



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

**MAESTRÍA EN MECÁNICA DE SUELOS**

**“APLICACIÓN METODOLÓGICA EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS  
FLEXIBLES EN CARRETERAS DE ALTAS ESPECIFICACIONES Y  
AVANCES TECNOLÓGICOS”**

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA

P R E S E N T A

ING. BULMARO REYES VALLE



DIRECTOR DE LA TESIS

ING. ROBERTO SOSA GARRIDO

MÉXICO, D.F. AGOSTO DE 2006



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

- La Secretaría de Comunicaciones y Transportes.  
Por la oportunidad brindada en mi desarrollo y superación profesional.
- La Universidad Autónoma de México.  
Por la formación adquirida en la maestría de Mecánica de Suelos en el posgrado de la Facultad de Ingeniería.
- La Universidad Autónoma de Guerrero.  
Por la oportunidad y apoyo brindado en la realización del estudio de posgrado.
- El Ing. Juan Manuel Orozco y Orozco, Director General de Servicios técnicos de SCT., por su apoyo y autorización al acceso a la información obtenida para la elaboración de mi tesis.
- El M. en C. Andrés Gama García, Director de la Unidad Académica de Ingeniería de la UAG., por su intervención y apoyo decidido para mi superación académica y profesional.
- El Dr. Roberto Arroyo Matus, catedrático e investigador de la Unidad Académica de Ingeniería de la UAG., por su colaboración y ayuda recibida en la elaboración de mi tesis.
- El Ing. Efraín Ávila Euresti, Jefe de la Unidad General de Servicios Técnicos del Centro SCT Guerrero, por su apoyo recibido y amistad.
- Los Ings. Roberto Hernández Islas y Miguel Sánchez Mejía, Subdirector de Geotecnia y Jefe de Departamento de Pavimentos y Terracerías de la Dirección de Estudios de la Dirección General de Servicios Técnicos de SCT., por las facilidades en la obtención de información y asesoría recibida.
- El director de tesis.  
Ing. Roberto Sosa Garrido, catedrático de la Facultad de Ingeniería y Posgrado de la UNAM, por su asesoría, comentarios y su disposición de su valioso tiempo, en la elaboración del trabajo de tesis.
- El jurado designado.  
Dr. Gabriel Auvinet Guichard, investigador del Instituto de Ingeniería de la UNAM y catedrático del Posgrado de la facultad de Ingeniería de la UNAM, por sus acertadas recomendaciones y sugerencias.  
Dr. Rigoberto Rivera Constantino, Jefe del Departamento de geotecnia, catedrático e investigador de la facultad de Ingeniería de la UNAM, por su valioso apoyo, asesoría y orientación, en los trámites académico y en el trabajo de tesis.

Los M. en I. Agustín Demeneghi y Roberto Magaña del Toro, catedráticos e Investigadores de la Facultad de Ingeniería y Posgrado de la UNAM, por sus asesorías y orientación.

- A todas las personas que coadyuvaron y me proporcionaron su ayuda y valioso tiempo.

### **DEDICATORIAS A:**

- Mis Padres.

Alejo Reyes Molina y Josefina Valle Hernández, q.e.p.d., que no pudieron ver sus anhelos y sacrificios que hicieron para lograr mi profesión.

- Mi Esposa e hija.

Lic. Cirila López Espinosa y Alma Delia Reyes López, por su amor, cariño y comprensión en mi superación académica y profesionalmente.

- Mi Hermana

Manuela Reyes Valle, con cariño y amor.

- Mis sobrinas.

Alejandra, María, Elena, Carolina, Guadalupe, Juana y Myrtelia, por su apoyo y cariño.

- Mis Compañeros de trabajo y amigos.

Por el diario convivir y su apreciable amistad.

# “APLICACIÓN METODOLÓGICA EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES EN CARRETERAS DE ALTAS ESPECIFICACIONES Y AVANCES TECNOLÓGICOS”

## CASO: Autopista México-Querétaro, tramo Tepozotlán - Palmillas

### ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1 - 4
1. Objetivo	3
2. Justificación	3
3. Hipótesis	3
CAPÍTULO 1	
INFORMACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN TRAMO CARRETERO DE AUTOPISTA DE CUOTA	5 - 19
1.1 Antecedentes e información general	5
Autopista: México-Querétaro, tramo Tepozotlán - Palmillas	
km 90+000-148+000, subtramo Polotitlán-Palmillas km 133+000-148+000	
1.2 Problemática	6
1.3 Evaluación	7
1.4 Situación actual	13
CAPÍTULO 2	
VARIABLES DE DISEÑO	20 - 37
2.1 Tránsito vehicular	20
2.2 Estudios geotécnicos	22
2.3 Estudios de drenaje y subdrenaje	26
2.4 Condiciones ambientales	29
2.5 Efecto de las variables en alternativas y estrategias	31
CAPÍTULO 3	
NORMATIVIDAD SCT DE LA CALIDAD DE LOS MATERIALES Y PRUEBAS DE LABORATORIO	38 - 62
3.1 Terracerías	39
3.2 Estructura del pavimento	41

<b>CAPÍTULO 4</b>	
<b>APLICACIÓN DEL DISEÑO ESTRUCTURAL EN PAVIMENTO FLEXIBLE EN EL SUBTRAMO CARRETERO</b>	<b>63 - 136</b>
4.1    Métodos experimentales	
4.1.1  Instituto de Ingeniería UNAM. DISPAV-5, (versión 2)	64
4.1.2  AASHTO	77
4.2    Método teórico	
4.2.1  Modelo Kenlayer	87
4.3    Pavimento por catálogo	
4.3.1  Secciones de firmes del catálogo de España	108
<b>CAPÍTULO 5</b>	
<b>EVALUACIÓN ECONÓMICA</b>	<b>137 - 143</b>
5.1    Construcción	137
5.2    Conservación	141
5.3    Operación	143
<b>COMENTARIOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>144 - 149</b>
<b>ANEXOS:</b>	
A	150 - 170
B	171 - 189
C	190 - 193
D	194 - 219
E	220 - 236
<b>REFERENCIAS</b>	<b>237 - 239</b>

## INTRODUCCIÓN

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes, cuenta con el Programa Nacional de Desarrollo de Comunicaciones y Transportes correspondiente al período 2001-2010 y con una visión al 2011-2020 para modernizar los 14 corredores troncales que se tienen. Actualmente se han impulsado una serie de acciones de construir y ampliar la infraestructura carretera, apoyando el desarrollo regional y fortaleciendo la integración de zonas de producción y consumo.

El programa de desarrollo denominado “Sistema Nacional de Carreteras” tiene como principal función la de desplazar a las personas y bienes a través de todo el país, constituyéndose también como un instrumento primordial para su integración social, económica y cultural. La Red Federal Nacional de Carreteras se divide por el tipo de camino, ya sea de cuota, libre, estatal, rural y brechas mejoradas, que constituyen la red básica de carreteras. El Sistema Nacional de Carreteras ha planeado complementar y terminar las obras viales de 14 corredores troncales que tienen una longitud de 19 000 km, fuera de los corredores troncales y libramientos en las principales ciudades.

Los proyectos programados en el período 2001-2010 son construir carreteras de 2 y 4 carriles, así como ampliar las carreteras a 12 m de corona de los corredores troncales con una longitud de 3 430 km; ampliar carreteras a 12 m de corona fuera de los corredores troncales con una longitud de 590 km y construir y modernizar libramientos en las principales ciudades con una longitud de 407.4 km. En el período 2011- 2020 se planea construir y ampliar carreteras en los corredores troncales con una longitud de 3 418.2 km y ampliar las carreteras fuera de los corredores troncales con una longitud de 4 239 km.

Los corredores troncales son parte de la red básica de carreteras y están compuestos por autopistas de cuota, administradas por Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos, concesionadas y estatales, así como carreteras libres; el avance de estos corredores troncales en su construcción y modernización a la fecha es del 70%, las obras viales fuera de los corredores troncales y libramientos de las principales ciudades son del orden del 1%. Los tramos de autopistas dan continuidad de flujo vehicular y soportan mayores volúmenes de tránsito, con elevados porcentajes de vehículos pesados.

La estructura del pavimento y terracerías de la red básica de carreteras, generalmente datan de las épocas de 1920 a 1930 y de 1950 a 1970, en la que la red carretera tuvo un desarrollo importante; obviamente en esas épocas el vehículo más pesado que recorría las carreteras nacionales llegaba a ser de 7 a 8 toneladas, en la actualidad los vehículos que circulan superan las 60 toneladas; además los aforos vehiculares que se tenían eran de 2 000 a 3 000 vehículos diarios, de los que el 10% fueron camiones de carga; hoy es común ver en la red básica de carreteras de 4 hasta 8 veces mayor el número de vehículos y la proporción aumentó considerablemente a los niveles de 30 ó 40% de camiones de carga.

Los pesos de los vehículos de antaño ejercían esfuerzos superficiales sobre los pavimentos menores que los de hoy y éstos disminuían más rápidamente con la profundidad, de manera que un pavimento típico en su estructura era hasta de 30 a 40 cm de espesor; los pesos de los vehículos actuales, con esfuerzos mayores, duplican esta profundidad de influencia. Los pavimentos se construían con materiales inadecuados de acuerdo a especificaciones actuales y en las capas de terracerías generalmente se utilizaban suelos producto de préstamos laterales; los materiales eran frecuentemente tan endebles que se consideraba que el agua y sus efectos convertían en altamente deformables las secciones estructurales del pavimento.

En el período de 1989 a 1994 se construyeron, ampliaron y modernizaron autopistas de cuota con una longitud de 5,000 km, los cuales forman parte de los corredores troncales. En algunos tramos de autopistas se ha observado que los refuerzos estructurales del pavimento presentan un serio problema recurrente de conservación, pues los vehículos pesados actuales envían sus esfuerzos a las capas de terracerías las cuales son dañadas, haciendo poco durable la vida útil del pavimento.

Los métodos de diseño que se aplicaron fueron de gran diversidad, con teorías e hipótesis propias y por consecuencia, la estructura de los pavimentos es heterogénea, por tanto, la confiabilidad de éstos es reducida. Por esta razón se dice que México no tiene un método de diseño de pavimentos flexibles propio y coherente.

Con la aplicación de la metodología en el diseño de pavimentos flexibles que se presenta en este trabajo, se pretende contribuir como una aportación más, ya que se contempla un análisis de diseño integral: a) la experimentación, lo teórico en donde se emplea el desarrollo de la computación en condiciones prácticas y la selección de la estructura del pavimento por catálogo; b) condiciones imperantes del país, la normatividad de la calidad de los materiales naturales y estabilizados que se emplean en las obras y la evaluación de costos del camino en su etapa de construcción, conservación y operación del transporte.

