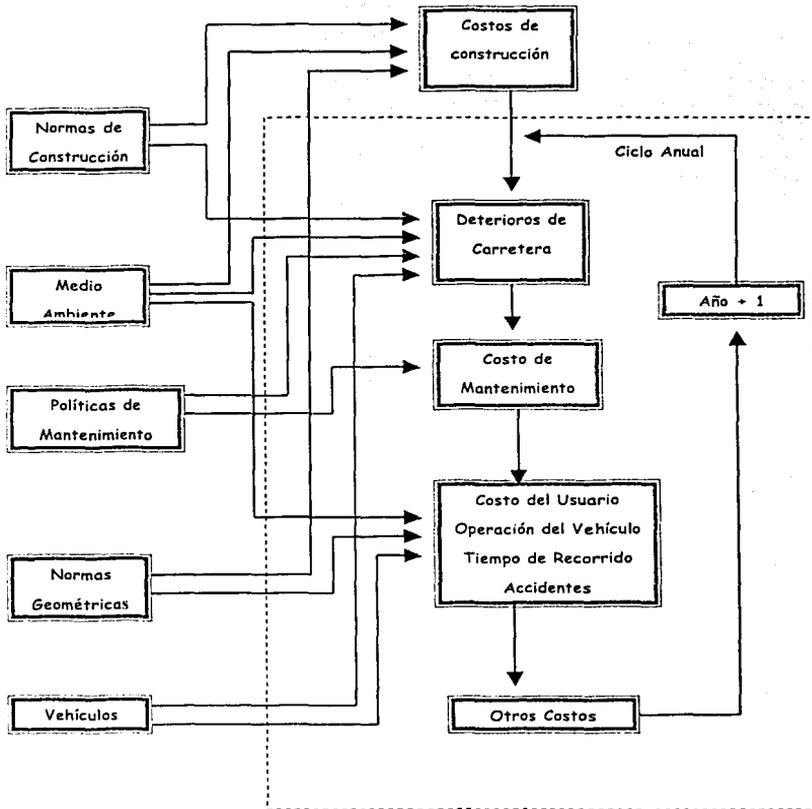
La relevancia de Análisis del Costo de Ciclo de Vida como herramienta para la toma de decisiones en la inversión de proyectos carreteros fue demostrada en los estudios llevados a cabo a fines de los 70's. Estos estudios también demostraron de una manera cuantitativa la importancia que reviste el costo de operación de un vehículo por el deterioro de un camino y su efecto en los niveles de inversión. Sumas relativamente pequeñas en la conservación adecuada de un camino pueden tener resultados económicos favorables.

Ha quedado claro que por ser el transporte una parte significativa del Producto Interno Bruto de la Nación, el análisis del costo de ciclo de vida para la toma de decisiones adquiere gran relevancia.

Este concepto del ciclo de vida involucra todos los costos que se deben de tomar en consideración para la selección de una alternativa de construcción de una carretera; tales como:

- Costo de construcción (geometría del camino, diseño del pavimento y drenajes)
- Costo de deterioro y conservación (por tipo de pavimento y por rugosidad)
- Costo del usuario (costo de operación de los vehículos, consumo de combustible, composturas, tiempos de recorrido y accidentes)
- Otros costos (elaboración de proyectos, financiamiento, administración, ambientales)

Esquema del costo cíclico anual de un camino

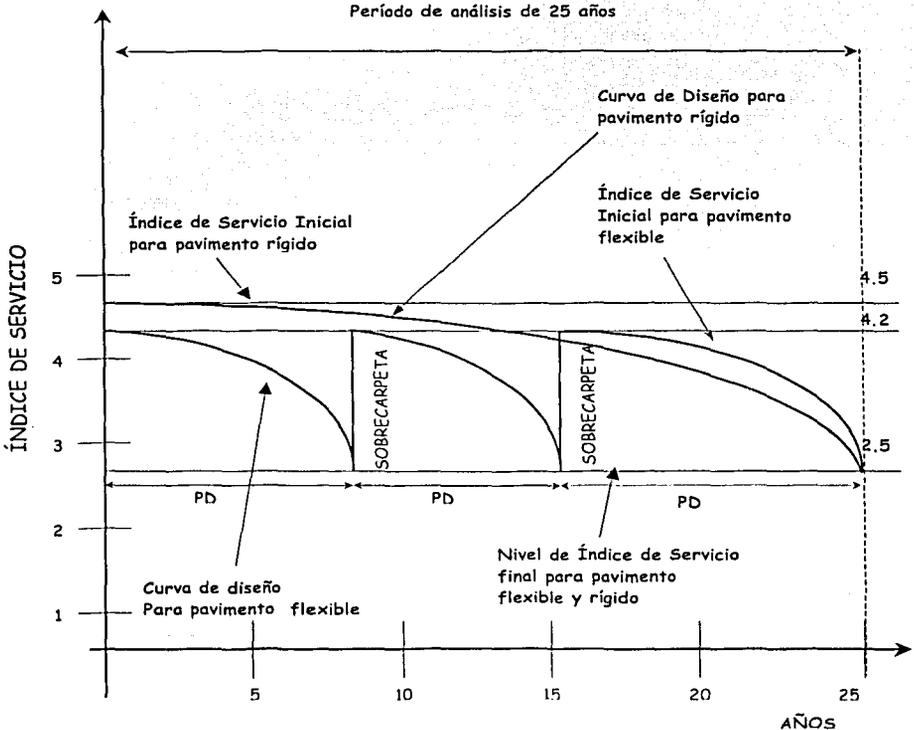


La importancia del costo de operación se destaca por el peso que tiene dentro del costo total de un camino. Datos del Banco Mundial señalan que si en un camino se exceden los 50 vehículos diarios, los costos de operación serán mayores a la suma de los costos de construcción inicial y de conservación durante la vida útil.

En México será conveniente utilizar este tipo de herramientas en la selección de proyectos, con el objeto de comparar las ventajas y oportunidades en el uso de alternativas para la construcción y rehabilitación de caminos.

Gráfica del ciclo de vida

Diferencial de comportamiento entre los pavimentos de concreto hidráulico y los asfálticos.



## IV.2 ANÁLISIS DE COSTOS

Al aumentar la duración del pavimento, disminuir sus gastos de mantenimiento y facilitar los trabajos de reparación, los pavimentos de concreto hidráulico resultan, a la larga, más económicos que los de asfalto. Se ha intentado establecer una fórmula general para determinar a partir de que espesor de base es preferible la utilización del pavimento de concreto hidráulico.

Se debe tomar en cuenta no sólo el costo inmediato, sino también el mantenimiento de ambos, a lo largo de 25 años. Salvo el caso de pavimentos en zonas secas y con terracerías de calidad, los pavimentos de concreto hidráulico resultan más económicos que los de asfalto, dentro de su período de vida útil.

El pavimento de concreto hidráulico mejora las expectativas de obtener un punto de equilibrio entre el costo inicial de construcción y el costo de operación del transporte. Muchas veces los ahorros mal entendidos en el costo inicial de construcción conllevarán a mayores gastos de operación y conservación.

En términos generales el costo de mantenimiento de un pavimento asfáltico es de cuatro veces mayor que uno de concreto hidráulico; que el costo de un  $m^3$  de concreto hidráulico es dos veces mayor que de la mezcla asfáltica, tomado en cuenta ambos materiales ya colocados y acabados y que la duración del pavimento de concreto en nuestro país, es el doble que el del asfalto.

Para tener un parámetro más claro en cuenta al costo de una carretera de pavimento rígido y una de pavimento flexible, en el anexo al capítulo IV se presenta una tabla comparativa de estos dos tipos de pavimentos.

### Respecto al Concreto Hidráulico:

- Su costo inicial es casi idéntico para diseños iguales.
- Requiere de poco mantenimiento.
- Existen distribuidores de cemento en casi todas las poblaciones.
- Requiere menos consumo de energía para iluminación; por requerir especificaciones para alumbrado menores.
- Costo menor a mediano plazo ya que no requiere mantenimiento permanente.
- Se reduce el mantenimiento de vehículo. Ahorro estimado en combustible del 10% para vehículos pesados al no deformarse el pavimento de concreto bajo la rueda.
- En producción masiva se amortiza rápidamente, obteniéndose tiempos de construcción excelente.
- Los costos en construcción resultan uno a uno en comparación del asfalto por no requerir en general capas de base y sub-base entre otros factores.

Respecto al Concreto Asfáltico:

- El costo fluctúa de acuerdo al precio del petróleo.
- Mantenimiento continuo: reparaciones costosas.
- Hay que transportarlo de lugares lejanos.
- Los costos de iluminación son mas elevados ya que se requiere de mayor mantenimiento los surcos o baches dañan los vehículos.

### IV.3 FUNCIONALIDAD Y OPERACIÓN

La prueba AASHTO demostró ampliamente el diferencial de comportamiento entre los pavimentos de concreto hidráulico y los asfálticos, puesto que a igual número de aplicaciones de carga el comportamiento de los primeros resultó sumamente mejor que el de asfalto.

Se ha comprobado que los pavimentos hidráulicos tienen una duración mínima de 25 años. Uno de los motivos de esta larga duración es que los pavimentos de concreto hidráulico (cuando están bien contruidos), no tiene daño en los derrames de combustibles que tanto dañan a los de asfalto. Otra característica es que no se encuentran sujetos a deformaciones continuas durante su uso, como en el caso de material asfálticos. Los arrugamientos tanto transversales como longitudinales se deben a la presión ejercida por las llantas de los vehículos. Los pavimentos de concreto ofrecen mejor resistencia a las presiones de arranque, enfrenamiento y circulación producidas por el tráfico.

Respecto al Concreto Hidráulico:

- Su comportamiento es duradero: la duración y la resistencia a la fatiga de este tipo de pavimento supera en mucho al de los asfaltos.
- Puede ser diseñado para recibir ataques de sustancias químicas, aceites y el intemperismo.
- Soporta sobrecargas con pocas cimentaciones.
- Resiste las fallas del firme, ya que distribuye las cargas.
- No le afecta el calor; no se vuelve viscoso o fluido.
- Tiene mejor comportamiento en áreas difíciles donde son comunes cargas pesadas con paradas y arranques continuos.

Respecto al Concreto Asfáltico:

- Duración en servicio limitado hay que reparar.
- Lo afectan aceites químicos y el clima.
- Los vehículos pesados los dañan.
- Las cargas pesadas de los camiones le producen fallas.
- El calor le causa viscosidad, pérdida de materiales y superficie irregular.
- Comúnmente falla en áreas difíciles: calzadas con pendiente, áreas de colección de basura, áreas de maniobras, muelles de carga, etc.

#### IV.4 DISEÑO

La principal diferencia entre estos pavimentos es la forma en la cual distribuyen las cargas al terreno de soporte. Los rígidos, a causa de su módulo de elasticidad alto y de su rigidez tienden a distribuir la carga sobre una considerable área de suelo, por lo que gran parte de capacidad estructural del pavimento es proporcionada por la losa de concreto en si misma, por esta razón, las variaciones menores en la resistencia del terreno del soporte tiene poca influencia en la capacidad estructural del pavimento rígido. Por otro lado, los pavimentos flexibles funcionan con el principio del sistema de capas, para obtener la capacidad estructural de soporte de cargas de los mismos, por lo que deben tener la capa más resistente y de más alta calidad en la superficie.

Respecto al Concreto Hidráulico:

- Excavación mínima; usualmente se usa sobre la base existente.
- Requiere de menores estándares de iluminación.
- Puede diseñarse para las cargas especificadas.
- Su resistencia aumenta con la edad.
- La garnición y la cuneta se integran.
- No requiere contratistas especializados.

Respecto al Concreto Asfáltico:

- Requiere materiales adicionales.
- Requiere mayores estándares de iluminación.
- Incertidumbre en la resistencia de diseño.
- Flexible, no gana resistencia.
- La garnición, cuneta y pavimento son elementos separados.
- Requiere contratistas y equipo para asfalto y concreto.

## IV.5 CONSTRUCCIÓN

En los pavimentos de concreto hidráulico los tiempos de ejecución son sensiblemente menores, pues la colocación del pavimento es en una sola etapa incluyendo la del curado y acabado; en cambio en los pavimentos asfálticos se requieren de varias etapas de construcción como son: capas de sub-base, base, riegos, carpeta asfáltica y sello.

### Respecto al Concreto Hidráulico:

- La obra se termina rápidamente en una sola operación.
- Hay plantas de premezclado en todas partes.
- La construcción es más fácil, sencillamente se cuela.
- Se cuela en cualquier clima.
- El suministro de materiales debe ser continuo, pues de lo contrario se pierde totalmente la alta eficiencia y productividad del tren de maquinaria.
- No se puede hacer en fases.

### Respecto al Concreto Asfáltico:

- Sistema de construcción basándose en capas múltiples.
- No hay plantas de asfalto en todas partes; puede haber demoras.
- Muchas etapas y pocos contratistas bien equipados.
- Sólo puede colocarse estando el material caliente.
- Requiere de plantas y maquinaria costosa.
- Se puede hacer en fases.