Dado lo anterior, los diseñadores y proyectistas en pavimentos flexibles que tienen los concesionarios y el Sistema Nacional de Carreteras en su programa, podrán utilizar y aplicar como alternativa de solución la metodología, con la finalidad de planear en forma adecuada los recursos asignados a la obra y asimismo optimizar los recursos económicos para la conservación, rehabilitación y construcción de las autopistas o caminos que se construyen en México.

## **OBJETIVO**

Aplicar las metodologías recientes en el diseño de pavimentos flexibles en tramos de la red básica de carreteras, considerando las condiciones actuales de tránsito, drenaje, subdrenaje y geotécnico de la estructura del pavimento y terracerías que se tienen construidas; asimismo, emplear los avances tecnológicos referentes a estrategias de construcción, materiales naturales y estabilizados que cumplan con las normas SCT vigentes, asegurando con ello un mejor comportamiento mecánico e hidráulico de la obra vial que debe ser confortable, segura, económica y duradera en su vida útil de proyecto.

Como ejemplo se aplican las metodologías en un tramo de la autopista: México-Querétaro

## **JUSTIFICACIÓN**

Económica:

En el presente trabajo se aplican diferentes métodos de diseño de la estructura de pavimentos flexibles y terracerías, que nos permitirán mejorar el comportamiento mecánico e hidráulico de la obra vial y evitar a futuro un alto porcentaje de conservación y operación del transporte en tramos carreteros.

Social:

Las obras viales proyectadas y diseñadas en forma apropiada, coadyuvarán a dar un mejor servicio y una comodidad adecuada a los usuarios que producen y distribuyen mercancías en el territorio nacional, así como la atención de las actividades de exportación y de turismo en el país.

## **HIPÓTESIS**

Con la aplicación de la metodología en el diseño de pavimentos flexibles y avances tecnológicos, se contribuirá como una aportación más a seleccionar el método o los métodos de diseño acordes a las condiciones del país, para obtener un mejor comportamiento mecánico e hidráulico de las capas que constituyen el pavimento y las terracerías y así poder contar con obras viales en la red básica de carreteras de una calidad de su estado físico de aceptable a bueno.

Este trabajo está desarrollado en cinco capítulos, conforme a lo siguiente:

### **CAPÍTULO 1 INFORMACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN TRAMO CARRETERO DE AUTOPISTA DE CUOTA.**

Se presentan los antecedentes e información general del tramo, km 90+000 al 148+000 de la autopista México- Querétaro, se menciona la problemática general de las autopistas, los estudios de evaluación estructural no destructivos y levantamientos físicos de los tipos de fallas que se tienen en la superficie de rodamiento del subtramo, km 133+000 al 148+000 de la autopista y situación actual del subtramo, el cual es representativo del tramo carretero.

## CAPÍTULO 2 VARIABLES DE DISEÑO

Se analizan los datos obtenidos de los estudios de tránsito, geotécnico, drenaje y subdrenaje del subtramo, las condiciones ambientales que existen y asimismo, la influencia que hay en las estrategias de construcción, considerando sus alternativas de solución y viabilidad en el diseño de pavimentos flexibles.

## CAPÍTULO 3 NORMATIVIDAD SCT DE LA CALIDAD DE LOS MATERIALES Y PRUEBAS DE LABORATORIO

Se hace referencia a la normatividad SCT de los diferentes materiales que se emplean en las capas de la estructura del pavimento y terracerías, ya que en éstas se proponen valores específicos para su diseño y la calidad de construcción de los mismos; se mencionan las pruebas de laboratorio de calidad de los materiales que deben de realizarse para cada una de las capas por construir.

## CAPÍTULO 4 APLICACIÓN DEL DISEÑO ESTRUCTURAL EN PAVIMENTO FLEXIBLE EN EL SUBTRAMO CARRETERO

Se describen los métodos de diseño y su aplicación en el subtramo carretero, tomando en cuenta las condiciones actuales, estudios realizados, variables de diseño, materiales naturales o estabilizados y la normatividad SCT de los materiales vigentes.

## CAPÍTULO 5 EVALUACIÓN ECONÓMICA

Se evalúan económicamente las diferentes alternativas de solución, su costo inicial de construcción, conservación correspondiente y operación del transporte en el subtramo carretero.

Con el diseño del pavimento y su evaluación económica de la mejor alternativa de solución, se presentan los comentarios, conclusiones y recomendaciones adecuadas, cumpliéndose con el objetivo e hipótesis de este trabajo.

# **CAPÍTULO 1**

## **INFORMACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN TRAMO CARRETERO DE AUTOPISTA DE CUOTA**

### **1.1 ANTECEDENTES E INFORMACIÓN GENERAL**

Autopista: México-Querétaro, tramo: Tepozotlán-Palmillas, km 90+000 al 148+000, subtramo: Polotitlán-Palmillas, km 133+000 al 148+000.

El tramo de la autopista se localiza entre las coordenadas geográficas 19°45' y 20° 10' de latitud Norte; 98° 49' y 99° 50' de longitud Oeste. Comunica el Distrito Federal, Estado de México y Querétaro, además, conforma el corredor troncal: México-Querétaro-San Luis Potosí-Monterrey-Nuevo Laredo, del Sistema Nacional Carretero; dicho tramo consta de 6 carriles, dos cuerpos, ancho de corona de 14 m por cuerpo, camellón variable en algunos subtramos y cuerpos separados; en las figuras 1.1 y 1.2 se muestra el croquis del tramo y la sección del pavimento. La estructura del pavimento es tipo flexible, compuesta por un sistema de capas que se colocan sobre las terracerías, cuya función es la de soportar las cargas de los vehículos, sin que éstas se deformen y deterioren considerablemente durante su vida útil de proyecto, ofreciendo una superficie de rodamiento segura y una buena comodidad. El pavimento flexible generalmente está estructurado por una carpeta asfáltica que es una mezcla en caliente con agregados bien graduados y asfalto, esta capa debe ser resistente, poco deformable e impermeable; debajo de ésta se tiene una base hidráulica o base estabilizada que debe tener una resistencia tal, que soporte las cargas vehiculares y absorba los esfuerzos cortantes, los agregados que se utilizaron son triturados parcial o totalmente; después subyace la capa de sub-base hidráulica, cuyos agregados deben tener características permeables y un mínimo porcentaje de finos, ya que constituye la capa drenante.

En los corredores troncales existen además tramos construidos con pavimento rígido, los cuales están formados por una losa de concreto hidráulico y de una sub-base con las mismas características de los pavimentos flexibles.

La autopista México-Querétaro es un tramo del corredor troncal por el que pasa anualmente un valor transportado del orden del 25% del producto interno bruto del país y un flujo vehicular importante entre los estados de México y Querétaro principalmente; el tramo inicia en el Estado de México, atraviesa la Delegación de Cuautitlán y las poblaciones de Tepozotlán, Zumpango de Ocampo, Tepeji del Río, San Francisco, San Agustín y Polotitlán.

La autopista México-Querétaro, se inauguró en octubre de 1958 con cuatro carriles de circulación, las terracerías se construyeron considerando que a futuro se realizará el tercer carril a cada cuerpo, cuando los volúmenes de tránsito lo justificaran; posteriormente se hicieron obras

complementarias como pasos a desnivel, pasos peatonales, puentes, alumbrado en subtramos urbanos y suburbanos.

Debido al acelerado crecimiento demográfico del país y al intenso flujo vehicular que transita por la autopista de referencia, el organismo descentralizado Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos, ha tenido la necesidad de construir el tercer carril y realizar diferentes rehabilitaciones en distintos subtramos a lo largo de la autopista, con la finalidad de mejorar la capacidad de resistencia de la estructura del pavimento para soportar los efectos de carga de los vehículos y del intemperismo durante un período de tiempo, brindando comodidad y seguridad del usuario.

Los tramos en los que se han realizado las rehabilitaciones y reconstrucciones son:

**De los años de 1997 a 1999.** La construcción de la ampliación del tercer carril en el cuerpo A del tramo: km 90+000 al 148+0000 y de los subtramos km 90+000 al 130+000, 134+000 al 143+000 del cuerpo B de la autopista, la cual consistió en terracerías, sub-base estabilizada con el 6% de cemento Pórtland de 15 cm, base hidráulica de 20 cm y carpeta asfáltica de 10 cm de espesor.

La construcción de la carpeta asfáltica del km 96+800 al 114+000 y del km 117+000 al 148+000 de 20 cm, carpeta delgada de graduación abierta (open graded) del km 77+640 al 114+000 y del km 117+000 al 148+000 de 3 cm de espesor del cuerpo A y B.

**De los años del 2000 a 2002.** La construcción del tercer carril del km 130+000 al 134+000 y del km 143+000 al 148+000, carpeta asfáltica de 10 cm de espesor y obras complementarias en el km 96+700 al 106+800 y del km 107+000 al 114+020 del cuerpo B. Se realizaron trabajos de bacheo, renivelaciones, fresado de 4 cm, carpeta asfáltica delgada de 4 cm y tratamiento superficial del km 90+000 al 100+000 en ambos cuerpos.

La topografía sobre la que se desarrolla el tramo, es de tipo plano a lomerío suave, por lo que, existen cortes mínimos y terraplenes de 2 a 3 m respectivamente; el terreno de cimentación está constituido por arenas arcillosas, limos y arcillas y geológicamente se tienen rocas basálticas, andesitas, brechas volcánicas y tobas.

## 1.2 PROBLEMÁTICA

Las obras viales deben diseñarse de tal manera que la estructura de los pavimentos presente una capacidad estructural aceptable y que las fallas que se tengan en la superficie de rodamiento sean los máximos permitidos, contribuyendo con esto a que los costos de conservación sean los planeados y los costos de operación del transporte mínimos.