#### IV.6 UTILIZACION DE ENERGÍA

Los pavimentos que utilizan como materia prima el asfalto, presuponen un alto consumo de este material y de solvente que seguramente tendrían una mejor aplicación en otras ramas industriales. El concreto (por el contrario) al tener como primordial aglutinante cemento fabricado con calizas, arcillas y otros elementos abundantes en la naturaleza, no ocasiona con su creciente empleo ningún efecto negativo para el futuro de la raza humana. Otra de las ventajas de los pavimentos de concreto hidráulico es su mejor capacidad de reflejar la luz. También debido al diferencial de flexión entre la superficie de concreto hidráulico y de asfalto, los consumos de combustible para los vehículos pesados que circulan sobre pavimentos de concreto hidráulico son alrededor del 20% menores que en los de asfalto y por último su mejor capacidad de soportar las cargas producidas por el tránsito, las cuales consumen gran parte de la vida un camino.

##### Respecto al Concreto Hidráulico:

- Se produce con materiales locales.
- Las reparaciones pueden hacerse con materiales locales.
- La mezcla de concreto no requiere calentarse.
- Requiere menos consumo de energía para la iluminación por ser pavimentos con mayor reflexión.

##### Respecto al Concreto Asfáltico:

- Se hace basándose en petróleo.
- Las reparaciones se hacen con materiales basándose en petróleo y requiere periódicamente selladores y recubrimiento.
- El asfalto debe aplicarse en caliente.
- Requiere mayor consumo de energía para la iluminación por ser pavimentos de color negro.

## IV.7 SEGURIDAD

El factor seguridad es de vital importancia por lo que existen especificaciones en cuanto a diseño y construcción de carreteras, las cuales afectan la selección de un tipo de pavimento u otro. Dichas especificaciones incluyen normas y recomendaciones adicionales para los pavimentos, a las que el proyectista debe apegarse en forma estricta. El factor seguridad puede influir aisladamente o en interacción con otros factores en la decisión definitiva.

### Respecto al Concreto Hidráulico:

- Excelente reflexión de la luz; requiere menor iluminación; se logra mejor visibilidad a mayor distancia, mejora notablemente la visibilidad nocturna, repercutiendo en alta seguridad.
- Tiene mayor resistencia a los derrapes.
- El escurrimiento evita el deslizamiento.
- Puede ranurarse para mejorar el escurrimiento.
- Marcha uniforme, mejor textura.

### Respecto al Concreto Asfáltico:

- La poca reflexión del asfalto hace que se requiera mayor iluminación.
- Cuando está mojado es más resbaloso.
- Los baches retienen agua.
- No puede ranurarse adecuadamente.
- Las superficies y los baches lo hacen más riesgoso.

## IV.8 MANTENIMIENTO

Los pavimentos de concreto requieren un mantenimiento mínimo, que consiste en el oportuno calafateo de las grietas que llegasen a aparecer y a la reposición del material bituminoso, en aquellas juntas de expansión o construcción que, por algún motivo lo han perdido. En cambio, los pavimentos asfálticos requieren de riegos de sello, por lo menos cada tres años. Necesitan un continuo y cuidadoso bacheo o bien la reposición de la carpeta en las zonas, que por razón natural se ha deteriorado. Se calcula empíricamente que cada año hay que reponer no menos del 10% de la superficie pavimentada con materiales asfálticos y que en un período que varía del sexto al décimo año habrá que agregar otra capa de carpeta y reconstruir la base de aquellas zonas que presenten mayores daños.

## ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

Para los organismos municipales, estatales ó federales y también para los efectos que resiente el público resulta más sencillo efectuar reparaciones en pavimento de concreto hidráulico que en los asfálticos. En el caso del concreto bastará con disponer de cemento, agregados y una pequeña revolvedora para alguna zona dañada, por sustitución o una nueva instalación hidráulica en cambio, para reparar un pavimento de asfalto se requiere tener en el lugar un equipo de bacheo y uno de compactación.

### Respecto al Concreto Hidráulico:

- Costo anual bajo; no requiere presupuesto adicional para mantenimiento.
- Requiere poco servicio de limpieza.
- Las reparaciones pueden hacerse uniformes, nítidas con facilidad.
- Requiere de menos equipo y mano de obra especializada.
- Ahorro en el mantenimiento mayor al no requerir sobre carpetas periódicas.
- Su vida útil es de 20 a 30 años.

### Respecto al Concreto Asfáltico:

- Requiere sellado, bacheo, rellenado rutinario.
- Requiere barrerse, las depresiones acumulan suciedad.
- Reparaciones irregulares, requiere de selladores de asfalto líquido.
- Requiere más equipo y mano de obra.

El factor de mantenimiento es de vital importancia entre los factores de selección. Todo pavimento, cualquiera que sea su clase o categoría, requiere forzosamente de mantenimientos preventivos y correctivos, con el objeto de alcanzar su vida útil con un servicio adecuado y seguro.

En los pavimentos rígidos o flexibles, cuando es llevado a cabo el mantenimiento preventivo o menor en los periodos prefijados desde el proyecto y con base a evaluaciones rutinarias del pavimento, se ayudará a evitar mantenimiento mayores como son rehabilitaciones o reconstrucciones.

## Capítulo

## V

# DISEÑO DEL PAVIMENTO RÍGIDO EN LA AUTOPISTA GUADALAJARA-TEPIC.

A continuación se mencionan los criterios para el diseño y construcción de pavimentos de concreto hidráulico para la autopista Guadalajara-Tepic. Es formalmente el primer pavimento de este tipo que se construye en una carretera mexicana en más de 35 años.

Para realizar el proyecto y fijar sus normas complementarias se hicieron estudios de campo, como el uso de pesadores dinámicos, equipos automáticos de deflexión, etc. y un gran número de pruebas de laboratorio que proporcionaron parte de la información requerida para los trabajos de gabinete que incluyeron que el pavimento requerido era una sub-base granular impregnada de 15.0 cm de espesor como apoyo de las losas de concreto de 25.0 cm de grosor y la utilización de pasajuntas de acero para mejorar la transferencia de carga entre las juntas.

El tramo referido tiene una longitud aproximada de 24.0 Km, con cuatro carriles de circulación y una sección transversal de losas de concreto de 21.0 m de ancho, que comprende tanto los carriles de circulación como los acotamientos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

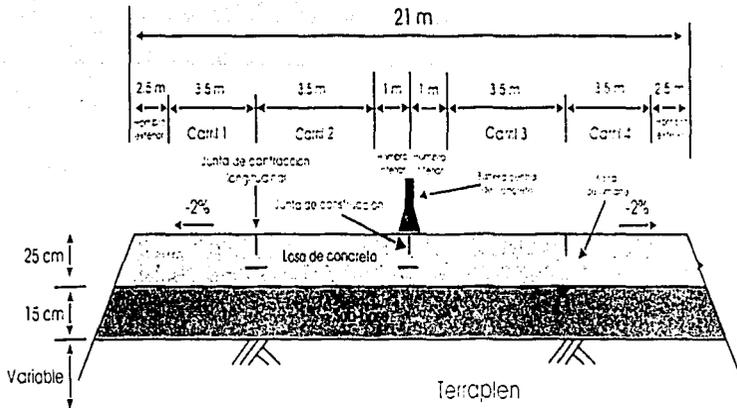


FIGURA. V.1 SECCIÓN TRANSVERSAL TÍPICA DE LA CARRETERA

Para elegir el tipo de pavimento rígido, así como sus características y obras complementarias, se tuvo la premisa de que se debía construir un pavimento flexible y que al mismo tiempo, tuviera en su diseño los factores de seguridad suficientes para que garantizara una estructura que ofreciera una superficie de rodamiento cómoda, segura y duradera.

La primera decisión fue delimitar la longitud del tramo en que se construyera este tipo de pavimento dentro del estado de Jalisco, se eligió el Km 1+480, que corresponde al inicio de la autopista después del entronque y el Km 25+500, sitio a partir del cual, la vía cruza una pequeña sierra, con terraplenes de más de 30.0 m de altura, en los que cualquier asentamiento pequeño de estas estructuras podía dañar seriamente las losas de concreto, por lo cual no se juzgó conveniente utilizarlas en un tramo mayor.

En los párrafos siguientes se presentan y se discuten: los parámetros elegidos para el diseño de espesores, el método empleado y los resultados del diseño, las decisiones que se tomaron para optimizar el comportamiento del pavimento, los criterios fijados para garantizar la durabilidad del concreto utilizado, el control de calidad aplicado y las conclusiones que se pudieran extraer después de construido este tramo.

## PARÁMETROS ELEGIDOS PARA EL DISEÑO DE ESPESORES DE LOSAS

### > VIDA DE SERVICIO

El período de análisis elegido fue de 20 años, debido a que con este lapso se cumple ampliamente el tiempo de concesión. Sin embargo, al terminar el periodo señalado, se espera programar varias etapas de rehabilitación que alargaran la vida de servicio de este pavimento.

### > TRÁNSITO

El tránsito es el factor más importante en el diseño de espesores, su calculo debe incluir la magnitud de las cargas, la configuración de ejes y el número acumulado de cada tipo de carga. Para estimar este parámetro, se hizo uso del concepto de tránsito equivalente, que convierte el volumen de tránsito mezclado a ejes sencillos de 8.2 ton (18,000 lbs) de peso, por comparación de los esfuerzos de flexión críticos causados en el concreto por cualquier carga y la de referencia, para calcular un factor de daño por cada tipo de eje o vehículo.

Para calcular el tránsito equivalente total acumulado, se tomo la vida del proyecto de 20 años y una tasa de crecimiento anual del tránsito de 4% que es la medida en la región de acuerdo a las estadísticas de mas de 30 años de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

El tránsito diario inicial, se determinó con base en los resultados de aforos directos realizados durante febrero del año en curso, que incluyeron el uso de pesadores dinámicos, para medir el peso real de cada vehículo, estos aforos se hicieron en la carretera de cuatro carriles entronque Periférico-Entronque Ameca.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

### Datos Asumidos en el Análisis

Tránsito diario promedio anual = 4000

Factor de dirección = 50 %

Factor de carril = 30 %

Incremento anual = 4 %

Vehículos	
Automóviles (AP)	Tractor semi remolque (T2-S1)
Camionetas (CA)	Tractor semi remolque (T2-S2)
Autobuses (AB)	Tractor semi remolque (T3-S2)
Camiones de 2 ejes (C2)	Tractor semi remolque (T3-S3)
Camiones de 3 ejes (C3)	Tractor doble remolque (Doble)

	AP*	C2	AB	C-3	T2-S1	T2-S2	T3-S2	T3-S3	Doble	Total
% Transito promedio diario (TPD)	91.9	7.5	3.9	3.1	0.0	0.4	2.5	2.5	2.5	1.0
Tránsito promedio diario	3758	300	156	124	0	16	100	100	100	1550
Tránsito promedio	596.500	109.500	252.500	45.250	0	5.800	35.500	16.500	30.400	1460.200
Tránsito promedio 20 años	29.351.772	3.260.700	6.543.168	1.847.750	0	173.904	1.286.900	1.286.900	1.286.900	43.275.996
Coeficientes										
Factor de carga de veh**	0.025	0.5	1.8	1.2	1.4	1.6	3.5	5.4	3.8	
Tetra ESAL's 10 años	73.474	816.175	4.667.561	1.560.297	0	279.240	3.771.563	5.659.250	4.137.270	29.170.375

\* AP incluye automóviles y camionetas

\*\* Los factores de carga equivalentes se obtuvieron del estudio de peso de vehículos en movimiento

Total ESAL's	29.170.375
Factor de distribución	0.5
Factor de utilización	0.9
ESAL's cent de diseño	13.177.669

FIGURA V.2 DATOS DEL TRÁNSITO AUTOPISTA GUADALAJARA-TEPIC.

### RESISTENCIA DEL CONCRETO

Para elegir la resistencia del concreto, de acuerdo a los bancos de agregados disponibles en la zona, se realizaron dosificaciones teóricas y de laboratorio en un número cercano a veinte y con una gran cantidad de ensayos de resistencia que incluyeron pruebas de flexión en vigas, de compresión en cilindros con la técnica brasileña, (VER EL ANEXO AL CAPITULO V)

Después de lo anterior, se tomo para fines de diseño un modulo de ruptura de 45 kg/cm<sup>2</sup> como valor medio determinado a los veintiocho días y con la prueba de carga en los tercios de acuerdo a la prueba AASHTTO F97 o ASTM C78.

También se tomo un modulo de elasticidad del concreto de 294 kg/cm<sup>2</sup>, calculado a través de una relación empirica con la resistencia a la compresión media de 380 kg/cm<sup>2</sup>, obtenida a los veintiocho días de fabricado el concreto.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## RESISTENCIA Y TIPO DE SUB-BASE

La elección del tipo de sub-base fue un factor importante para decidir si se construía un pavimento rígido, ya que cuando se hizo el estudio de factibilidad se revisaron las condiciones de las terracerías y se encontró que en todo el tramo son de buena calidad, ya que se trata de arenas pumíticas (SM) con resistencias altas medidas en pruebas de valor relativo de soporte (más de 30%) prácticamente sin elasticidad; por lo cual, la primera alternativa estudiada fue utilizar la superficie de las terracerías (FIGURA V. 3) como apoyo de las losas; sin embargo, dadas las tolerancias en el acabado, contenido de finos relativamente altos y textura cerrada, se tomó la decisión de construir una sub-base para tener una plataforma de trabajo adecuada para el equipo de construcción pesada, una capa para controlar el fenómeno de bombeo y disminuir la fricción entre la losa y su terreno de apoyo.



FIGURA V.3 ASPECTO DE LA SUPERFICIE DE LA TERRACERÍA.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La revisión del comportamiento de tipos diferentes de sub-base, para elegir el más conveniente, dio como resultado lo siguiente:

Las sub-bases estabilizadas con cemento, suelo cemento o concreto pobre, aunque tienen la ventaja de una mayor rigidez, en general, no ha tenido un buen comportamiento porque las losas construidas sobre ellas han mostrado agrietamientos excesivos tanto longitudinales como transversales, debido a que, aunque su rigidez da un soporte adecuado a las losas, no tiene la flexibilidad suficiente para adaptarse a las deflexiones de las losas, debidas a cargas y/o temperaturas.

En la figura V.04, se muestran los resultados de un estudio extenso hecho en el estado de Florida en Estados Unidos, en la cual se muestra la relación entre el módulo de reacción  $k$  de la sub-base y el agrietamiento de losas del pavimento y puede notarse que para valores de  $k$  menores de  $5.5 \text{ kg/cm}^3$  y mayores de  $16.6 \text{ kg/cm}^3$ , el agrietamiento es mayor, mientras que las secciones con agrietamiento menor, son aquellas que tienen módulos de reacción entre  $5.5$  y  $16.6 \text{ kg/cm}^3$ .

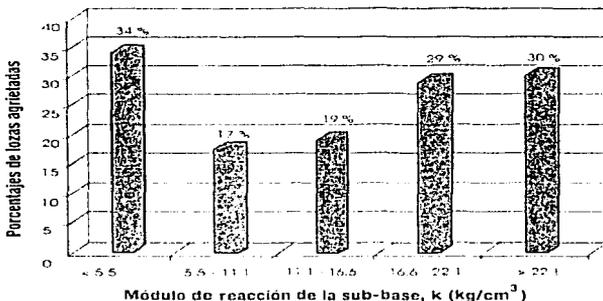


FIGURA V.04 EFECTO DE LA RIGIDEZ DE LA SUB-BASE EN EL AGRIETAMIENTO DEL PAVIMENTO.

Por otra parte, las sub-bases formadas con agregados sin ligantes, han tenido un comportamiento satisfactorio si tienen una buena distribución granulométrica, textura abierta y una permeabilidad alta ya que ayudan a amortiguar los esfuerzos de alabeo de las losas y su mayor desventaja que son las deflexiones en las esquinas, se pueden reducir con el uso de pasajuntas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

De acuerdo a lo anterior, se eligieron de los materiales disponibles una mezcla de escorias volcánicas (tezontle) con trituración parcial y arenas limosas en una proporción 80-20 en volumen, con lo cual se tiene un material con una curva granulométrica de sub-base, el cual tendido y compactado a un espesor de 15 cm presentó una textura adecuada y las 19 pruebas de placa realizadas sobre su superficie dieron un modulo de reacción medio de  $18 \text{ kg/cm}^3$  que indica una buena resistencia y conserva cierta flexibilidad.

### COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CARGA

Este coeficiente es el factor que se utiliza en el diseño de pavimentos de concreto, para tomar en cuenta la habilidad de la estructura del pavimento para transferir carga a través de juntas o grietas transversales. El uso de pasajuntas y acotamientos de concreto con barras de amarre, incrementa la capacidad de transferencia de la carga y disminuye el valor de este coeficiente.

Estudios teóricos han mostrado que funcionan mejor las juntas con pasajuntas ya que se esperan reducciones de un 20 % en reflexiones y esfuerzos, en relaciones a las juntas que no los tienen. Esa reducción en las deflexiones disminuye el bombeo, el levantamiento entre losas y los agrietamientos. Estudios de comportamiento en Florida han mostrado que las secciones con juntas y pasajuntas exhiben un 30 % menos de levantamientos de losas y menos agrietamientos en las esquinas, comparadas con las secciones de juntas simples. Una ventaja adicional es que al restringir los pasajuntas el movimiento vertical de losas adyacentes se tiene una mejor calidad de rodamiento.

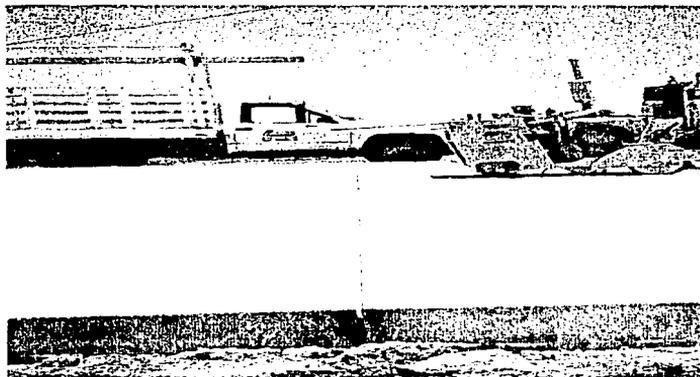


FIGURA V.5 ASPECTO DE LA JUNTA TRANSVERSAL: LA GRIETA SE HA DESARROLLADO TOTALMENTE EN EL ESPESOR

## ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

De acuerdo a lo anterior se decidió colocar pasajuntas incluyendo los acotamientos de concreto, para evitar en estos últimos que el paso de una carga pesada pudiera agrietar las juntas de las losas por la falta de estos elementos.

El diseño de los pasajuntas dio como resultado elementos redondos de acero liso de 3.18 cm (1 1/4") de diámetro, de 45 cm de longitud y una separación centro a centro de 30 cm.

Para las condiciones anteriores, al coeficiente de transferencia de carga se le considero un valor de 2.7

### **COEFICIENTE DE DRENAJE, Cd**

El agua es un factor primario en los daños del pavimento, ya que puede saturar las terracerías y la sub-base, además de provocar el bombeo de finos no plásticos a través de las juntas o grietas. Esto puede producir pérdidas de capacidad de carga de polvo de las losas, asentamientos de las mismas y/o movimientos verticales entre ellas.

El coeficiente Cd toma en cuenta las condiciones de drenaje en que va a operar la vía y el porcentaje de tiempo en que la carretera va a estar expuesta a niveles de humedad altos.

En este caso se tomó un valor de  $Cd = 1.0$ , que considera que la autopista tiene condiciones adecuadas de drenaje, para desalojar el agua rápidamente en una zona cuya precipitación media anual es de 1000 mm.

### **INDICES DE SERVICIO**

El índice de servicio de un pavimento es su habilidad para servir al TRÁNSITO, la escala más usada es de 0 a 5, que representa niveles diferentes de deterioro, el 5 para pavimentos en condiciones de rodamiento perfectas, mientras que en cero son intransitables. En la práctica, estos extremos no existen.

El índice de servicio actual inicial  $P_o$ , representa la condición inmediatamente después de la construcción, que en este caso se consideró de 4.5 para fines del diseño de espesores y el índice de servicio terminal  $P_t$ , es el índice más bajo que será tolerado antes que cualquier tipo de rehabilitación sea necesario. En este caso, se fijó un valor de 2.5 por considerarse que se trata de una autopista importante.

### **CONFIABILIDAD, (R)**

La confiabilidad es la probabilidad estadística que un pavimento cumpla adecuadamente sus funciones durante la vida de proyecto. Para este caso, dado que se trata de una autopista concesionada, en donde se paga por un servicio rápido, seguro y cómodo, se tomó un valor de confiabilidad del 95%.

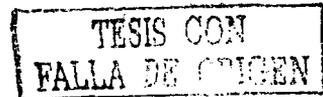
Para la aplicación del concepto de confiabilidad se requiere elegir una desviación estándar que sea representativa de las condiciones locales. En este caso después de medir la dispersión en varios conceptos, como son espesores de sub-base, calidad de materiales, etc. se eligió un valor de desviación estándar general 0.35.

## DISEÑO DEL PAVIMENTO DE CONCRETO

Se utilizaron dos métodos de diseño, el de la PCA ( Portland Cement Association ) y el de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), se eligió este último como base para el proyecto, ya que las variables que involucra se pueden analizar y ajustar adecuadamente sus valores y en los estudios de comportamiento muestra buenos resultados.

Después de varias corridas de cómputo, se llegó a un espesor de la losa de 9.7 pulgadas (25.0 cm), para los valores siguientes presentados y discutidos en el capítulo anterior:

➤ Tránsito equivalente acumulado:	EWL= 11,780
➤ Módulo de ruptura del concreto:	Mrc= 45 kg/cm <sup>2</sup>
➤ Módulo de elasticidad del concreto:	Ec= 294,000 kg/cm <sup>2</sup>
➤ Módulo de reacción de la sub-base:	K= 18.0 kg/cm <sup>2</sup>
➤ Coeficiente de transferencia de carga:	J= 2.7
➤ Coeficiente de drenaje:	Cd= 1.0
➤ Índice de servicio actual inicial:	Po= 4.5
➤ Índice de servicio terminal:	Pt= 2.5
➤ Confiabilidad:	R= 59%
➤ Desviación estándar general:	So= 0.35



Para verificar el diseño, con el espesor de losa de 25 cm y algunos de los parámetros ya señalados, por medio de un programa de cómputo, se aplicó para que generaran parcialmente las cargas máximas esperadas, en las losas. En este caso se consideró como posición crítica de la carga, la orilla de la losa y realizó el cálculo para dos condiciones de trabajo de la base de apoyo (sub-base y terracerías) de las losas, una, que se comporta como líquido denso y la otra que reacciona como un sólido elástico.

En ninguna de las condiciones, el esfuerzo máximo calculado rebasó la mitad del valor del módulo de ruptura del concreto (45 kg/cm<sup>2</sup>), por lo cual, se espera de acuerdo al principio de Miner, que las losas resistan un número grande de repeticiones de carga.

Adicionalmente se hizo un estudio de sensibilidad al cambio de cualquiera de las variables, encontrándose poca variación en el espesor requerido. Debido a que con los valores utilizados, el factor de seguridad ponderado en el diseño es de 3.8, por lo cual se dejó como espesor definitivo de proyecto los 25.0 cm.

VARIABLES QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO DEL PAVIMENTO

Características de las losas espaciamento de las juntas

Las juntas transversales de contracción, se utilizan para reducir los esfuerzos de tensión en el concreto producidos por el alabeo y contracción de las losas; en este caso, se calculó un espaciamento preliminar mediante un programa de cómputo que toma en cuenta las propiedades térmicas de los materiales utilizados en el concreto, su resistencia a la reflexión y los gradientes de temperatura en la losa calculados a partir de las condiciones climáticas de la región.

El resultado fue un espaciamento de 6.7 m, mismo que se aplicó en un tramo de prueba con resultados satisfactorios, sin embargo para tener mayor factor de seguridad, cubrir las especificaciones de organismos con gran prestigio en este campo y tomando en cuenta el procedimiento constructivo que se iba a aplicar, se fijó un espaciamento longitudinal de 6.0 m que cumple con la regla que establece que la longitud de losa no debe ser mayor a 24 veces su espesor (AASHTO, 1993)

Las juntas longitudinales que se utilizan para reducir los esfuerzos de alabeo y contracción en el concreto se dejaron a distancias de 4.0 y 6.0 m respectivamente tal como se muestran en la figura V.06 que se muestran a continuación.

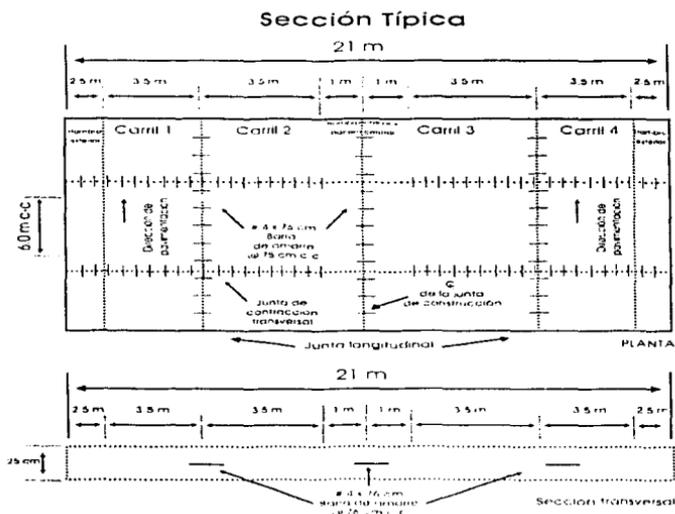


FIGURA V.6 DISTRIBUCIÓN DE JUNTAS Y BARRAS DE AMARRE.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



FIGURA V. 7 ASPECTO DE LAS JUNTAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES.

Las juntas de expansión sólo se dejaron en contacto con otras estructuras, porque los estudios de comportamiento han mostrado que son difíciles de conservar y susceptibles al fenómeno de bombeo.

En las juntas de construcción, tanto longitudinales como transversales, se decidió utilizar barras de amarre de 1.27cm (1/2") de diámetro para asegurar la continuidad del pavimento.

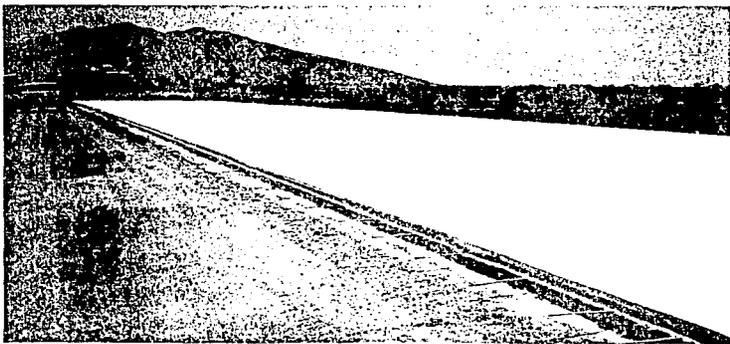


FIGURA V. 8 ASPECTO DE LAS BARRAS DE AMARRE.