En las autopistas de cuota se ha detectado mediante información, que en tramos carreteros como: la autopista del Sol México-Acapulco, subtramos km 95+000-123+000, 238+000-266+000, 278+000-298+000 y 300+000-311+000; autopista La Tinaja-Cosoleacaque, km 0+000-188+000 en subtramos aislados; autopista Guadalajara-Tepic, km 0+000-1+700 y 25+380-168+616; autopista México-Veracruz, subtramos km 27+600-45+200 y 82+700-96+600 del cuerpo A y 32+000-61+600 del cuerpo B y otros tramos de autopistas, en la que se tienen estudios y proyectos para conservar, rehabilitar y reconstruir, ya que estos tramos y subtramos han

presentado fallas de capacidad estructural y deterioros mayores a los previstos a su diseño, que fue de 15 a 20 años. En los años de 1989 a 1994 fue el auge de la construcción de autopistas y el mayor porcentaje se concesionó; la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en el año 1998 rescató del orden del 65% de las autopistas. Una de las razones fue que su estado físico era aceptable y tendía a malo en mayor porcentaje, creándose un problema social a futuro; su conservación y reconstrucción rebasaron los costos programados por los concesionarios.

La problemática pudo deberse a:

- ◆ La predicción del (TDPA) tránsito diario promedio anual, fue menor al real, debido al aumento considerable en los primeros años de su operación.
- ◆ La inestabilidad de taludes en cortes y terraplenes por falta de tiempo de consolidación de los materiales o diseños no apropiados.
- ◆ Falta de planeación y estrategias técnicas por aplicar en la conservación.
- ◆ Fallas estructurales del pavimento, en donde se utilizaron materiales que no cumplieron especificaciones de construcción y de diseño, asimismo, el alto porcentaje de vehículos pesados que no se tomaron en cuenta.
- ◆ Falta de planeación y carencia de proyectos ejecutivos oportunamente.
- ◆ Aplicación de métodos de diseño de pavimentos no apropiados, que no tomaron en cuenta las condiciones que se tienen en el país.

Con la finalidad de subsanar la problemática y cumplir con el objetivo e hipótesis presentados en el presente trabajo, la aplicación de uno o más métodos de diseño de pavimentos se debe tomar en cuenta: la planeación, estudios y proyectos; en los proyectos deben de incluirse los procedimientos constructivos, costos de construcción en su etapa inicial, de conservación y de operación. Además, debe implementarse la investigación sobre el comportamiento de los materiales en el laboratorio y campo, asimismo, realizar instrumentación en subtramos carreteros construidos para verificar su comportamiento mecánico e hidráulico en un tiempo determinado.

### **1.3 EVALUACIÓN**

Para conocer el comportamiento real del pavimento, es indispensable revisar una serie de evaluaciones periódicas, desde su etapa inicial de construcción. Para ello, existen una gran variedad de métodos que nos determinan las condiciones de servicio y las condiciones estructurales; el propósito de la evaluación del pavimento sirve para las actividades de planeación, conservación, reconstrucción y mejorar los modelos de diseño. Los métodos más comunes y los que se realizaron en el tramo de la autopista fueron:

- ◆ Inventario de deterioros. Consiste en hacer un levantamiento físico sobre la superficie de rodamiento actual, para detectar y revisar los daños que se presentan de: roderas, desprendimientos, asfalto aflorado, agrietamiento piel de cocodrilo, grietas longitudinales, grietas transversales, pulido de la superficie y hundimientos.
- ◆ Índice de Rugosidad Internacional (IRI). La obtención de las características del rodamiento, con instrumentos que nos permiten medir la rugosidad superficial o calidad de éste.

- ◆ Deformaciones permanentes. Medición de deformaciones transversales o longitudinales con regla de tres metros
- ◆ Deflexiones. La medición de las deformaciones elásticas del pavimento, empleando equipo dinámico especial HWD.



### **Análisis preliminar del tramo.**

La información que se tiene en el tramo km 90+000 al 148+000 de la autopista México-Querétaro, con longitud de 58 km, presenta una gran cantidad de resultados de laboratorio y de campo que son similares, al ejecutar los métodos anteriores se consideró analizar en forma preliminar la homogeneización de subtramos: km 90+000-107+000, 107+000-122+000, 122+000-133+000 y 133+000-148+000; en este análisis se observó que los deterioros graves y muy graves de baches, grietas de piel de cocodrilo y superficie pulida, se presentan en subtramos aislados y los más significativos se tienen en el cuerpo A del km 93+000 al 143+000 del carril de baja y central, en el cuerpo B del km 95+000 al 137+600 del carril de baja y central; además el número de capas que se tienen del pavimento y terracerías son generalmente las mismas; los resultados de las pruebas de laboratorio indican que la base hidráulica en su grado de compactación y el equivalente de arena son inferiores a lo especificado por normas de calidad vigentes, así también las capas de subrasante y subyacente en su grado de compactación no cumplen con las normas. Los valores se presentan en los cuatro subtramos con variaciones mínimas, sus aforos vehiculares difieren considerablemente como se muestra en las figuras A.1 a A.4 del anexo A. Información tomada de la referencia 3.

Con base en el análisis, el subtramo crítico y para fines de aplicación de la metodología del diseño de pavimentos flexibles de la autopista será del km 133+000 al 148+000, con longitud de 15 km, TDPA = 30 784 vehículos en ambos sentidos y su composición vehicular de automóviles =56.50% y vehículos pesados =43.50%; los cuerpos A y B se encuentran separados.

### **Descripción de los métodos de evaluación.**

**INVENTARIO DE DETERIOROS.** El levantamiento de deterioros, se realizó en subtramos de 100 m, hasta completar tramos de 1.0 km, para ello se utilizó un vehículo a baja velocidad. Las inspecciones de deterioro se detallaron en forma razonable, identificando su severidad y extensión; durante el recorrido de subtramos se encontró una diversidad de fallas en la superficie de rodamiento, por lo que se procedió a su registro, éstas se muestran en las figuras A.5 a A.10 del anexo A.

Definición de tipo de fallas y probables causas.

**RODERAS.** Son asentamientos o deformaciones permanentes de la carpeta asfáltica en el sentido longitudinal debajo de las huellas o rodadas de los vehículos, que concentran las cargas transmitidas por los neumáticos a las diferentes capas de la estructura. Las roderas son indicativas de deficiencias estructurales del pavimento, por la baja compactación en cualquiera de las capas, la degradación de los materiales por las cargas y descargas impuestas por el tránsito, baja estabilidad de la carpeta, mala calidad de los materiales, etc.

**BACHES.** Son oquedades de varios tamaños en la carpeta de rodamiento por desprendimiento o desintegración inicial; el desprendimiento inicial de los agregados por el paso de los vehículos va formando oquedades, este tipo de falla es originado por la falta de espesor y baja compactación de la carpeta, escasez de contenido de asfalto, drenaje deficiente, etc.

**GRIETAS LONGITUDINALES.** Son grietas o fisuras paralelas al eje del camino. Se originan por las deficiencias en las juntas de construcción longitudinal de la carpeta asfáltica, asentamientos de capas por el tránsito, reflejo de grietas en capa de base hidráulica, contracción de materiales en la capa de rodamiento, drenaje insuficiente, etc.

**GRIETAS TRANSVERSALES.** Son asentamientos de la carpeta perpendiculares al eje del camino. Se producen por la acción de las cargas del tránsito vehicular, contracción térmica de la superficie de rodamiento, deficiencia de las juntas de construcción transversal, etc.

**DESPRENDIMIENTOS.** Son desgranamientos de la carpeta asfáltica, por separación de los agregados gruesos, dejando huecos en la superficie de rodamiento. Esto se debe a la escasez del asfalto, falta de afinidad del material pétreo con el asfalto, baja calidad de la mezcla, etc.

**ASFALTO AFLORADO.** Es el flujo de liberación del asfalto hacia la superficie de la carpeta asfáltica, forma una lámina o película de asfalto en la superficie del pavimento con aspecto brillante, vítreo y reflejante, la cual comúnmente se vuelve pegajosa. Se origina por exceso de asfalto en la mezcla, aplicación sobrada de riegos de sellos y/o por un bajo porcentaje de vacíos del agregado pétreo en la carpeta asfáltica llena dichos vacíos, excesiva compactación de mezclas ricas, etc.

**AGRIETAMIENTO PIEL DE COCODRILO.** Este deterioro también conocido como agrietamiento por fatiga, consiste en una serie de grietas interconectadas que se originan por la fatiga o envejecimiento de la carpeta de concreto asfáltico bajo la repetición de cargas vehiculares. Las grietas se empiezan a formar en la parte inferior de la capa, en donde el esfuerzo y la deformación alcanzan valores máximos; posteriormente las grietas se extienden a la superficie inicialmente en la forma de una serie de grietas paralelas longitudinales, después las grietas se interconectan formando los contornos poligonales de ángulos agudos, cuyo patrón semeja la piel de cocodrilo. Este deterioro se puede deber también a la falta de la estructura del pavimento, carpetas rígidas sobre suelos de cimentación resilientes, etc.

**PULIDO DE SUPERFICIE.** Es el desgaste acelerado en la superficie de la capa de rodamiento, produciendo áreas lisas. Estos deterioros son originados por tránsito intenso, agregado grueso de la carpeta con baja resistencia al desgaste, excesiva compactación, hundimiento del agregado grueso en cuerpo de la carpeta, etc.

**HUNDIMIENTOS.** Son asentamientos transversales y longitudinales que se presentan en áreas del pavimento localizadas en elevaciones más bajas que las áreas adyacentes o elevaciones de diseño en el sentido transversal y longitudinal. Los deterioros son originados por la deformación diferencial vertical del suelo de cimentación o las capas que forman la estructura del pavimento, cambios volumétricos del cuerpo del terraplén, compactación no adecuada, procedimientos de construcción inadecuados, drenaje y subdrenaje deficientes, etc.

En la tabla A.1 del anexo A, se presentan los tipos de fallas de graves a muy graves del subtramo. Información tomada de las referencias 3 y 6.

**ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI).** La rugosidad en el pavimento es experimentada por el pasajero y el operador del vehículo, viajando sobre la superficie de rodamiento en la que se detecta la comodidad adecuada o no de trayecto. La rugosidad se divide en tres componentes de distorsión de perfil: transversal, longitudinal y horizontal. Las distorsiones de la superficie del pavimento pueden generar aceleraciones verticales y laterales. La aceleración vertical es el factor que contribuye mayormente a la incomodidad del ocupante y derivada de una distorsión longitudinal del perfil del pavimento. La medida del perfil longitudinal en la trayectoria de la rueda de un determinado vehículo provee la mejor muestra de la rugosidad de una superficie de rodamiento.