## ORIENTACIÓN DE LAS JUNTAS DE CONTRACCIÓN

Usualmente las juntas de contracción se colocan a intervalos fijos y perpendiculares al centro de líneas de la corona de la vía, pero se analizó colocarlas esviadas y a distancias aleatorias dentro de cierto rango, ya que de esta forma las dos ruedas de un eje, no pasan simultáneamente por la junta, esto minimiza la molestia al pasar sobre juntas desniveladas, reduce la resonancia y por lo tanto mejora la comodidad del rodamiento.



FIGURA V.9 PASAJUNTAS MONTADAS EN SILLETAS PARA EVITAR QUE DESPLACEN EL COLADO.

Sin embargo, de estudios exhaustivos de comportamiento realizados (Smith, 1990, Armaghani, 1993), se concluye que las juntas esviadas no han mostrado un mejor funcionamiento que las perpendiculares, ya que se ha observado con mucha frecuencia agrietamiento en las esquinas de las losas que forman ángulos obtusos con la junta y además, también en muchas juntas han ocurrido desajustes en la posición y orientación de los pasajuntas.

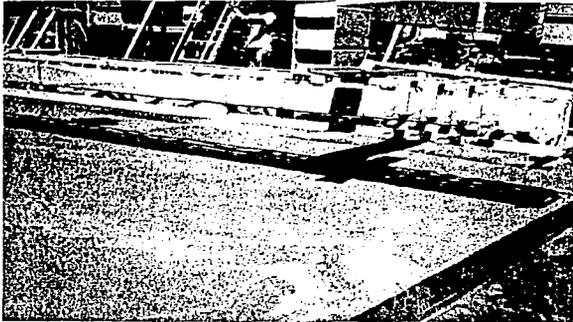


FIGURA V.10 TRABAJOS DE ACABADO DE LA AUTOPISTA.

ACERO PARA ABSORBER ESFUERZOS EN LAS JUNTAS

En este proyecto, se utilizaron para mejorar en función de las juntas dos tipos de elementos: pasajuntas y barras de amarre.

Los pasajuntas ya mencionados anteriormente, se colocan a través de las juntas de contracción para transferir las cargas a la losa adyacente. Los esfuerzos en estos elementos son de corte, flexión y soporte, su análisis teórico es complejo, pero está resuelto y lo han resumido en una receta: que el diámetro de la barra sea del orden de 1/8 del espesor de la losa, por lo cual en este caso se utilizaron barras de 3.18 cm (1 1/4") de diámetro.

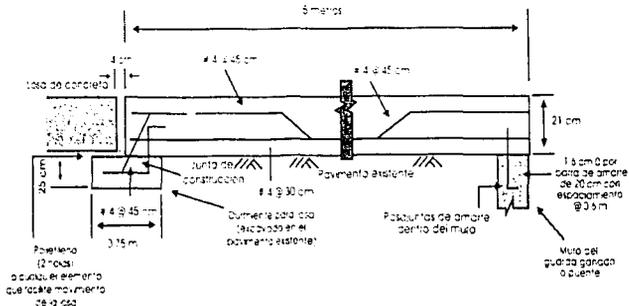


FIGURA V.11 DETALLES DE DISEÑO DE LAS LOSAS DE APROXIMACIÓN A UN PUNTE.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Las barras de amarre son elementos corrugados de diámetro menor que se colocan a lo largo de las juntas longitudinales para mantener bien adosadas las losas adyacentes, de manera que la junta permanezca cerrada y asegurar así, una buena transferencia de carga a través de ella.

En este pavimento, se colocaron barras corrugadas de 1,27 cm (1/2") de diámetro, a lo largo de las juntas longitudinales de 76.0 cm de longitud y separadas 75.0 c.a.c.

#### RECUBRIMIENTO PARA LOS ELEMENTOS DE ACERO

Los recubrimientos anticorrosivos son necesarios para proteger al acero de los efectos nocivos del agua; sin embargo, los estudios de comportamiento han mostrado que sólo en regiones de baja temperatura, donde se utilizan productos químicos para derretir la nieve en carreteras, es necesario dar tratamiento al acero, ya que en pavimentos de concreto en el sur de los Estados Unidos, se tienen pasajuntas sin protección, que después de 36 años, está en buenas condiciones.

#### SELLADO DE LAS JUNTAS

El sellado de las juntas es fundamental en el comportamiento de un pavimento, ya que impide la infiltración de agua dentro de la estructura de la vía.

En este pavimento en que todas las juntas transversales se hicieron por corte, se fijó el uso de un sello preformado plástico y un material sellante a base de silicón, cuyo funcionamiento eficiente será de 8 a 10 años, según los estudios de comportamiento realizado hasta la fecha.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

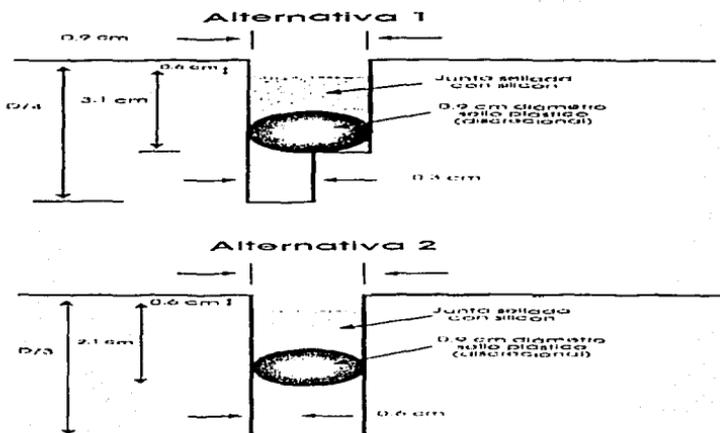


FIGURA V.12 CORTE Y SELLADO DE UNA JUNTA TRANSVERSAL.

#### ACOTAMIENTO INTEGRAL DE CONCRETO

Al iniciar el proyecto de esta vía, se tenían varias alternativas para los acotamientos, entre ellas hacerlos de pavimentos asfáltico, de suelo cemento, de concreto con espesor diferente al pavimento principal, etc. Se eligió hacerlos integrales con las losas de rodamiento por las siguientes razones:

La construcción del acotamiento al estar integrado con las losas de rodamiento, incrementa la capacidad de carga del pavimento ya que proporciona un soporte adicional y reduce esfuerzos y reflexiones en las losas principales, así el daño que produce el tránsito que se entrecruza, disminuye en gran medida.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

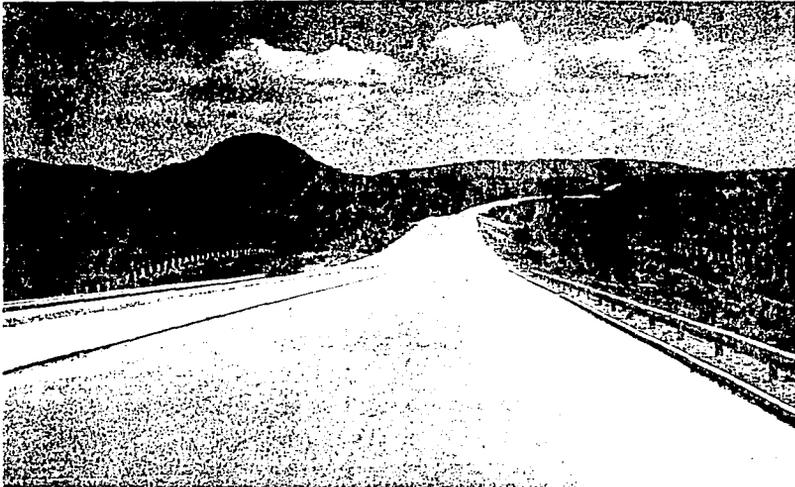


FIGURA V.13 ASPECTO DE LA CORONA DEL CAMINO. SE PUEDEN OBSERVAR LOS ACOTAMIENTOS DEL CONCRETO.

El bombeo bajo las losas de tránsito se reduce debido a la disminución de deflexiones de orilla y esquina, la ausencia de infiltración de agua y además, el escurrimiento de agua, y el escurrimiento del agua superficial descarga a mayor distancia del carril de tránsito.

Los acotamientos integrales pueden ser utilizados para estacionamiento, circulación esporádica o de emergencia de vehículos, esta fue la razón por la cual también se colocaron pasajuntas ya que el paso de algunas cargas pesadas puede agrietar los losas.

El uso de este tipo de acotamiento junto con la utilización de los pasajuntas, permitió utilizar el coeficiente de transferencia de carga  $J$  de 2.7 como se menciona anteriormente.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## DRENAJE

Con el fin de tener un drenaje adecuado para la autopista, se construyeron una serie de elementos que permiten asegurar un buen comportamiento del pavimento, como fueron: drenes longitudinales de zanja en las zonas de cortes.

## TRABAJOS COMPLEMENTARIOS

Se aplico un riego de impregnación sobre la sub-base, que se hizo por dos razones: una, disminuir la fricción entre la losa y la sub-base, disminuyendo de esta forma los esfuerzos de tensión en el concreto y la otra, evitar la migración de finos de la sub-base.

Se hizo un arroje con suelo cemento entre los extremos de la corona y los bordes del pavimento de concreto, para evitar la erosión lateral que pudiera afectar el apoyo de las losas.

## DISEÑO DE LA MEZCLA DE CONCRETO

El diseño de una mezcla de concreto debe cubrir dos aspectos fundamentales, uno, el calcular la resistencia suficiente para evitar fallas estructurales y el otro, prevenir el deterioro debido a la acción agresiva de las fuerzas del medio ambiente en el cual el pavimento estará en servicio.

En este caso, en donde no existe el problema climático de la congelación y el deshielo, los factores que hay que cuidar para lograr una mayor durabilidad son, la contracción, la reactividad de los materiales y la resistencia a la abrasión.

La permeabilidad es importante porque puede proporcionar un deterioro prematuro del concreto al permitir infiltración de agua y otras sustancias nocivas al interior de la losa. La permeabilidad es causada por la presencia de poros interconectados debido a compactaciones pobres o por agrietamientos. Las formas de reducirlas son: elaborar mezclas con buenas propiedades geológicas que permiten alcanzar una buena compactación en su colocación, además de contar con una mezcla de agregados bien graduada y un bajo contenido de agua. La contracción del concreto fresco afecta la durabilidad, ya que los agrietamientos resultantes abren conductos a través de los cuales puede penetrar el agua y materiales deletéreos. Las formas de reducir este fenómeno son: utilizar bajas cantidades de cemento, bajas relaciones agua-cemento y no usar agregados lageados.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

Las reacciones químicas de los agregados contenidos en el concreto afectan su comportamiento, ya que pueden causarle: expansión anormal, agrietamientos y pérdidas de resistencia. En este caso, en el que al agregado fino es arena cívica, para cuantificar el posible efecto alcali-silice se realizaron tres tipos de pruebas cuyos resultados se muestran en la siguiente y puede notarse que las arenas son potencialmente activas, y los resultados de los ensayos no son determinantes y sus valores en las pruebas de expansión, con el uso de cemento puzolánico que cumplan ampliamente con las especificaciones vigentes.

La resistencia a la abrasión es importante para las áreas que van a estar expuestas al desgaste, como es el caso de la superficie de rodamiento del pavimento, ya que el efecto del paso de las llantas de los vehículos es altamente abrasivo, especialmente cuando el pavimento está húmedo. La respuesta al efecto abrasivo se produce progresivamente. Inicialmente la resistencia se basa en la relación agua-cemento de la mezcla, el término superficial y el curado; al desgastarse la pasta superficial de la losa, los agregados finos y gruesos quedan expuestos y se convierten en la base de la defensa contra el desgaste adicional y en esta situación la velocidad y el desgaste dependerán de la buena granulometría de la mezcla, de la dureza de los agregados y de la resistencia del concreto.

En la figuras V. 14 y figura V. 15, se presentan los resultados de las pruebas de intemperismo acelerado y de desgaste para las áreas utilizadas y pueda observarse que en la primera se cumple con las normas vigentes y en la segunda sus valores comparados con mezclas de otras zonas del país ofrecen resultados adecuados.

Fecha de la muestra	Porcentaje de pérdida, en prueba de intemperismo acelerado (Sulfato de sodio, $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )
Abril 19	3.9
Mayo 23	6.2
Mayo 25	4.4
Mayo 26	5.1

El límite máximo en las pruebas de intemperismo acelerado en las especificaciones SCT, AAHSTO y ASTM es de 10 %

FIGURA. V.14 RESULTADOS DE LA PRUEBAS DE INTEMPERISMO ACCELERADO EN LAS ARENAS DE HUAXTLA, NAYARIT.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Origen	Falla	Control	Guadalupe
Tipo de muestra	Cilindro	Cilindro estándar	Cilindro estándar
Resistencia a la compresión, 28 días	372 kg/cm <sup>2</sup>	452 kg/cm <sup>2</sup>	371 kg/cm <sup>2</sup>
Tipo de cemento	Puzolánico Guadalajara		
Grava	Basalto triturado		
Arena	del río Huacila		
Edad de realización de la prueba	29 días	29 días	29 días
Desgasta total en superficie normal	9.5 gramos	15.0 gramos	18.0 gramos
Desgasta total en corte	4.5 gramos	7.0 gramos	3.0 gramos

FIGURA V.15 RESULTADO DE LAS PRUEBAS DE DESGASTE POR ABRASIÓN, SEGÚN EL MÉTODO. ASTM - C944-90.