Los dispositivos utilizados para obtener el índice de perfil son los perfilógrafos, perfilómetros o rugosímetros. Los perfilógrafos consisten en un juego de ruedas de carretón en el frente y en la parte posterior, una rueda registradora en el centro y una registradora de cinta gráfica para la captura del movimiento de la rueda registradora. La rueda registradora es libre de moverse verticalmente cuando el dispositivo pasa sobre protuberancias y depresiones en el pavimento. Los registros de las cintas gráficas de la rugosidad de los pavimentos son analizados y el resultado es reportado en m/km, generalmente. La desventaja de estos tipos de dispositivos es su baja velocidad de operación.

El dispositivo que se utilizó en el subtramo de la autopista, fue mediante un vehículo al que se le adaptó un sistema de radar al frente del mismo y que al circular con una velocidad de 60 a 80 km/hr en la superficie de rodamiento, envía y recibe pulsos electromagnéticos que son recolectados a través de una cinta por el radar. Posteriormente en gabinete se procesa mediante un software desarrollado internamente para obtener con precisión el Índice de Rugosidad Internacional; en la tabla A.2 y A.3 del anexo A, se presentan los resultados del IRI.

### **Escala y características del IRI**

La escala y características del IRI son:

- ◆ Las unidades están en mm/m, m/km y in/mi.
- ◆ El intervalo de la escala del IRI para un camino pavimentado es de 0 a 12 m/km, donde 0 es una superficie perfectamente uniforme y 12 un camino intransitable; en la figura 1. 3 se presentan los valores del IRI.
- ◆ Para una superficie con pendiente constante sin deformaciones (plano inclinado perfecto), el IRI es igual a cero. Por lo que la pendiente como tal, no influye en el valor del IRI, no así en los cambios de pendiente.

La capa de rodamiento de una carretera posee una serie de características técnicas y funcionales, obtenidas a partir de criterios y especificaciones de construcción. Su estado depende de la calidad inicial y del desgaste o deterioro producido por el tránsito y los factores climáticos entre otros.

A nivel de red, partiendo de las mediciones de rugosidad de un camino, se puede definir el estado de los pavimentos mediante el índice de rugosidad; al realizar un programa de evaluación anual en esos caminos, se puede llegar a conocer el comportamiento del deterioro a través del tiempo. Los efectos de diversos tipos de mantenimiento sobre los pavimentos con el tiempo se presentan en la figura 1.4.

Con base en la experiencia y al comportamiento típico de los pavimentos, en México se recomienda un IRI de la forma siguiente:

- ◆ De 0 a 3, se requiere conservación rutinaria.
- ◆ De 3 a 5, se requiere de estudios para programar los trabajos de conservación a corto plazo.
- ◆ De 5 en adelante, se requiere de estudios de evaluación, para programar los trabajos de rehabilitación, reconstrucción o construcción.

Para el caso de las autopistas de cuota que conforman los corredores troncales del país, el nivel de rechazo es de 2.81 m/km del IRI, en donde se requiere realizar estudios para definir los trabajos de rehabilitación, reconstrucción o construcción y valores menores de 2.81 m/km requieran conservación rutinaria.

**DEFORMACIONES PERMANENTES.** Las mediciones de deformaciones se realizaron transversalmente en zonas de roderas con regla de tres metros; en las tablas A.2 y A.3 del anexo A, se muestra el resumen promedio ponderado de la profundidad de las roderas. La calificación es de tipo cualitativo siendo: de 0 a 5 mm zonas de aceptación, de 5 a 15 mm zonas de corrección y mayor de 15 mm zonas de rechazo.

**DEFLEXIONES.** Para obtener las deflexiones se utilizó el equipo dinámico Heavy Weight (HWD), con la finalidad de establecer un diagnóstico de la condición estructural actual del pavimento; las mediciones de desplazamiento se realizaron a cada 200 m en tres bolillos, en el carril de baja velocidad y el carril central de ambos cuerpos.

En la evaluación de desplazamientos se obtuvo:

- a) Medición de desplazamientos verticales.

El equipo dinámico permite la simulación del efecto producido por el tránsito vehicular al dejar caer libremente unas pesas sobre una placa segmentada y transmitir así una carga específica al pavimento. Durante el impacto se registran los desplazamientos verticales y sus tiempos de ocurrencia mediante geófonos, con espaciado de 30, 45, 60, 90, 120 y 180 cm a partir del geófono localizado bajo la carga. Ésta varía de 2 a 8 toneladas para autopistas con placa segmentada de 30 cm, el impacto está proyectado para producir un desplazamiento vertical igual al causado por el neumático de un vehículo pesado.

El equipo almacena en una computadora los valores de desplazamiento vertical de cada uno de los geófonos; esta información posteriormente es procesada mediante programas especiales de cómputo, con la finalidad de conocer el desplazamiento vertical. Los resultados se presentan en las tablas A.4 a A.7 del anexo A en el carril de baja y central del cuerpo A y B.

## b) Calificación estructural del pavimento

En cada medición efectuada con el equipo HWD se procedió a obtener el área comprendida entre la curva de los desplazamientos verticales registrados y los ejes cartesianos, a esta área se le denomina Índice Estructural ( $I_e$ ). El valor de  $I_e$  proporciona un indicador cualitativo muy útil para conocer la condición estructural del pavimento, ya que toma en cuenta todos los desplazamientos verticales registrados por los geófonos y por consecuencia, considera la respuesta producida por las capas que forman el pavimento.

La escala de calificación estructural del pavimento se indica a continuación, a partir del índice estructural ( $I_e$ ).

CALIFICACIÓN ESTRUCTURAL	$I_e$ ( $\text{mm}^2$ )	
	10	Excelente
9	Muy buena	100 a 200
8	Buena	200 a 400
7	Regular	400 a 800
6	Mala	800 a 1 600
5	Pésima	>1 600

En las figuras A.11 a A.14 del anexo A, se presenta la calificación estructural.

Además de los dispositivos aplicados, existen una serie de métodos para obtener la evaluación de los pavimentos flexibles en carreteras, por su sencilla aplicación y bajo costo, uno de los que comúnmente es utilizado es el:

**Índice de Servicio Actual (ISA).** Es la calificación actual de la superficie de rodaje de un camino y está definida como la apreciación subjetiva de una persona o de un grupo de personas, de la capacidad de servicio de un pavimento en un momento dado, comparándola con aquella para la cual fue construido éste.

La calificación actual toma en cuenta exclusivamente el estado de la superficie de rodaje en el momento de la inspección, sin que influya en la misma el conocimiento que tenga el observador de posibles condiciones futuras del pavimento. Tampoco influyen en la calificación actual aspectos del camino tales como: diseño geométrico, diseño del pavimento, estado de los acotamientos, taludes, etc. La calificación considera el grado de comodidad que el usuario obtendría al efectuar el recorrido por un camino a la velocidad de operación, con un estado superficial semejante al que se juzga. Bajo esas condiciones, el calificador podrá juzgar si el estado del pavimento es excelente, regular o intransitable.

La calificación actual verdadera es el valor medio de las apreciaciones del grupo de observadores o calificadores. A medida que el grupo se reduce, aumenta la diferencia entre la calificación verdadera y la del grupo.

Para que los observadores puedan normar su criterio al emitir su opinión, se usa una escala numérica en la cual referir la calificación actual. La experiencia ha demostrado que la mejor escala es la que va de cero (intransitable) a cinco (excelente), con los siguientes intervalos de referencia.

CALIFICACIÓN	ESTADO DEL PAVIMENTO
4 - 5	Muy bueno
3 - 4	Bueno
2 - 3	Regular
1 - 2	Malo
0 - 1	Muy malo

Dentro del estudio del banco mundial para el establecimiento del Índice Internacional de Rugosidad, se realizó la estimación de la evaluación subjetiva con el método del ISA y el IRI, se observó que existen diferencias entre estos valores en los países; por lo que se recomienda no se utilice la calificación del grupo de evaluadores para la obtención del ISA o correlación con el IRI, debido a que ambos parámetros tienen principios contrarios.

#### 1.4 SITUACIÓN ACTUAL

El organismo descentralizado de Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos, tiene como función principal la operación, conservación y administración de las diferentes redes de autopistas de cuota en el país, cuya longitud es de 6 143 km. La calificación de su estado físico del año 2004 es:

CALIFICACIÓN	ESTADO DEL PAVIMENTO
(%)	
20	Bueno
68	Aceptable
12	Deficiente

La **evaluación** de los dispositivos que se ejecutaron y presentaron en figuras y tablas del subtramo: km 133+000 al 148+000 de la autopista México-Querétaro, se resume y concluye de la forma siguiente:

**Índice Internacional de Rugosidad.** El cuerpo B carril de baja, presenta un IRI promedio ponderado de 3.79 m/km, por tanto, se requiere programar trabajos de rehabilitación o reconstrucción.

**Deformaciones permanentes.** El cuerpo B carril de baja, presenta un promedio ponderado de profundidad de roderas de 5.50 mm, se requiere realizar corrección de roderas.

**Deflexiones.** Cuerpo A y B carril de baja, presentan desplazamientos verticales de 0.03 a 1.25 y 0.03 a 0.77 mm, respectivamente.

La **calificación estructural** a partir del índice estructural ( $I_e$ ), más desfavorable se presenta en los cuerpos y carriles siguientes.

Cuerpo A carril de baja			Cuerpo B carril de baja				
Calificación		( $I_e$ en $mm^2$ )	Calificación		( $I_e$ en $mm^2$ )		
10	Excelente	4.05%	< 100	10	Excelente	2.03%	< 100
9	Muy buena	12.84%	100 a 200	9	Muy buena	5.41	100 a 200
8	Buena	62.84%	200 a 400	8	Buena	56.76%	200 a 400
7	Regular	20.27%	400 a 800	7	Regular	34.46%	400 a 800

Los tipos de deterioros de mayor severidad de graves a muy graves son.

Cuerpo	Carril	Km a km	Deterioro
A	Baja	134+000-134+300, 135+700-135+800, 137+100-137+200 y 137+400-137+800 138+000-139+900	Baches Desprendimientos
A	Central	138+000-138+500 137+000-138+000, 139+000-140+000 y 141+000-147+600	Grietas piel de cocodrilo Pulido de superficie
B	Baja	138+000-139+900	Baches, grietas longitudinales y de piel de cocodrilo
B	Central	136+000-137+900 y 138+000-138+500 136+000-137+900 y 143+000-147+900	Grietas de piel de cocodrilo Pulido de superficie

El tramo de la autopista en cuestión tiene una antigüedad de 43 años del cuerpo A y B carriles de baja y central. En 1997 se construyó la carpeta de concreto asfáltico de 20 cm de espesor, asimismo, se han realizado trabajos de conservación rutinaria consistente en bacheos, renivelaciones con mezcla asfáltica y tratamientos superficiales. La estructura del pavimento está formada por: carpeta de concreto asfáltico de espesor variable de 10 a 50 cm, base hidráulica de 12 a 30 cm sub-base estabilizada con cemento pórtland de 10 a 20 cm y capa de subrasante de 15 a 30 cm; la carpeta de concreto asfáltico tiene un 6 % de contenido de asfalto, la calidad de los materiales de la base hidráulica es inadecuada por la falta de compactación y alto porcentaje de suelo fino y las capas de terracerías presentan compactaciones menores a los especificados.