De lo anterior se deduce que se debe diseñar una mezcla para el concreto que además de cumplir con los requisitos de resistencia, tenga una curva granulométrica de sus agregados bien graduada, una relación agua-cemento baja, el menor consumo posible de agua y cemento así como evitar los agregados ligeados y/o blandos.

Para el diseño de la mezcla se utilizaron tres bancos para el agregado grueso (grava) que se obtenía de triturar roca de origen basáltico y alrededor de seis bancos para el agregado fino (arena), cinco de ellos arenas pumíticas y el otro de arenas obtenidas por cribado de escorias basálticas.

Los tres bancos de grava cumplieron con las especificaciones de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (1986), mientras que los de arena tenían problemas para cumplir con el contenido máximo de finos y del equivalente de arena, además, como ya se comentó, presentaron una ligera reacción con los álcalis. Estas limitaciones se superaron al elegir los frentes de ataque de los bancos con menos contenido de finos, lavar parte de la arena y utilizar un cemento tipo Puzolánico, que cumple dos funciones debido a su bajo calor de hidratación, disminuir la potencialidad de la reacción alkali-agregado y la otra, reducir la velocidad de contracción del concreto durante su endurecimiento; además para proporcionarle a la mezcla propiedades geológicas más adecuadas se utilizaron dos aditivos, un inductor de aire y un reductor retardante de fraguado.

## ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

Se elaboraron en laboratorio cerca de 20 mezclas, de las cuales las que pasaron los requisitos de resistencia se presentan en la siguiente figura, eligiéndose para su aplicación en obra, las marcadas con los números 6 y 8, con un consumo de cemento entre 380 y 400 kg, relación agua-cemento entre 0.41 y 0.42 y resistencia a la flexión a los 28 días entre 49 y 53 kg/cm<sup>2</sup>. Se considera que con estas características el concreto cumplirá adecuadamente su vida útil de servicio.

Material	SSS kg/m <sup>3</sup>	Densidad (kg/cm <sup>3</sup> )				
		# 5 poi	# 6 poi	# 7 poi	# 8 poi	# 8 poi
Cemento	2900.00	400	400	390	380	375
Grava	2540.00	924	890	914	641	946
Arena	2500.00	671	725	570	700	700
Agua	1000.00	190	165	180	160	160
300R Reductor	1000.00	1.80	1.4	1.82	1.43	1.40
MBVR Inc. cas	1500.00	0.125	0.200	0.200	0.200	0.200
Reso Volumétrica		2146.7	2181.6	2155.6	2182.6	2182.6
Relación agua cemento		0.48	0.41	0.46	0.42	0.43

		Resistencia a la compresión				
A los 7 días	kg/cm <sup>2</sup>	270	278	284	296	242
A los 28 días	kg/cm <sup>2</sup>	351	355	391	390	335

		Resistencia a la flexión				
A los 7 días	kg/cm <sup>2</sup>	36	40	38	39	37
A los 28 días	kg/cm <sup>2</sup>	43	53	47	49	46

FIGURA V.16 DISEÑO DE LA MEZCLA.

Siendo el curado de las losas un factor fundamental para que el concreto alcance la resistencia de proyecto, se recomendó aplicar un componente cuya base sea agua o parafina de pigmentación blanca, a razón de un litro por m<sup>2</sup> para obtener un espesor uniforme de 1mm. Que deje una membrana impermeable y consistente de color blanco.

### CONTROL DE CALIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN DEL PAVIMENTO

Para el aseguramiento de la calidad de la obra, se dividió el control de la construcción en dos afectos bien definidos:

Los aspectos de control e inspección que fueron llevados acabo por un laboratorio institucional Instituto Mexicano del Cemento y Concreto (IMCYC) contratado por la empresa constructora del pavimento, con el fin que les facilitara en llevar a buen término los trabajos que se les encomendaron.

Los aspectos de control, inspección y verificación los realizo una empresa especializada particular, contratada por la empresa concesionaria, de esta manera el control de calidad funcionó con independencia intelectual respecto al constructor.

## ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

Adicionalmente un laboratorio de la Dirección General de Carreteras Federales de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), realizó muestreos esporádicos para fines verificación. Se tuvieron dos laboratorios tiempo completo, duplicando el muestreo especificado y un tercer laboratorio realizando verificaciones.

Lo descrito destaca lo exhaustivo de los trabajos de control en la construcción de este pavimento, el cual requirió en números redondos 130 000 m<sup>3</sup> de concreto de alta calidad, con tendido máximo diario del orden de 2200 m<sup>3</sup> y promedio aproximado de 1300 m<sup>3</sup> diarios.

Para dar una idea de los resultados de control de calidad en la siguiente figura, se presenta la gráfica de comportamiento de la resistencia del concreto hidráulico y de su examen puede notarse que a pesar de cierta heterogeneidad en sus resultados, en todos los casos fue superada la resistencia de proyecto (45 kg/cm<sup>2</sup> )

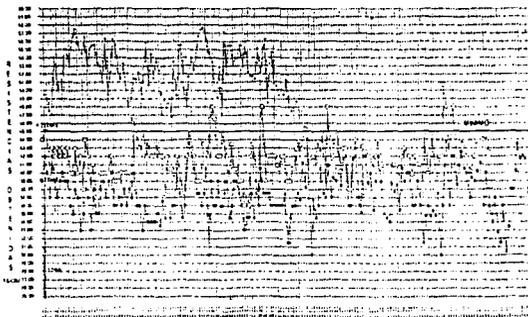


FIGURA V.17 GRAFICA DE COMPORTAMIENTO DE RESISTENCIAS DEL CONCRETO HIDRÁULICO.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Capítulo  
VI

**CONCLUSIONES Y COMENTARIOS**

CONCLUSIONES

A través del transcurso del tiempo se ha comprobado que las carreteras son parte fundamental del desarrollo de un país, ya que es una de las principales vías de comunicación pues por ellas circulan cada año el 80% del total de toneladas de carga y el 90% de los pasajeros, por lo que no solo deben de conservarse sino también mejorar y aumentar en la medida de los requerimientos.

En la actualidad se cuenta con dos opciones de construir carreteras en el país, la construida con concreto asfáltico y la de concreto hidráulico; entre las cuales existen diferencias tanto de costo, construcción. Así como, de funcionalidad y comportamiento al transcurso del tiempo, debido a las diferentes cargas que se le presentan en su estructura como en la superficie de rodamiento que ocasionan diferentes fallas. Dependiendo del tipo de superficie de rodamiento se han clasificado arbitrariamente los pavimentos en rígidos y flexibles. En los pavimentos rígidos si se construye bajo los lineamientos especificados, aunque su costo es superior al del pavimento asfáltico, su vida útil es mayor, con un mínimo de mantenimiento.

Con los pavimentos flexibles se pueden construir mas metros, que con los de pavimentos hidráulicos, pero su vida útil es mas corta, ya que entre otros, los efectos atmosféricos destruyen el camino.

Desde el momento en que una carretera se abre a la circulación se ve sometida a una serie de factores que modifican y deterioran sus características iniciales. Este deterioro comienza al ser aplicadas las cargas de tráfico, que si bien se ha diseñado para soportarlas, constituyen el primer paso del desgaste de un camino, que si no se hizo una adecuada construcción se da origen a las deflexiones y baches. Varios de los efectos aparecen juntos, conduciendo a una situación de deterioro progresivo que puede llegar a destruir totalmente el pavimento si no se recurre a un programa de conservación adecuado a fin de prolongar su vida útil en condiciones aceptables para el tráfico, ahorrando en tiempo, economía y energía.

## ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

Los responsables en el área de construcción de carreteras al momento de definir el tipo de pavimento a emplear deben de considerar las ventajas de uno u otro: el tipo de suelo y el clima regional ya que en función de estas condiciones redituara en un mejor comportamiento la superficie de rodamiento y en su comportamiento en general, considerando las diferentes repeticiones de cargas que se le presenten, ya que varios de los fallos enunciados aparecen juntos.

La parte que más sufre deterioros en una carretera es la superficie de rodamiento por ser la parte que se encuentra mayormente expuesto a los factores antes mencionados.

En el desarrollo de este trabajo, se presentaron las ventajas y desventajas de los dos tipos de concretos.

Se desprende de este estudio que, el reducir costo de mantenimiento, el uso del concreto hidráulico ofrece mayores alternativas, así como, ahorro de energía y reduce los costos de operación, a diferencia del concreto asfáltico.

Sin embargo, se tienen algunos factores a considerar en la colocación de cualquiera de estos dos tipos de pavimentos lo que colocan obstáculos en su aplicación práctica.

En la actualidad se ha visto la necesidad de cambiar los parámetros de selección y se consideran factores a futuro mas reales, por lo cual surge el estudio de las experiencias que se tienen en el empleo de uno u otro concreto para este fin.

En general todas las vialidades elaboradas con concreto hidráulico han presentado un comportamiento adecuado a lo largo de los años a pesar de contar con un mantenimiento casi nulo, lo que da la pauta para tomar en consideración en el desarrollo de un programa de construcción de carreteras basándose en pavimentos rígidos.

Una red de transporte y comunicación terrestre que sea moderna y eficiente es fundamental para atender las necesidades de movilidad interna y comercio exterior de un país.

### COMENTARIOS

Las carreteras son parte fundamental para el desarrollo del país, ya que es una de las principales vías de comunicación. Por lo que, se debe tener conocimiento de las dos formas de construir carreteras en México y de la tecnología existente para la construcción de estas; pues por ellas se mueve casi el total de toneladas de carga y de pasajeros. Por ello, no solo deben de conservarse sino también mejorarse y aumentarse en la medida de los requerimientos.

Los pavimentos de concreto hidráulico es sin duda, una opción para la construcción de carreteras; debido a su bajo costo de mantenimiento. Mientras que los pavimentos de concretos asfáltico siguen siendo opción de construcción de carretera; debido a su bajo costo de construcción.

Cualquiera de estas dos alternativas, debe de ser analizada lo más detalladamente, para poder decidir por cualquiera de ellas en la construcción de una nueva carretera.

Ya sea de concreto hidráulico o de concreto asfáltico, estas carreteras deberán de proporcionar al usuario la comodidad, seguridad y funcionalidad que él demanda; y con ello poder proporcionar al país de una infraestructura carretera que sea lo más viable para el incremento de inversiones hacia las partes más lejanas de nuestro país.

**ANEXO AL CAPITULO I**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

REQUISITOS	TIPOS				
	I	II	III	IV	V
Finura, superficie específica, $\text{cm}^2/\text{g}$ (método optativos)					
(a)					
Prueba con el turbidímetro de Wagner:					
Valor promedio, mínimo	1600	1600		1600	1600
Valor mínimo de cualquier muestra	1500	1500		1500	1500
Prueba de permeabilidad de aire con el aparato Baline:					
Valor promedio, mínimo	2800	2800		2600	2600
Valor mínimo de cualquier muestra	2600	2600		2600	2600
Sanidad:					
Expansión en autoclave, máxima, por ciento	0.80	0.80	0.8	0.80	0.80
Tiempo de fraguado (métodos optativos) (b)					
Prueba de Gillmore:					
Fraguado inicial en minutos, no menos de	60	60	60	60	60
Fraguado final en horas no más de	10	10	10	10	10
Prueba de Vicat:					
Fraguado en minutos, no menos	45	45	45	45	45
Contenido de aire del mortero, por ciento en volumen, no mayor de	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0
Resistencia a la compresión, en $\text{kg}/\text{cm}^2$ (c):					
La resistencia a la compresión en cubos de mortero compuesto de una (1) parte de cemento y dos punto setenta y cinco (2.75) partes de arena graduada, en peso, será igual o mayor que los valores especificados para las edades indicadas a continuación:					
Un (1) día en aire húmedo			120		
Un (1) día en aire húmedo y dos (2) días en agua:	85	70	210		
Un (1) día en aire húmedo y seis (6) días en agua:	19	18	(c)	12	18
Un (1) día en aire húmedo y veintisiete (27) días en agua	25	23	(c)	21	23
Calor de hidratación en calorías por gramo, a las edades indicadas a continuación: (d)					
Siete (7) días, máximo		70			
Veintiocho (28) días, máximo		80			
Falso fraguado, penetración final, mínimo porcentaje					
(e)	50	50	50	50	50

TABLA I. 1. TABLA DE LOS REQUISITOS FÍSICOS QUE DEBEN CUMPLIR LOS CEMENTOS TIPO PORTLAND.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.**

REQUISITOS	TIPOS				FP-7
	I	II	III	IV	V
Bióxido de silicio ( $SiO_2$ ), mínimo, porcentaje		21.0			
Óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ), máximo, Porcentaje		6.0			
Óxido férrico ( $Fe_2O_3$ ), máximo, Porcentaje		6.0		6.5	
Óxido de magnesio ( $MgO$ ), máximo, Porcentaje	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Trióxido de azufre ( $SO_3$ ):					
Cuando $3CaO \cdot Al_2O_3$ es 8% o menor, máximo, Porcentaje	2.5	2.5	3.0	2.3	2.3
Cuando $3CaO \cdot Al_2O_3$ es mayor de 8%, máximo, Porcentaje	3.0		4.0		
Pérdida de calcinación, máximo, porcentaje	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Silicato tricálcico ( $3CaO \cdot SiO_2$ ) (a), mínimo, Porcentaje				35	
Silicato dicálcico ( $2CaO \cdot AlO_3$ ) (a), máximo, Porcentaje				40	
Aluminato tricálcico ( $3CaO \cdot Al_2O_3$ ) (a), máximo, Porcentaje			8	(b) 7	5
Suma de silicato tricálcico y aluminato tricálcico, máximo, porcentaje		(c) 58			
Ferro aluminato tetracálcico más dos veces el aluminato tricálcico (a)					
( $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 + 2(3CaO \cdot Al_2O_3)$ o solución sólida ( $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 + 2CaO \cdot Fe_2O_3$ ) máximo porcentaje					20

TABLA I. 2. TABLA QUE MUESTRA LOS REQUISITOS QUÍMICOS PARA LOS CEMENTOS PORTLAND

A. Agua de composición:	
Sulfatos (convertidos en $Na_2SO_4$ ), como máximo	1000 p.p.m.
Cloruros (convertidos en $NaCl$ ), como máximo	1000 p.p.m.
Materia orgánica (óxido sumergido en medio ácido), como máximo	50 p.p.m.
Tur-biedad máxima	1500 p.p.m.
B. Agua para curar y lavar agregados:	
Sulfatos (convertidos en $Na_2SO_4$ ), como máximo	1500 p.p.m.
Cloruros (convertidos en $NaCl$ ), como máximo	2000 p.p.m.