El tercer carril o carril de alta se construyó de 1997 a 2002; sus fallas o deterioros varían de despreciable a media, en roderas y pulido de la superficie de rodamiento en subtramos aislados.

Las características de tránsito del subtramo, km 133+000 al 148+000 de la autopista y que es representativo del tramo, presenta un tránsito diario promedio anual (TDPA) de 30 784 vehículos en ambos sentidos, composición vehicular de automóviles (A) de 56.50%, autobuses (B) de 6.40% y camiones (C) de 37.10%.

**De acuerdo con los resultados de los métodos de evaluación, años de antigüedad y la calidad de los materiales de la estructura del pavimento, se requiere realizar estudios y proyecto del tramo: km 90+000 al 148+000 y subtramo km 133+000 al 148+000 de la autopista México-Querétaro, en los cuerpos A y B, carriles de baja y central.**

**AUTOPISTA: MÉXICO-QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN – PALMILLAS, KM 90+000 – 148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN – PALMILLAS, KM 133+000 – 148+000**

## **F I G U R A S**

**AUTOPISTA: MÉXICO-QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN – PALMILLAS, KM 90+000 – 148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN – PALMILLAS, KM 133+000 – 148+000**

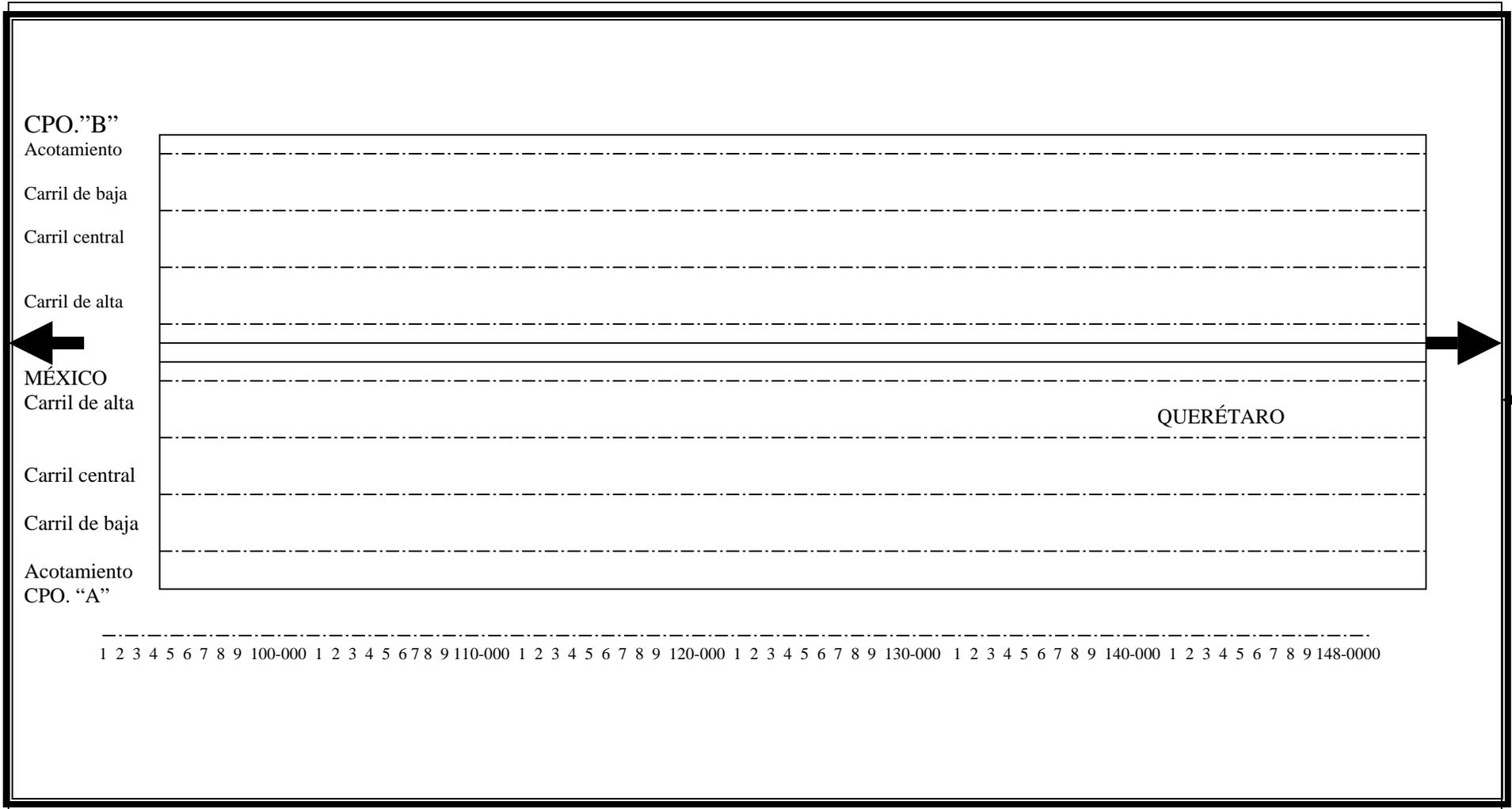
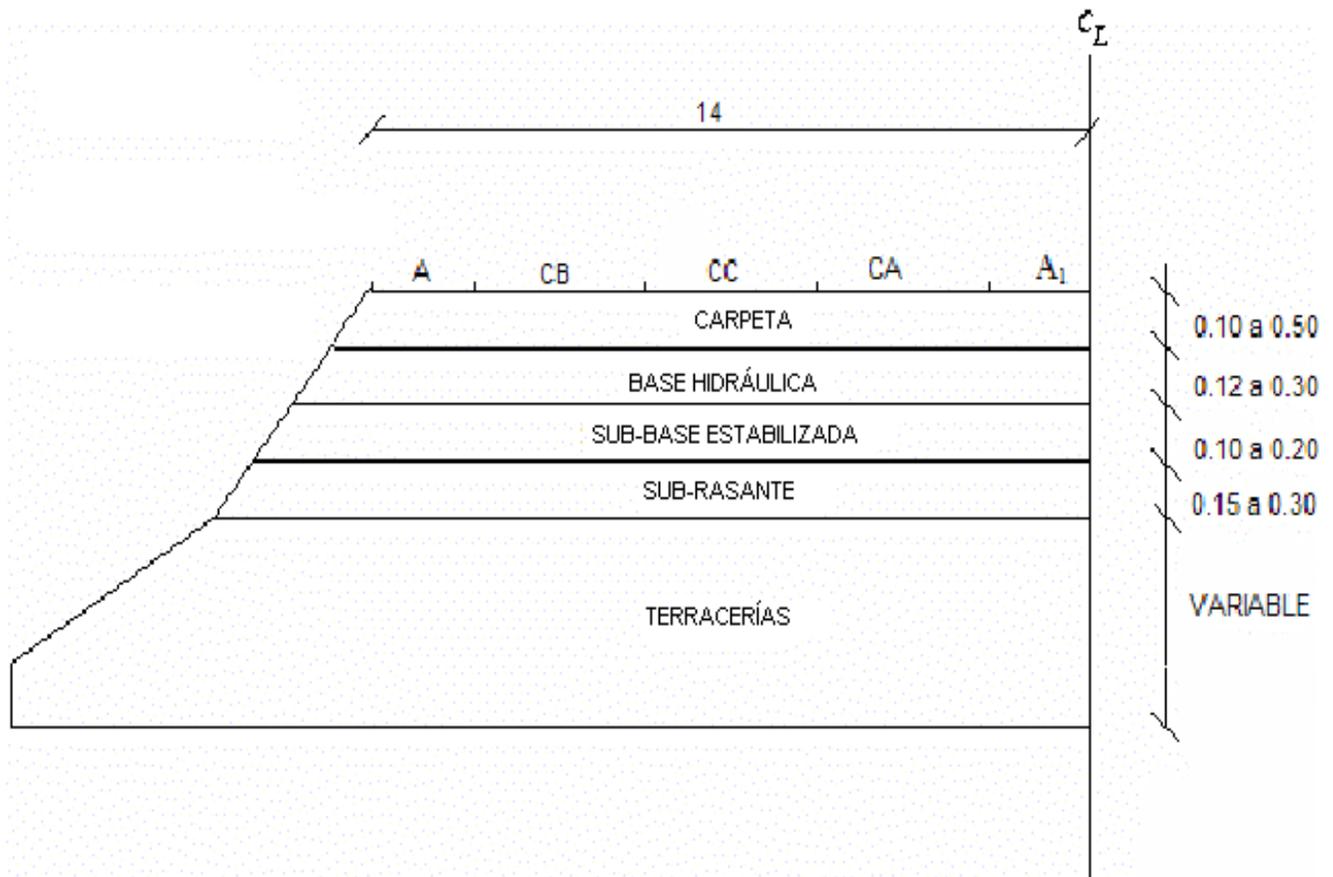


Figura 1.1 Croquis del tramo

AUTOPISTA: MÉXICO- QUERÉTARO  
TRAMO: TEPOZOTLÁN – PALMILLAS, KM 90+000-148+000  
SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000- 148+000

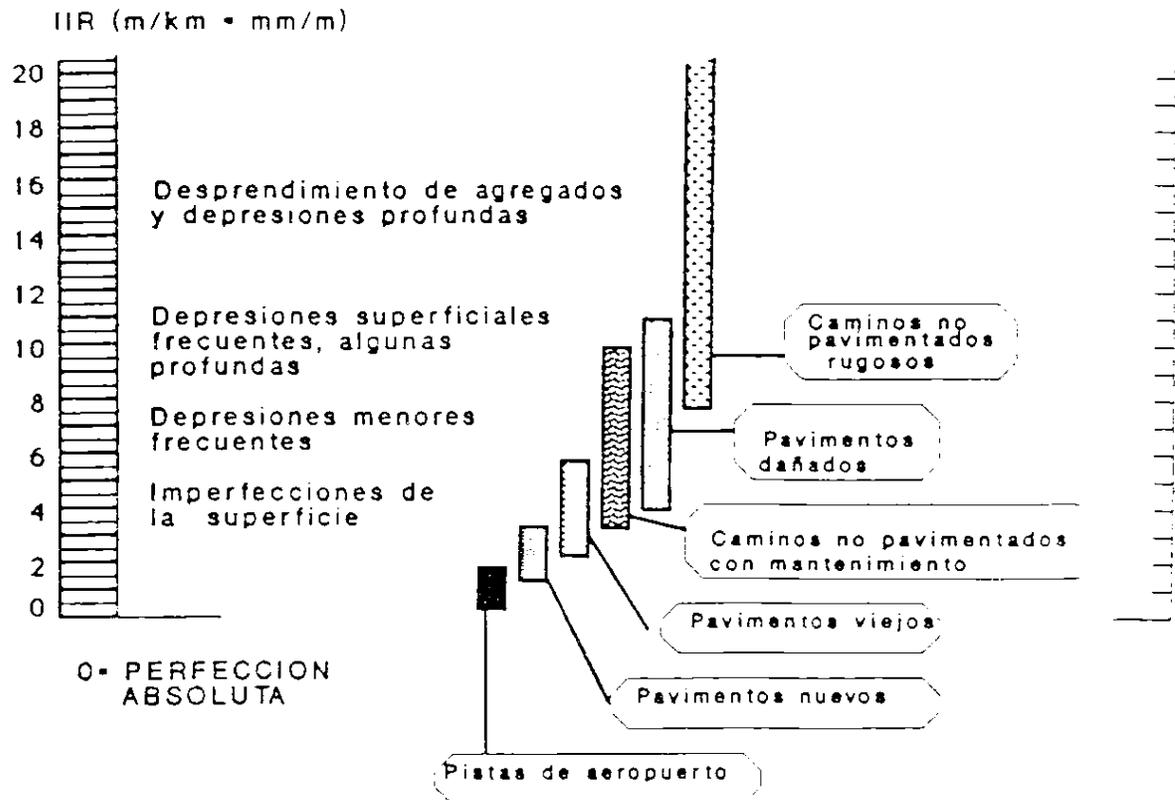


- A acotamiento 2.00 m.
- CB carril de baja 3.50 m.
- CC carril central 3.50 m.
- CA carril de alta 3.50 m.
- A<sub>1</sub> acotamiento interior 1.35 m.

Se tiene camellón central de ancho variable y en algunos subtramos en los cuerpos A y B están separados.

Figura 1.2 Sección del pavimento flexible.

AUTOPISTA: MÉXICO- QUERÉTARO  
TRAMO: TEPOZOTLÁN – PALMILLAS, KM 90+000-148+000  
SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000- 148+000



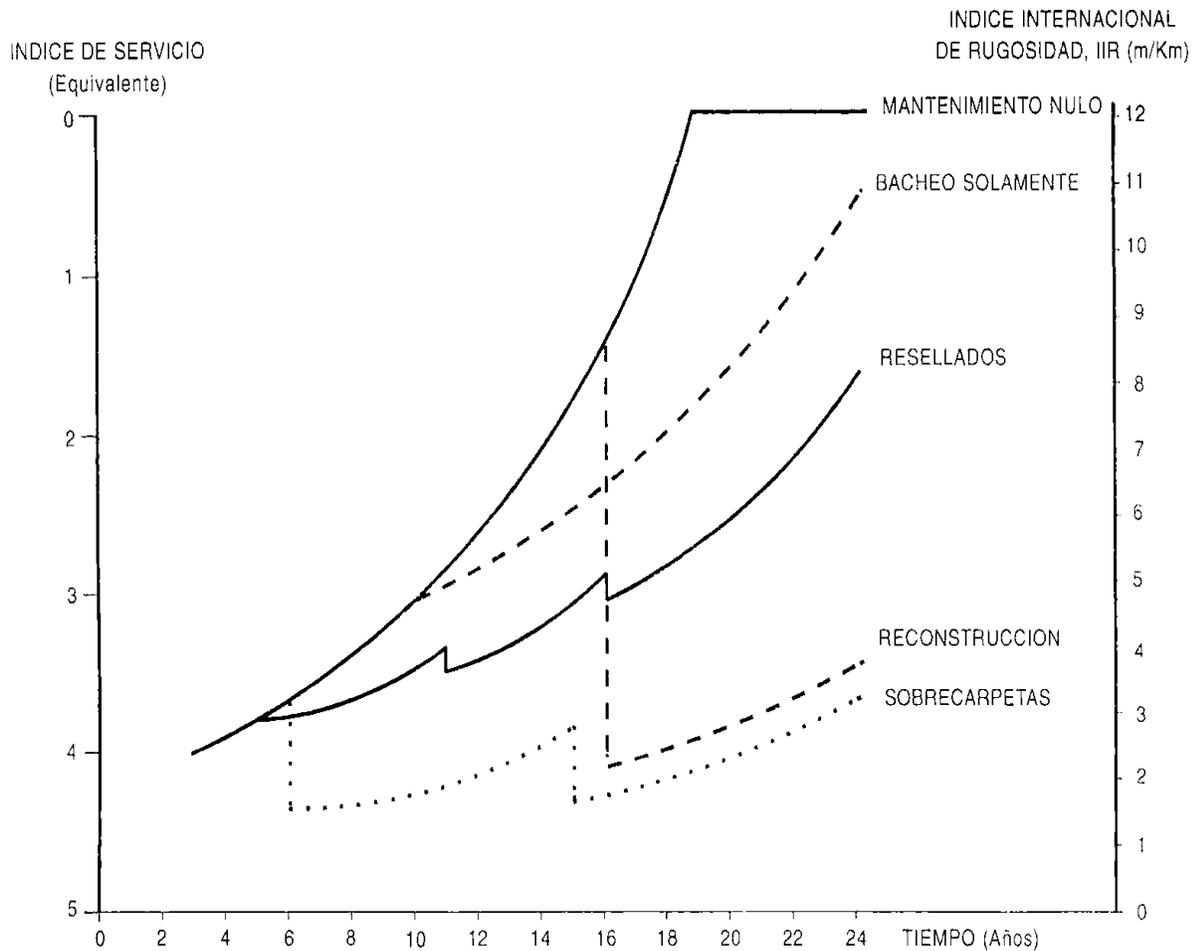
Fuente:

Sayers, M.W., T.D. Gillespie, and W.D.O. Paterson (1986).  
Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness  
Measurements. Technical Paper 46, World Bank, Washington,  
D.C.

## ESCALA DEL INDICE INTERNACIONAL DE RUGOSIDAD

Figura 1.3 Índice Internacional de Rugosidad  
(Referencia 8)

**AUTOPISTA: MÉXICO- QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN – PALMILLAS, KM 90+000-148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000- 148+000**



Efectos de diversos tipos de mantenimiento sobre los pavimentos con el tiempo en función del Índice de Servicio Actual y del Índice Internacional de Rugosidad

Figura 1.4 Efectos de diversos tipos de mantenimientos  
(Referencia 8)

## CAPÍTULO 2 VARIABLES DE DISEÑO

### 2.1 TRÁNSITO VEHICULAR

El conocimiento del volumen y tipos de vehículos que circulan en el tramo de la autopista México- Querétaro, permite determinar el grado de ocupación y las condiciones en que opera; el análisis de su evolución histórica es primordial para definir las tendencias de su crecimiento y planear con oportunidad las acciones que se necesitan para evitar que algunos subtramos dejen de prestar el nivel de servicio que demanda el tránsito.

La información es básica para estudiar el potencial de captación de tránsito del tramo, así como definir sus características geométricas y estructurales. También programar su conservación, modernización o reconstrucción, respectivamente.

Para conocer la magnitud y variación estacional de los volúmenes de tránsito durante los años 1995 a 2004, se tomó la información de aforos de tránsito de cada año de los Datos Viales que realiza y edita la Secretaría de Comunicaciones y Transportes; los aforos se efectuaron en la estación maestra ubicada en la caseta Palmillas km 148+000, sentido Tepeji-Palmillas de la autopista México- Querétaro.

Los volúmenes de tránsito son:

AÑO	TDPA	INCREMENTO TDPA	INCREMENTO ( % )
1995	19 352		
1996	20 634	1 282	6.21
1997	22 967	2 333	10.15
1998	22 924	-3	0.01
1999	24 752	1 828	7.38
2000	25 872	1 120	4.32
2001	26 960	1 088	4.03
2002	29 409	2 449	8.32
2003	29 549	140	0.47
2004	30 784	1 235	4.01
			<b>SUMA = 44.90</b>

**TDPA.-** Es el tránsito diario promedio anual; el TDPA del año 2004 es de 30 784 vehículos en ambos sentidos en el subtramo.

**(t).-** Es la tasa de crecimiento; t es la relación de la suma de % de incremento entre el número de eventos de incrementos,  $t = 5 \%$

**La clasificación vehicular del 2004 es:**

<b>CLASIFICACIÓN</b>	<b>COMPOSICIÓN DEL TRÁNSITO (%)</b>	<b>PESO EN T CARGA MAX.</b>	<b>TRÁFICO VEHICULAR DIARIO</b>
A	56.50	2.00	17 393
B2	5.00	17.50	1 539
B3	1.00	26.00	308
B4	0.40	30.50	123
C2	7.30	17.50	2 247
C3	8.10	26.00	2 494
T2-S2	0.30	35.50	92
T3-S2	15.40	44.00	4 740
T3-S3	2.40	48.50	739
T3-S2-R2	1.10	60.50	339
T3-S2-R4	2.50	73.70	770
<b>TOTAL</b>	<b>100.00</b>	<b>PROM. 34.70</b>	<b>30 784</b>

Las cargas de los vehículos fueron tomadas del reglamento sobre el peso, dimensiones de la capacidad de los vehículos de auto-transporte que transitan en las carreteras y puentes de jurisdicción federal del Diario Oficial de la Federación de fechas 8 de agosto y 19 de octubre del año 2000.

La composición vehicular de automóviles (A), autobuses (B) y camiones (C) del 2002 al 2004 es:

<b>CLASIFICACIÓN \ AÑO</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>
A (%)	54.70	56.50	56.50
B (%)	8.00	6.40	6.40
C (%)	37.30	37.10	37.10
<b>SUMA</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>

**La clasificación vehicular.** Se refiere a los vehículos que integran al tránsito, ésta se proporciona en por ciento del TDPA de acuerdo con la siguiente simbología.