TABLA I. 3. TABLA QUE MUESTRA LOS REQUISITOS QUE DEBE CUMPLIR EL AGUA, PARA UTILIZARSE EN CONCRETO HIDRÁULICO.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIÓN ASTM Y CSA.	REQUISITOS, DE ACUERDO A LA ESPECIFICACIÓN
Resistencia al desgaste	Indicador de la calidad del agregado. Para los pisos de bodegas, plataformas de carga, pavimentos	C131	Máximo porcentaje de pérdida
Resistencia a la congelación y la fusión	Estructuras sujetas al intemperismo	C290, C291	Número máximo de ciclos
Estabilidad química	Resistencia y durabilidad de todos los tipos de estructuras	C227 (barra de mortero) C289 (química) C586 (prisma de agregado) C295 (petrográfica)	Máxima dilatación de la barra de mortero Los agregados no deberán reaccionar con los álcalis del cemento
Forma de la partícula y textura superficial	Manejabilidad del concreto fresco		Porcentaje máximo de piezas planas y alargadas
Granulometría	Manejabilidad del concreto fresco. Economía.	C136 A23.2.2	Porcentaje máximo y mínimo que pasa por las criba estándar
Peso volumétrico unitario	Cálculos para el proyecto de mezclas. Clasificación	C29 A23.2.10	Peso unitario mínimo o máximo (concretos especiales)
Peso específico	Cálculos para el proyecto de mezclas	C127 (agregado grueso) C128 (agregado fino) A23.2.6 (agregado fino)	
Absorción y humedad superficial	Control de la calidad del concreto	C70, C127, C128 A23.2.6, A23.2.11	

TABLA I. 4. CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**ANEXO AL CAPITULO II**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

Existen varios tipos de cementos asfálticos, el ofrecido en la República Mexicana es el cemento asfáltico no.6, las normas de la Secretaría de Comunicaciones Y Transportes (SCT) a las que están sujetas se muestran en la tabla II. 1.

Características	Cemento Asfáltico No. 3	Cemento Asfáltico No. 6	Cemento Asfáltico No. 7	Cemento Asfáltico No. 8
Penetración, 100 g 5s, 25 °C, grados	180-200	80-100	60-70	40-50
Viscosidad Saybolt-Furol: a 135 °C mínimo	60	85	100	120
Punto de inflamación (copa abierta de Cleveland), °C mínimo	200	232	232	232
Punto de reblandecimiento, °C	37-43	45-52	48-56	52-60
Ductilidad, 25 °C, cm, mínimo	60	100	100	100
Solubilidad en tetracloruro de carbono, %, mínimo	99.5	99.5	99.5	99.5
Prueba de película delgada, 50 cm <sup>3</sup> , 5h, 163 °C, penetración retenida, %, mínimo	40	50	54	58
Pérdida por calentamiento, %, máximo	1.4	1.0	0.8	0.8

TABLA II. 1. NORMAS DE CALIDAD PARA CEMENTOS ASFÁLTICOS.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**Concreto asfáltico ahulado.**

El asfalto ahulado, es un material que propicia carreteras duraderas, debido a varias propiedades que adquiere en su fusión con el hule.

- Elasticidad. Es la resistencia que tiene al agrietamiento.
- Flexibilidad. Permite su adecuación al movimiento de la superficie.
- Impermeabilidad. Esta propiedad da estabilidad a la estructura, al no permitir filtración de humedad en los sentidos descendentes y ascendentes.
- Cohesión y adhesividad. Reduce el desmoronamiento que ocurre en el borde de las grietas.
- Antioxidante y antiozonante. Lo que retrasa su endurecimiento y desgaste.

El asfalto modificado con el hule de las llantas está definido como "una mezcla de cemento asfáltico, hule reciclado y ciertos aditivos en los que el hule representa por lo menos el 15% del peso total de la mezcla, el cual ha reaccionado lo suficiente con el cemento asfáltico para provocar la fusión e integración de las partículas de los componentes". (Norma: ASTM-D-8-99)

*a) Concreto asfáltico de granulometría abierta.*

Es un concreto que utiliza el asfalto ahulado con un residuo mayor al convencional de 9 a 10%. Cuenta con un acabado superficial que proporciona bajos niveles de ruido, porosidad para evitar la acumulación de agua y proteger el hidropneumático, además que es antireflejante y ayuda a un frenado más efectivo, en tanto, el tránsito de vehículos se realiza con un mejor "muelleo" lo que, por tanto, disminuye el desgaste de los vehículos.

Es recomendable en zonas con altos índices de accidentes causados por la humedad del ambiente. Debido al efecto de que el hule, se contrae con el calor y se expande con el frío, al asfalto ahulado tiene una flexibilidad a bajas temperaturas y mayor rigidez en niveles altos. Estas cualidades permiten tener carpetas más resistentes a los agrietamientos reflectivo y térmico, así como las deformaciones permanentes.

Este tipo de mezcla se ha aplicado en algunos tramos de carreteras como la México-Querétaro, Puebla-Orizaba y también en la de México-Puebla. Teniendo resultados satisfactorios.

*b) Concreto asfáltico de granulación media.*

En el diseño del concreto asfáltico de granulación media es posible encontrar la equivalencia entre los espesores de una carpeta de asfalto convencional y una de asfalto ahulado.

Lo anterior, muestra que es posible reducir hasta un 50% los espesores de carpetas ahuladas con respecto a las del asfalto convencional.

Para la colocación de este concreto asfáltico ahulado es bastante simple y no difiere significativamente de un tendido concreto asfáltico normal, pero sí requiere de algunas consideraciones especiales. Se deben de tomar las siguientes tres precauciones:

1. Utilizar una extendedora con una placa enrasadora en perfectas condiciones de acabado superficial y que tiene que estar antes de iniciar el tendido del concreto asfáltico ahulado, debidamente calentada para no provocar arrastres del material, que ocasiona un terminado defectuoso en el trabajo.
2. Iniciar el proceso de acomodo o compactación de la capa en forma inmediata al tendido, teniendo mucho cuidado que los compactadores que deberán ser de tandem lisos de doble rodillo sin vibrar, tenga un sistema ideal de aspersores y regado de sus tambores. Si este equipo no se encuentra en perfectas condiciones también provocará arrastres de material o desprendimientos del mismo.
3. Esta es la más importante y se refiere a la temperatura de tendido. Si en un concreto asfáltico normal, la temperatura ideal de tendido es de alrededor de 120°C, con el concreto asfáltico ahulado, deberá ser de 160°C. No se permite hacerlo a temperatura más baja por que seguramente habrá desprendimientos y arrastres que se deberán subsanar a costos muy elevados.

Algo que hace diferente al concreto asfáltico ahulado del concreto asfáltico simple, es que en el primero, el acabado superficial no puede arreglarse como en el concreto asfáltico simple, es decir, basándose en material y rastrilleros. Una vez tendido, si no es perfecto, no sirve.

Por ultimo, el concreto asfáltico ahulado producido y no tendido en el mismo día, se convertirá en pérdida de dinero.

**ANEXO AL CAPITULO III**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**MÉTODO DE DISEÑO DE LA AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (ASSTHO)**

El método de diseño de ASSTHO es uno de los métodos más utilizados a nivel internacional para el diseño de pavimentos de concreto hidráulico.

a) Antecedentes. Prueba ASSTHO

La prueba de pavimento que en su momento se conoció como ASSTHO, por sus siglas en inglés y debido a que en aquel entonces no estaba integrado el departamento del transporte de los Estados Unidos de América (EUA) a esta organización, fue concebida y promovida gracias a la organización que ahora conocemos como ASSTHO para estudiar el comportamiento de estructuras de pavimento de espesores conocidos, bajo cargas móviles de magnitudes y frecuencias conocidas y bajo el efecto del medio ambiente. Fue formulada por el consejo de investigación de carreteras de la Academia Nacional de Ciencias - Consejo Nacional para la Investigación, la planeación empezó en 1951 y la construcción del proyecto comenzó en 1956 cerca de Ottawa, en el estado de Illinois. El tráfico controlado de la prueba se aplicó de octubre de 1958 a noviembre de 1960, esto es, durante más de dos años.

El objetivo principal de las pruebas consistía en determinar relaciones significativas entre el comportamiento de varias secciones de pavimento y las cargas aplicadas sobre ellas, o bien para determinar las relaciones significativas entre un número de repeticiones de ejes con cargas, de diferente magnitud y disposición, y el comportamiento de diferentes espesores de pavimentos, conformados con base y sub-base, colocados en suelos de características conocidas.

El sitio, seleccionado para la prueba, cerca de Ottawa, tiene condiciones climáticas y de suelo típicos de algunas áreas de Estados Unidos y Canadá. Esto hace que la aplicabilidad del método deba utilizarse con criterio para otras partes del mundo.

Los pavimentos se construyeron en circuitos a lo largo de una sección de 13 Km de una futura autopista interestatal.

Se realizaron 6 circuitos de prueba, todos eran de tramos de dos carriles y tenían la mitad del tramo en pavimento de concreto y la otra en pavimento flexible. El circuito 1 se dejó sin cargas para evaluar el impacto del Medio Ambiente en los pavimentos. El circuito 2 se utilizó con aplicaciones de carga de camiones ligeros. En los circuitos del 3 al 6 se realizaron aplicaciones de carga con camiones pesados. Los circuitos 5 y 6 tuvieron idénticas configuraciones y combinaciones de carga.

Cada circuito consistía de dos largas carreteras paralelas conectadas en los extremos por retornos, las secciones de prueba de los pavimentos estaban localizadas en las rectas o tangentes de cada circuito.

TEMAS CON  
FALLA DE ORIGEN

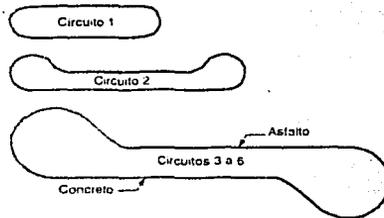


FIGURA III.01 GEOMETRÍA DE LOS CIRCUITOS.

La sección estructural de prueba tenía una longitud de 30 m en pavimentos flexibles, 36 m en pavimento de concreto simple y 80 m en pavimento continuamente reforzados. Las secciones de prueba tanto flexible como de pavimento rígido, fueron construidas sobre idénticos terraplenes. También se examinaron bajo las mismas condiciones climáticas, con el mismo número de cargas aplicadas, el mismo tráfico e iguales velocidades de operación.

En total se examinaron 368 secciones de pavimento rígido y 468 secciones de pavimento flexible.

El tráfico que se utilizó en la prueba, estaba perfectamente controlado, se iniciaron las repeticiones de carga en noviembre de 1958, de la siguiente manera:

En los circuitos de camiones pesados, circuitos 3-6:

- > Inicialmente 6 vehículos por carril
- > Posteriormente se aumentó a 10 vehículos por carril (enero 1960)

El tiempo de operación de los vehículos fue de:

- > 18 horas con 40 minutos
- > 6 días de la semana

En total se aplicaron:

- > 1,114,000 Repeticiones de Carga Normal

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

b) Conclusiones obtenidas de la prueba.

Los principales experimentos sobre pavimentos fueron diseñados de modo que los resultados de las pruebas fueran estadísticamente significativos. Las secciones de prueba de varios espesores fueron sometidas a tráfico controlado. Las secciones examinadas representaban todas las combinaciones de los factores de diseño para concreto y asfalto. Cada circuito de tráfico contenía algunas secciones que no formaban parte de los principales experimentos y que se incluyeron para estudios especiales, tales como los efectos de acotamiento pavimentados y bases estabilizadas en el comportamiento del pavimento.

Dos de las técnicas aleatorias y de réplica estadísticas que se emplearon al diseñar los experimentos principales fueron la aplicación aleatoria, que garantizó que un diseño dado tuviera la misma oportunidad de estar localizado en un lugar de un tramo recto de prueba de cualquier sección de los diseños. Las posiciones de los cuatro circuitos de prueba más importantes se localizaron al azar y la réplica garantizó que varios de los diseños aparecieran en dos secciones para verificar la Confiabilidad.