- A2. Automóvil de dos ejes
- B2. Autobús de dos ejes
- B3. Autobús de tres ejes
- B4. Autobús de cuatro ejes
- C2. Camión de dos ejes
- C3. Camión de tres ejes
- T2-S2. Tractor de dos ejes con semiremolque de dos ejes
- T3-S2. Tractor de tres ejes con semiremolque de dos ejes
- T3-S3. Tractor de tres ejes con semiremolque de tres ejes
- T3-S2-R2. Tractor de tres ejes con semiremolque de dos ejes y remolque de dos ejes
- T3-S2-R4. Tractor de tres ejes con semiremolque de dos ejes y remolque de cuatro ejes

En el tramo de la autopista en el año 2004, se realizaron igualmente aforos de tránsito para conocer la variación del TDPA y su clasificación vehicular a lo largo del tramo; la información fue tomada de la referencia 3, la cual se presenta a continuación:

<b>ENTRONQUE</b>	<b>TDPA</b>	<b>A (%)</b>	<b>B (%)</b>	<b>C (%)</b>
km 98+000	16 143	53.00	30.00	17.00
Aculco km 115+000	22 478	54.00	26.50	19.50
Polotitlán km 133+000	21 536	45.50	31.50	25.00

## 2.2 ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

### Exploración de la estructura actual del pavimento, pozos a cielo abierto (pca)

Con la finalidad de conocer las propiedades físicas y mecánicas de las capas que componen la estructura del pavimento existente, espesores y la calidad de los materiales, se realizaron sondeos de pozo a cielo abierto (pca) a una profundidad mínima de 1.5 m, obteniendo muestras alteradas para ser analizadas en el laboratorio y determinar el contenido de asfalto, grado de compactación, peso volumétrico del suelo seco (pvss), peso volumétrico seco máximo (pvsm), contenido de agua óptimo (w opt.), contenido de agua de lugar (w lugar), límite líquido (LL), límite de plasticidad (LP), índice plástico (IP), equivalente de arena (EA), absorción (abs.), densidad (den.), valor relativo de soporte del lugar (VRS del lugar), valor relativo de soporte (VRS) y expansión (expans.). Se hicieron 60 sondeos de pozos a cielo abierto del subtramo en los cuerpos A y B del carril de baja y central, el espaciamiento de estos sondeos fue de 500, 1 000, 1 500 y 2 000 m considerando zonas homogéneas; los espesores encontrados en la estructura del pavimento son variados, se obtuvieron muestras de carpeta asfáltica, base hidráulica, sub-base hidráulica, sub-base estabilizada, subrasante, subyacente, terraplén y terreno natural.

En las tablas B.1 a B.6 del anexo B, se muestran los informes de los resultados de las pruebas de laboratorio y la ubicación de los sondeos de pozos a cielo abierto. Información tomada de la referencia 3.

A continuación se describen las características de cada una de las capas encontradas, así como los resultados de las pruebas de laboratorio.

#### Cuerpo A, carril de baja

En el cuerpo A carril de baja, la **carpeta asfáltica** existente varía de 10 a 15 cm de espesor, con un contenido de asfalto de 5.8 a 6.1%; la **base hidráulica** con espesores de 15 a 30 cm, la compactación de 80 a 93%, (W lugar) de 7.8 a 1.5%, (LL) de 33.2 a 39.7% , (IP) de 23.6 a 25.3%; un (EA) de 17 a 43%, un (VRS) de 85 a 122% y la expansión de 0.0 a 0.40 %; la **sub-base estabilizada** varía de 5 a 45 cm de espesor; la **subrasante** con espesor de 20 a 75 cm, la compactación de 87 a 95%, el W lugar de 12.0 a 24.9 %, el LL de 27.6 a 37.4%, el IP de 5.5.a

12.7%, un EA de 16 a 25%, un VRS de 26 a 57% y la expansión de 0.0 a 0.9%; la **subyacente** con espesor de 15 a 95 cm, la compactación de 90 a 93%, el W lugar de 9.5 a 29.1%, el LL de 35.2 a 47.4 %, el IP de 6.6 a 20.0%, un EA de 10 a 28%, un VRS de 20 a 50% y la expansión de 0.0 a 0.40%; el **terraplén** con espesor de exploración de 20 a 80 cm, la compactación de 80 a 93%, el W lugar de 10.0 a 31.3%, el LL de 30.2 a 57.7%, el IP de 7.7 a 27.5%, un EA de 9 a 30%, un VRS de 9 a 88% y la expansión de 0.0 a 2.82% y el **terreno natural** con espesores de exploración de 40 a 90 cm, la compactación de 80 a 99%, el W lugar de 25.0 a 38.0%, el LL de 33.7 a 67.4%, el IP de 10 a 34.6%, un EA de 3 a 25%, un VRS de 3 a 45%, y la expansión de 0.25 a 3.40%.

### Cuerpo A, carril central

En el cuerpo A carril central, la **carpeta asfáltica** existente varía de 5 a 65 cm de espesor, con un contenido de asfalto de 4.9 a 6.1%; la **base hidráulica** con espesores de 10 a 70 cm, la compactación de 95 a 97%, el W lugar de 5.6 a 10.1%, el LL de 34.0 a 37.5%, el IP de 10.2 a 19.9%, un EA de 21 a 35%, un VRS de 60 a 109% y la expansión de 0.0 a 0.5%; la **sub-base hidráulica** con espesor de 10 a 80 cm, la compactación de 90 a 97%, el W lugar de 5.8 a 15.0% el LL de 28.1 a 38.6%, el IP de 5.9 a 13.6%, un EA de 15 a 31%, un VRS de 54 a 110% y la expansión de 0.0%; la **subrasante** con espesores de 10 a 105 cm, la compactación de 90 a 93%, el W lugar de 16.3 a 27.9%, el LL de 24.8 a 57.1, el IP de 5.9 a 27.1%, un EA de 12 a 24%, un VRS de 19 a 40% y la expansión de 0.0 a 0.70%; la **subyacente** con espesores de 15 a 115 cm, la compactación de 90 a 93%, el W lugar de 13.0 a 37.0%, el LL de 29.6 a 48.6%, el IP de 7.0 a 20.9 %, un EA de 10 a 24%, un VRS de 19 a 30% y la expansión de 0.0 a 0.40% y el **terraplén** con espesores de exploración de 15 a 150 cm, la compactación de 88 a 93%, el W lugar de 21.1 a 36.0%, el LL de 30.2 a 48.6%, el IP de 7.4 a 20.9%, un EA de 10 a 23%, un VRS de 11 a 42% y la expansión de 0.0 a 0.8%.

### Cuerpo B, carril de baja

En el cuerpo B carril de baja, la **carpeta asfáltica** existente varía de 10 a 13 cm de espesor, con un contenido de asfalto de 5.1 a 6.7%; la **base hidráulica** con espesores de 13 a 30 cm, la compactación de 90 a 98%; el W lugar de 8.5 a 12.5%, el LL de 24.8 a 40.5% el IP de 3.5 a 16.0 %, un EA de 22 a 37%, un VRS de 84 a 114% y la expansión de 0.0 a 0.60; la **sub-base estabilizada** varía de 10 a 48 cm de espesor; la **subrasante** con espesor de 7 a 68 cm, la compactación de 90 a 96%, el W lugar de 7.9 a 28.1 %, el LL de 23.3 a 42.9%, el IP de 2.4 a 18.7%, un EA de 10 a 40%, un VRS de 16 a 47% y la expansión de 0.4 a 0.8%; la **subyacente** con espesor de 20 a 28 cm, la compactación de 90 a 92%, el W lugar de 6.3 a 26.9%, el LL de 36.0 a 44.6 %, el IP de 11.7 a 17.9%, un EA de 10 a 43%, un VRS de 13 a 72% y la expansión de 0.0 a 0.80%; el **terraplén** con espesor de exploración de 20 a 70 cm, la compactación de 90 a 92%, el W lugar de 16.0 a 29.5%, el LL de 35.1 a 48.6%, el IP de 11.0 a 20.9%, un EA de 8 a 29%, un VRS de 12 a 36% y la expansión de 0.6 a 0.90% y el **terreno natural** con espesores de exploración de 20 a 90 cm, la compactación de 80 a 97%, el W lugar de 16.0 a 40.5%, el LL de 40.2 a 54.2%, el IP de 4.7 a 49.3%, un EA de 8 a 35%, un VRS de 5 a 66%, y la expansión de 0.0 a 3.40%.

## Cuerpo B, Carril Central

En el cuerpo B carril central, la **carpeta asfáltica** existente varía de 35 a 50 cm de espesor, con un contenido de asfalto de 5.1 a 6.7%; la **base hidráulica** con espesores de 15 a 25 cm, la compactación de 93 a 96%, el W lugar de 5.9 a 14.9%, el LL de 29.6 a 37.5%, el IP de 7.0 a 12.8.%, un EA de 19 a 30%, un VRS de 73 a 121% y la expansión de 0.0 a 0.8%; la **sub-base hidráulica** con espesor de 10 a 25 cm, la compactación de 91 a 94%, el W lugar de 6.0 a 25.10% el LL de 30.1 a 40.6%, el IP de 7.4 a 15.0%, un EA de 20 a 28%, un VRS de 36 a 130% y la expansión de 0.0 a 0.45%; la **subrasante** con espesores de 10 a 30 cm, la compactación de 91 a 93%, el W lugar de 16.1 a 30.5%, el LL de 35.6 a 48.1%, el IP de 11.4 a 20.5%, un EA de 9 a 21%, un VRS de 11 a 44% y la expansión de 0.0 a 1.20%; la **subyacente** con espesores de 15 a 115 cm, la compactación de 90 a 94%, el W lugar de 19.5 a 32.0%, el LL de 31.5 a 41.2%, el IP de 8.4 a 15.5 %; un EA de 9 a 26%, un VRS de 14 a 48% y la expansión de 0.0 a 0.40% y el **terraplén** con espesores de exploración de 20 a 136 cm, la compactación de 90 a 93%, el W lugar de 24.4 a 31%, el LL de 34.2 a 45.8%, el IP de 10.4 a 18.8%, un EA de 8 a 29%, un VRS de 12 a 35% y la expansión de 0.0 a 1.90%.