Las mediciones del comportamiento de un pavimento en términos de su capacidad para soportar el tráfico con seguridad y comodidad son la esencia del concepto de capacidad de servicio. Su desarrollo, para convertirlo en un procedimiento trabajable por parte del personal de la Prueba de Carreteras, constituyó una aportación importante a la ingeniería de carreteras. El nivel de servicio de un pavimento depende de la función que requiera dársele.

Los factores que tuvieron mayor peso en la determinación de la capacidad de servicio fueron:

- Variaciones en el perfil longitudinal
- Mediciones de la aspereza del pavimento en la dirección del movimiento
- Profundidad promedio de las roderas medidas con regla de 1.20 m
- Medidas de agrietamiento severos.
- Medidas de baches

Las mediciones físicas de las secciones de prueba se transfirieron a fórmulas que podían dar valor numérico de capacidad de servicio. Estos valores graficados, contra las aplicaciones de carga, forman una historia de comportamiento para cada sección de prueba que permiten la evaluación de cada uno de los diversos diseños.

Tres comparaciones que puede usarse para evaluarse el comportamiento de las secciones de prueba son:

- El número de aplicaciones de carga sobre un eje.
- El índice de capacidad de servicio en un momento determinado
- La tendencia hacia la capacidad de servicio contra la capacidad de servicio

Los resultados que se obtuvieron en los circuitos se muestran a continuación:



		SUB-BASE 0"		3"		6"	
		SIMPLE	REFORZADO	SIMPLE	REFORZADO	SIMPLE	REFORZADO
ESPESOR DE CONCRETO	Carril 1 →	4.3	4.2	4.4	4.2	4.4	4.4
	Carril 2 ←	4.2	4.4	4.0	4.1	4.2	4.5
	2.5"	3.7	4.1	4.0	4.1	4.0	4.6
	3.5"	4.1	4.3	4.3	4.5	4.1	4.3
5"	4.1	4.5	4.1	4.6	4.0	4.3	

		BASE 0"		3"		6"	
		SUB-BASE 0"	4"	SUB-BASE 0"	3"	SUB-BASE 0"	4"
ESPESOR DE ASFALTO	Carril 1 →	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
	Carril 2 ←	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
	1"	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
	2"	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
3"	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	

FIGURA III.02. CIRCUITO 2 - TRÁFICO LIGERO.

Se muestran las diferentes secciones probadas tanto de concreto como de asfalto con las diferentes combinaciones de sub-base, base y carpeta.

La nomenclatura utilizada es la siguiente:

- Secciones que permanecieron en buenas condiciones. El número interior corresponde al índice de servicio al final de la prueba.
- Secciones que permanecieron en regulares condiciones. El número interior corresponde al índice de servicio al final de la prueba.
- Secciones que llegaron a la falla. El número interior corresponde al índice de servicio al final de la prueba.

Las secciones de la parte superior corresponden al concreto y las de la parte inferior corresponden al asfalto.

A continuación se muestran los resultados de los otros circuitos:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

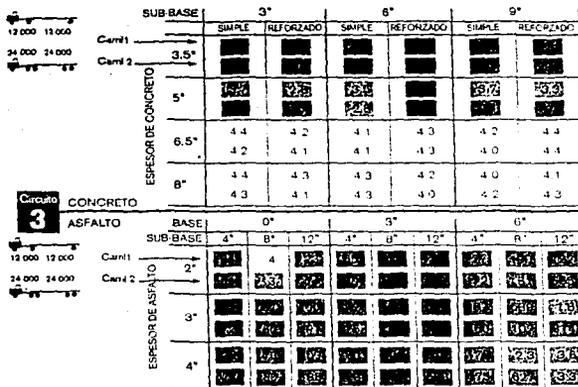


FIGURA III.3. CIRCUITO 3 - CARGAS PESADAS

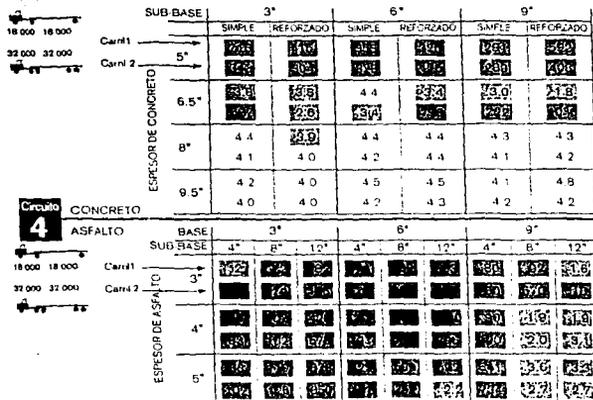


FIGURA III.4. CIRCUITO 4 - CARGAS PESADAS.

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

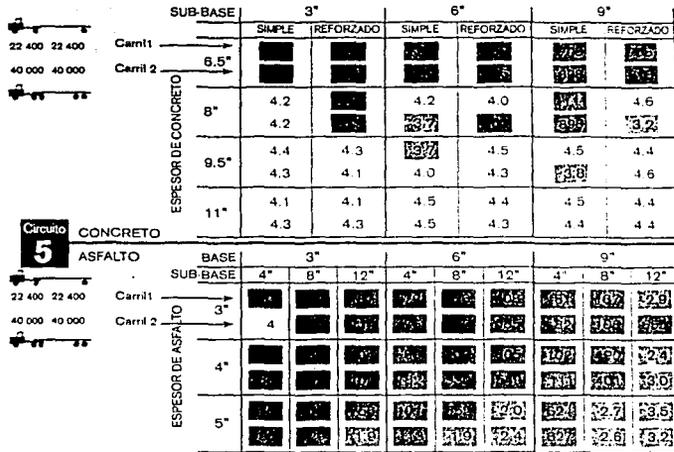


FIGURA III.5. CIRCUITO 5 - CARGAS PESADAS.

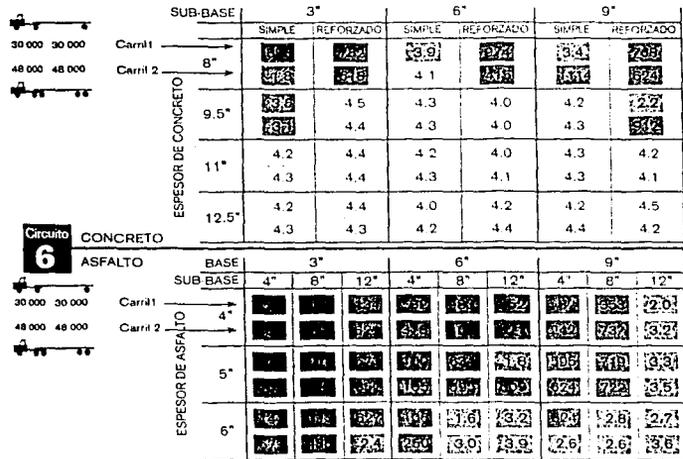


FIGURA III.6. CIRCUITO 6 - CARGAS PESADAS

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

Se puede observar, en general, que el comportamiento que mostraron los pavimentos de concreto fue sustancialmente mejor que el de los flexibles. El índice de servicio general y el comportamiento que tuvieron los principales tramos de prueba fue como se muestra a continuación:

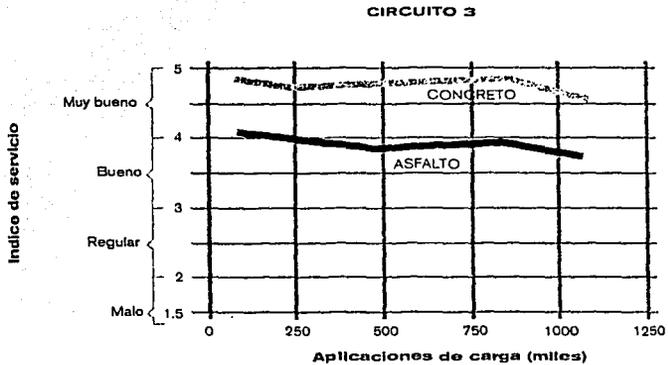


FIGURA III.7. COMPORTAMIENTO GENERAL DEL CIRCUITO 3.

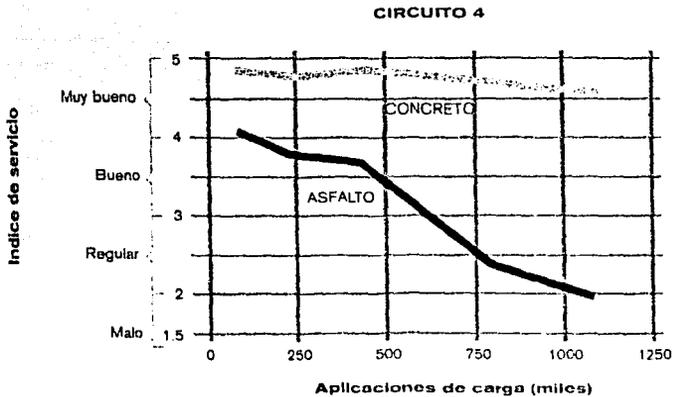


FIGURA III. 8. COMPORTAMIENTO GENERAL DEL CIRCUITO 4.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

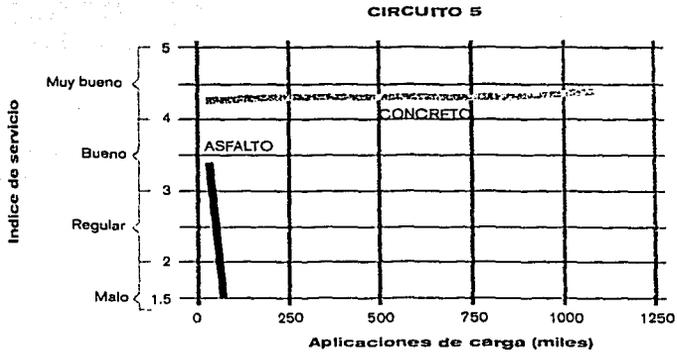


FIGURA III.9. COMPORTAMIENTO GENERAL DEL CIRCUITO 5

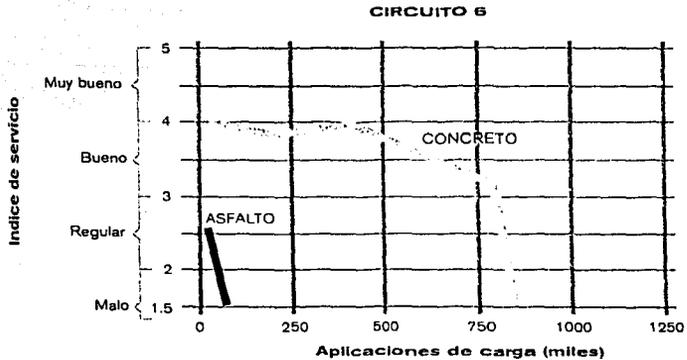


FIGURA III.10. COMPORTAMIENTO GENERAL DEL CIRCUITO 6.

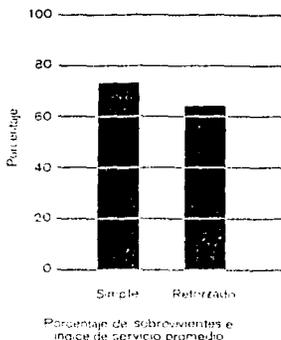
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

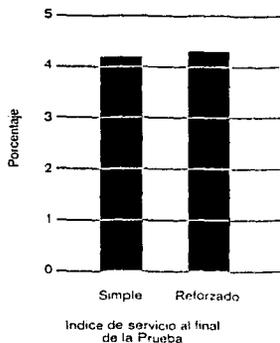
Otras de las conclusiones que se obtuvieron durante la prueba de pavimento se refieren a los pavimentos con acero de refuerzo.

El acero de refuerzo en los pavimentos de concreto, prácticamente no incrementa su capacidad cortante, debido a que el pavimento se apoya en toda la superficie de la sub-base y no existen las deformaciones que haría trabajar el acero de refuerzo para dar una contribución significativa.

Pavimentos de Espesor Intermedio



Pavimentos de Espesor Mayor



Por lo anterior no es recomendable la utilización de acero de refuerzo en los pavimentos de concreto hidráulico.

### c) Evolución de la Guía AASTHO

Aproximadamente después de un año de terminar la prueba AASTHO, para 1961, salió publicada la primer "Guía AASTHO para Diseño de Pavimentos Rígidos y Flexibles". Posteriormente, para 1972, se realizó una revisión y se publicó como la "Guía AASTHO para Diseño de Estructuras de Pavimento - 1972". En 1981 se hizo una Revisión al Capítulo III, correspondiente al Diseño de Pavimentos de Concreto con Cemento Portland; en 1986 se publicó una revisión de la "Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimento". En 1993 se realizó una Revisión del Diseño de sobre carpetas de pavimento; en 1998 se publicó un método alternativo para diseños de pavimentos, que corresponde a un "Suplemento a la guía de estructuras de pavimento".

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

d) Formulación

La fórmula general a la que llegó la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) para el diseño de pavimentos rígidos, basada en los resultados obtenidos de la prueba AASHTO, es la siguiente:

$$\log_{10}(E_{18}) = \left\{ \begin{array}{l} \text{Desviación Estándar Normal} \\ \text{Error Estándar Combinado} \\ \text{Espesor} \\ \text{Diferencia de Serviciabilidad} \\ \text{Serviciabilidad Final} \\ \text{Módulo de Ruptura} \\ \text{Coeficiente de Drenaje} \\ \text{Coeficiente de Transferencia de Carga} \\ \text{Módulo de Elasticidad} \\ \text{Módulo de Reacción} \end{array} \right. \left[ \begin{array}{l} Z_r \times S_o + 7.35 \times \log_{10}(D+1) - 0.06 + \frac{\log_{10} \left[ \frac{\Delta \text{ PSI}}{4.5-1.5} \right]}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D+1)^{8.46}}} \\ + (4.22 - 0.32 \times \text{pt}) \times \log_{10} \left[ \frac{S'_c \times C_d \times (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 \times J \left[ D^{0.75} - \frac{18.42}{(E_c/k)^{0.25}} \right]} \right] \end{array} \right]$$

Las variables que intervienen en el diseño de los pavimentos constituyen en realidad la base del diseño del pavimento. Se deben conocer las consideraciones más importantes que tienen que ver con cada una de ellas para así poder realizar diseños confiables y óptimos.

El procedimiento de diseño normal es suponer un espesor de pavimento y realizar tanteos. Con el espesor supuesto calcular los Ejes Equivalentes y evaluar todos los factores adicionales de diseño. Si se cumple el equilibrio de la ecuación, el espesor supuesto es el resultado del problema; en caso de no haber equilibrio en la ecuación se deberán seguir haciendo tanteos tomando como valor semilla el resultado del tanteo anterior. La convergencia del método es sencilla.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

## SELLADORES

La función del sellador de juntas es la de minimizar la infiltración superficial del agua hacia la estructura del pavimento, así como evitar que partículas incompresibles penetren en la junta. Este tipo de partículas induce presiones aplicadas puntuales, que pueden dar lugar a despostramientos y a "ampollamientos" en casos extremos.

El diseñador deberá primero, seleccionar un material de sellado que satisfaga los criterios de comportamiento y de costo, para luego dimensionar la caja de ranura que le permita al sellador funcionar correctamente. El movimiento de la junta y las condiciones ambientales son factores que influyen en las dimensiones de la caja. Con un diseño adecuado de la caja se logra asegurar un buen comportamiento del sellador de juntas.

El movimiento esperado de la junta deber ser el factor determinante para la selección del material de sello. Es de esperarse que se tenga poco movimiento en las juntas transversales de contracción con separaciones cortas entre sí (menores a 6 m), en las juntas longitudinales o en las juntas de acotamiento. Las juntas de liga prácticamente no tienen movimiento.

### 1. Materiales.

Los selladores se clasifican generalmente en líquidos o preformados. Los selladores líquidos pueden aplicarse en caliente o en frío, ser de uno o dos componentes, y ser autoenrasables o labrables. Los selladores preformados (selladores de compresión) dependen de la recuperación de la compresión a largo plazo para conseguir un asiento adecuado.

Las propiedades del sellador necesarias para lograr un buen comportamiento a largo plazo, dependen de la aplicación específica y de las condiciones climáticas de la obra. Entre las propiedades que se deben de tomar en cuenta están las siguientes:

- Elasticidad. La capacidad de un sellador para recuperar sus dimensiones originales después de estirarse o comprimirse.
- Bajo módulo. Cambio en los esfuerzos internos de un sellador mientras se le estira o comprime dentro de una gama de temperaturas. Es deseable un módulo bajo y es de especial importancia en climas fríos.
- Adhesión. Capacidad de un sellador para adherirse al concreto. La adhesión inicial y la adherencia a largo plazo son igualmente importantes.
- Cohesión. Capacidad de un sellador para resistir el desgarre inducido por esfuerzos de tensión.
- Compatibilidad. Reacción relativa del sellador respecto a los materiales con los cuales entra en contacto.
- Alterabilidad. Capacidad de un sellador para resistir el deterioro al ser expuesto a los elementos atmosféricos (los rayos ultravioletas del sol y el ozono)

2. Cordones de resguardo.

Los cordones de resguardo constituyen un componente importante para instalar los selladores líquidos. Los cordones de resguardo evitan que el sellador se escape por el fondo de junta y evitan la adherencia del sellador con el fondo de la caja de la junta. Este cordón también ayuda a definir el factor de forma y optimiza la cantidad de sellador aplicada.

3. Cajas para el sellador de juntas.

El factor de forma es crítico para el buen funcionamiento a largo plazo de una aplicación de sellado. Ya que la sección transversal cambia durante la dilatación y la contracción del pavimento de concreto, se desarrollan esfuerzos dentro del sellador y a lo largo de la superficie de contacto sellador / caja.

Estos esfuerzos pueden ser excesivos si el factor de forma no es el adecuado para el material de sello. En la figura CAPII.11 se muestran los factores de forma típicos para selladores líquidos y de compresión. Un caja para sellador de juntas con un factor de forma de uno o menos, desarrolla menores esfuerzos en el sellador de junta, que un factor de forma mayor que la unidad.



$$\text{FACTOR DE FORMA} = \frac{\text{ANCHO}}{\text{ESPESOR}}$$

Tipo de sellador	Factor de forma típico
Aplicado en caliente	1.0
Silicón	0.5
Tipo compresión	*

\* NO SE RIGE POR EL FACTOR DE FORMA

FIGURA III.11. FACTORES DE FORMA TÍPICOS PARA SELLADORES DE JUNTAS.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ANEXO AL CAPITULO IV

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

Enseguida se menciona un ejemplo que nos permite visualizar cual es la situación que guarda el costo de los pavimentos rígidos frente a los flexibles.

Se elige una sección tanto de pavimentos rígido como de flexible; en un estudio realizado para el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), donde dicha sección se analizará para las mismas condiciones de tránsito (tránsito pesado de  $10 \times 10^6$  ejes equivalentes de 8.2 toneladas), así como la misma condición de calidad de-suelo (valor relativo de soporte (VRS) de 8%)

Se emplearon precios de adquisición de materiales de acuerdo al mercado. En los dos casos no se considera la capa sub-rasante.

Es importante señalar que en los pavimentos flexibles es utilizado el concreto asfáltico. Mientras que en los pavimentos rígidos es utilizado el concreto hidráulico.

Cuadro Comparativo

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

PAVIMENTO FLEXIBLE	COSTO DIRECTO
1) Sub-base con material de banco de 15 cm de espesor, incluye acarreo de 20 Km	\$13,587.40/m <sup>2</sup>
2) Base de material granular seleccionado incluye carga con máquina y 20 Km de acarreo	\$20,206.85/m <sup>2</sup>
3) Riego asfáltico de impregnación con asfalto FM-1 a razón de 1.5 lit/m <sup>2</sup> . Incluye acarreo de 20 Km	\$1,776.32/m <sup>2</sup>
4) Riego de liga con asfalto FM-1 a razón de 1 lit/m <sup>2</sup> , incluye carga y acarreo a 20 Km	\$1,198.22/m <sup>2</sup>
5) Carpeta de concreto asfáltico PA-5 con espesor compacto de 10 cm incluye carga y acarreo de 20 Km	\$19,492.42/m <sup>2</sup>
6) Riego de sello sobre carpeta asfáltica a razón de 1 kg/m <sup>2</sup> , incluye limpieza.	\$427.42/m <sup>2</sup>
TOTAL =	\$ 56,688.65 / m <sup>2</sup>

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

PAVIMENTO RÍGIDO	COSTO DIRECTO
1) Pavimento de concreto premezclado de $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ y revenimiento de 7cm con agregado máximo de $1 \frac{1}{2}$ " con juntas transversales a base de varillas lisas de 1" de diámetro y trabazón de agregado, juntas longitudinales con cimbra machihembra.	\$96,500.67/m <sup>2</sup>
2) Sub-base con material de banco de 15 cm de espesor, seleccionado. Incluye acarreo de 20 Km	\$18,116.87/m <sup>2</sup>
TOTAL =	\$ 114,617.54 / m <sup>2</sup>

Por lo tanto, se puede concluir; que para un mismo tipo de suelo y para tránsito pesado el costo del pavimento rígido llega a ser el doble del costo del pavimento flexible.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ANEXO AL CAPITULO V

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## PRUEBA DE LA TÉCNICA BRASILEÑA.

En 1948, Lobo Carneiro en Brasil realizó un procedimiento de ensaye indirecto en tensión, que se conoce como el ensaye brasileño. En esencia consiste en someter un cilindro a compresión lineal diametral, como se muestra en la figura. La carga se aplica a través de un material relativamente suave, como triplay o corcho. Si el material fuera perfectamente elástico, se originarían esfuerzos de tensión uniformemente distribuidos en la mayor parte del plano diametral de carga, como se muestra también la figura.

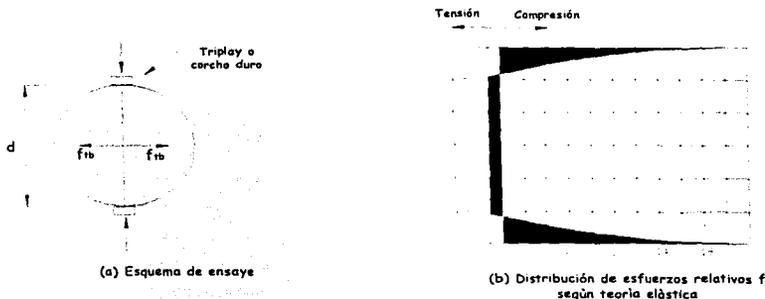


FIGURA V.1 DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS Y TIPO DE CARGA EN TENSIÓN INDIRECTA.

TESIS CON  
FALLA DE TENSÓN

**BIBLIOGRAFÍA**

- 1.- PAVIMENTOS DE CONCRETO. Construyendo lo nuevos caminos de México. CEMEX. Concretos. 2000.
- 2.- REVISTA DE INGENIERIA CIVIL. Colegio de Ingenieros Civiles. Agosto de 1996 y Abril de 1998.
- 3.- PAVIMENTOS DE CONCRETO. Diseño y construcción, juntas, sobrecarpetas. Apertura rápida al tráfico. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. 1995
- 4.- INGENIERIA DE TRÁNSITO. Fundamentos y aplicaciones. Rafael Cal y Mayor R., Jaime Cárdenas G. Editorial Alfaomega. 1998
- 5.- TESIS. CONSERVACIÓN Y SUPERVICION DE LA AUTOPISTA: GUADALAJARA - TEPIC. Juan José Miranda Rubio, Vázquez García Luis. 2000
- 6.- APUNTES DE LA MATERIA: VIAS TERRESTRES. Prof. GUILLERMO L. ESQUIVEL. México, DF. 1996
- 7.- APUNTES DE LA MATERIA: ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS. Prof. Gabriel García Altamirano. México, DF. 1998
- 8.- TESIS. USO DEL CONCRETO HIDRÁULICO EN LA CONSTRUCCIÓN Y REHABILITACIÓN DE CARRETERAS EN MÉXICO. Cuahutémoc Aguirre López. 1995
- 9.- ESTRUCTURACION DE VIAS TERRESTRES. FERNANDO OLIVERA BUSTAMANTE 2° EDICION CECSA
- 10.- TESIS. ANALISIS DE ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS CARRETROS CON ENFOQUE DE CICLO DE VIDA DE PROYECTO JESUS SANTIAGO SALAS FLORES JUAN CARLOS MONTES MALFAVON MEX. DF. 1999
- 11.- PAVIMENTOS ASFALTICOS. MARIN LEON HUMBERTO MEXICO. DF. 1989
- 12.- CONSTRUCCION, CONSERVACION Y RECUPERACION DE PAVIMENTOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO GUILLERMO PRADO MEX. DF. 1990

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y PAVIMENTOS RÍGIDOS.

- 13.- DISEÑO ESTRUCTURAL DE CARRETERAS CON PAVIMENTOS FLEXIBLES  
SANTIAGO CORRO ROBERTO MAGALLANES MEX. DF. 1980
- 14.- CONSTRUCCION Y MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS EDITH MARTINEZ  
ROSETH MEXICO DF. 1995
- 15.- PAVIMENTO DE CONCRETO HIDRAULICO, UNA ALTERNATIVA EN  
URBANIZACIÓN FRANCISCO MARTINEZ GUZMÁN MÉXICO DF. 1995
- 16.- REHABILITACION DE PAVIMENTOS POR MEDIO DE SOBRECARPETAS DE  
CONCRETO HIDRÁULICO EFREN MARCELINO GUTIERREZ LOPEZ MÉXICO. DF.  
1996
- 17.- REHABILITACION DE PAVIMENTOS CON CONCRETO DE CEMENTO PÓRTLAND  
REVISTA IMCYC OCTUBRE DE 1985
- 18.- CONCRETO CONTRA ASFALTO REVISTA IMCYC OCTUBRE DE 1989
- 19.- AUTOPISTA GUADALAJARA TEPIC REVISTA IMCYC OCTUBRE DE 1989
- 20.- ENTORNO AL USO DEL CONCRETO HIDRAULICO EN LA RED CARRETERE  
NACIONAL( TERCER CONGRESO NACIONAL DE CONCRETO) ALFONSO RICO  
RODRÍGUEZ. MÉXICO 1994
- 21.- EMPLEO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO PRESFORZADO COMO ALTERNATIVA  
DE REHABILITACION DE CARRETERAS DE ASFALTO (TERCER CONGRESO  
NACIONAL DE CONCRETO). JOSE ANTONIO TENA COLUNGA MÉXICO 1994
- 22.- LA INGENIERIA DE SUELOS EN LAS VIAS TERRESTRES  
ALFONSO RICO RODRÍGUEZ. VOL II EDITORIAL LIMUSA. MÉXICO DF. 1982
- 23.- INGENIERÍA PARA EL CONTROL DE RESIDUOS MUNICIPALES E INDUSTRIALES,  
S.A. DE C.V.