Con base en la exploración realizada, la estructura del pavimento existente es:

### CUERPO A

CAPA	ESPEJOR PROMEDIO COMPACTO (CM)	
	Carril de baja	Carril central
Carpeta asfáltica	10	42
Base hidráulica	20	39
Sub-base estabilizada	22	--
Sub-base hidráulica	--	39
Subrasante	25	18
Subyacente	21	19
Terraplén	variable	variable

### CUERPO B

CAPA	ESPEJOR PROMEDIO COMPACTO (CM)	
	Carril de baja	Carril central
Carpeta asfáltica	12	41
Base hidráulica	21	20
Sub-base estabilizada	21	--
Sub-base hidráulica	--	21
Subrasante	15	21
Subyacente	22	21
Terraplén	variable	variable

## Bancos de Materiales.

Los bancos de materiales son lugares en donde se descubre un volumen alcanzable y explotable de suelos o rocas, que pueden emplearse en la construcción de una determinada parte de obra vial, satisfaciendo las especificaciones de calidad y los requerimientos de volumen. En la localización de los bancos deben utilizarse los criterios prácticos y técnicas apropiadas que garanticen lo siguiente: la buena calidad de los materiales, accesibilidad al lugar, tener mínimas distancias de acarreo de los materiales a la obra, el mínimo tratamiento del material que conduzca a procedimientos constructivos más sencillos en el tendido y colocación de los materiales, así como contar con los permisos de las autoridades correspondientes para evitar problemas legales y sociales con habitantes de la región.

A lo largo del tramo de la autopista México-Querétaro, se localizaron y estudiaron 17 bancos de material con la finalidad de tener opciones de suministro suficiente para rehabilitar las capas de terracerías, así como las capas del pavimento. En el subtramo del km 133+000-148+000 se estudiaron 6 bancos de material, de los cuales se presentan los croquis de localización, informes de laboratorio de la calidad de los materiales, volúmenes aprovechables, clasificación presupuestal y el tratamiento para su utilización.

A continuación se señalan los bancos estudiados en el subtramo de la autopista y en las figuras B.1 a B.6 del anexo B, se muestran los croquis e informes de laboratorio. Información tomada de la referencia 3 y 16.

Banco	Ubicación	Utilización	Clasificación Presupuesto	Volumen útil (M <sup>3</sup> )	Tratamiento
El Fresno	Autopista México-Querétaro km 133+300, D/I 3000 m.	Terraplén y Subrasante	80-20-00	6 250 000	cribado
Sin Nombre	Autopista México-Querétaro km 135+100, D/I 40 m.	Terraplén y Subrasante	80-20-00	180 000	cribado
Sin Nombre	Autopista México-Querétaro km 140+180, D/I 40 m.	Terraplén y Subrasante	80-20-00	937 500	cribado
Sin Nombre	Autopista México-Querétaro km 146+000, D/I 30 m.	Terraplén y Subrasante	80-20-00	375 000	cribado
Palmillas	Autopista México-Querétaro km 152+800, L/D.	Subrasante y material pétreo	00-75-25	1 170 000	Trituración total
La Cruz	Autopista México-Querétaro km 113+200, L/I.	Subrasante y base hidráulica	30-70-00	1 500 000	Trituración total

## **2.3 ESTUDIOS DE DRENAJE Y SUBDRENAJE**

Los mayores problemas que se tienen en las obras viales (carreteras, autopistas, aeropistas, etc.), es el agua, que al estar en contacto con el suelo en mayor cantidad, genera fallas en terraplenes, cortes y en la superficie de rodamiento.

En las vías terrestres, el drenaje desempeña la función de retirar en forma rápida y eficiente el agua de lluvia que cae sobre ellas o fuera de la vía, si la obra está en corte o balcón generalmente los taludes se erosionan y si el agua se queda en la superficie de rodamiento de la carretera provoca en el vehículo el acuaplaneo. El drenaje puede ser superficial y subterráneo, según el escurrimiento, ya sea sobre la superficie o a través de las capas de la corteza terrestre.

### **Drenaje superficial.**

El drenaje superficial de las vías terrestres se clasifica, según la posición que las obras guardan en relación de las mismas, en transversal y longitudinal.

El drenaje transversal, es el que tiene por objeto dar paso al agua que cruza de un lado a otro de la vía terrestre o bien, retirar rápidamente el agua de la superficie de la corona, las obras son: bombeo de la corona, lavaderos, alcantarillas, vados, puentes-vados y puentes.

El drenaje longitudinal es aquel que tiene por objeto, captar los escurrimientos para evitar que lleguen a las vías terrestres o permanezcan en ellas, de tal manera que no causen desperfectos, éstas obras son: cunetas, contra cunetas, bordillos y canales de encauzamiento.

Tomando en cuenta la dimensión del claro de la obra de drenaje transversal, se ha convenido dividir a éste en mayor o menor. El drenaje mayor es aquel que requiere obras con claros mayores de 6 m y drenaje menor es el que tiene claros menores a los 6 m. Dado lo antes mencionado, las obras de drenaje se divide en:

### **OBRAS DE DRENAJE MAYOR.**

Son estructuras de (concreto armado, acero, etc.), denominados “puentes” responsables del drenaje transversal, que nos permiten el paso de grandes gastos de agua de los ríos y arroyos a través de la obra, en una dirección más o menos perpendicular a ella. Básicamente en los puentes se realizan estudios de mecánica de suelos, hidrológicos y topohidráulicos; en los proyectos y la construcción de las obras se utilizan técnicas sofisticadas para su ejecución.

### **OBRAS DE DRENAJE MENOR.**

Son estructuras de (concreto, acero, metálicos, etc.), denominadas “alcantarillas” y que tienen la misma función de los puentes, pero con gastos de agua menores de los arroyos, los estudios de mecánica de suelos para su cimentación son someros, en donde se trata de garantizar una capacidad de carga del suelo del orden de 1.0 a 3.0 kg/cm<sup>2</sup>; se realizan estudios hidráulicos en los cruces y en las zonas en donde se tienen cauces de mayor importancia, se hacen estudios hidrológicos. Las alcantarillas que se construyen en las vías terrestres son: tubos de concreto armado, tubos de lámina corrugada de acero, losas de concreto armado, cajones de concreto armado y bóvedas.

Uno de los problemas que se presentan en las alcantarillas, es que los estudios hidráulicos no se hacen en forma detallada en cada cruce, debido al gran número que se tiene en los tramos carreteros, además, los métodos de cálculos que se realizan no toman en cuenta el arrastre de los sólidos y los sedimentos. La experiencia en México indica que el diseño del diámetro obtenido, se agregue del orden del 30% del calculado; también es recomendable construir en carreteras de la red básica alcantarillas con diámetros no menores de 0.90 m y en autopistas, alcantarillas de 1.20 m mínimo de diámetro.

## OBRAS COMPLEMENTARIAS DE DRENAJE.

Las obras complementarias de drenaje, son aquellas que se construyen en las vías terrestres con la finalidad de contribuir a encausar y eliminar las aguas superficiales que de otro modo causarían daños. Las obras más comunes son: bombeo de la corona, guarniciones, bordillos, lavaderos, bermas, bordos, cunetas, contra cunetas y canales interceptores.

Las obras complementarias de drenaje no son de uso universal o rutinario, por lo menos no deben de serlo. Son obras que se realizarán sólo en el lugar que se requieran, pues de otra manera se derrocharán los recursos económicos.

### **Subdrenaje (drenaje subterráneo).**

Los subdrenes son elementos de un sistema cuya función es la de llevar la presión atmosférica a donde convenga en el interior de las masas de suelo, creando así una disminución en la presión de agua de los suelos que beneficia la resistencia de los mismos, como consecuencia del desequilibrio de presiones entre el agua existente en el suelo y en el interior del subdrén, tiene lugar un flujo de agua hacia éste último. Cuando el gasto de ese flujo en el interior del subdrén es importante, surge la necesidad de captar, conducir y eliminar el agua generada.

El subdrenaje puede modificar los niveles freáticos naturales, generalmente abatiéndolos. Con este efecto contribuyen a mejorar la resistencia en cortes y terraplenes, así como las diferentes capas de la estructura del pavimento de la carretera que se coloque, todo ello al evitar la pérdida de resistencia al esfuerzo cortante de los suelos. Los subdrenes más comunes son: capas drenantes, drenes longitudinales de zanja, drenes de penetración transversal, pozos de alivio, trincheras estabilizadoras, galerías filtrantes, drenes en muros y en estribos de puentes.

El subtramo de la autopista en estudio, se desarrolla en terreno plano, con alineamiento horizontal y vertical prácticamente recto, en sección de terraplén; las obras que se tienen son de drenaje menor y de obras complementarias. En el subtramo se realizó una inspección de campo para identificar las obras de drenaje menor existentes, determinar sus características, estado físico y obtener información del funcionamiento hidráulico. Los estudios que se realizaron fueron:

**Estudio hidrológico.** Para la revisión de las alcantarillas en el estudio hidrológico, se consideró determinar el área de captación hasta el sitio de estudio, durante la visita de campo se ubicaron las obras de drenaje con cartas topográficas a escala: 1: 50 000, editadas por el INEGI, con las cuales se está en posibilidad de determinar las características fisiográficas y geomorfológicas de las cuencas que tengan incidencias en el subtramo, como son: área, longitud del cauce y pendiente. El drenaje corresponde generalmente a canales de riego y las obras de drenaje que se

tienen son alcantarillas de tubo de concreto reforzado, tubo de lámina corrugada de acero, losas de concreto armado y bóvedas.

Se identificaron los sitios de cruce de la autopista con escurrimientos naturales y artificiales y en gabinete se procedió a determinar las cuencas de aportación con las cartas topográficas. Debido a la magnitud de las cuencas, no se cuenta con estaciones hidrométricas sobre las corrientes que cruzan la vía y por consiguiente con registros de gastos, por lo que para hacer el estudio hidrológico se utilizó información pluviométrica y pluviográfica registrada en la zona de influencia del tramo y subtramo de la autopista.

Se determinó el gasto hidrológico utilizando el método empírico, con la fórmula racional

$Q = 0.278 CIA$  donde:

Q; gasto máximo de diseño,  $m^3/s$ .

C; coeficiente de escurrimiento, adimensional.

I; intensidad de la lluvia para una duración igual al tiempo de concentración, en mm/h.

A; área de la cuenca drenada,  $km^2$ .

0.278; factor de homogeneidad de unidades.

En la aplicación del método racional, se usaron valores obtenidos de los tiempos de concentración y de las intensidades de lluvia, el período de retorno elegido para la determinación de los gastos de diseño fue de 50 años, por tratarse de una autopista. Con el gasto de diseño se revisó la capacidad hidráulica de las alcantarillas existentes, tomando en cuenta las características geométricas, ubicación, orientación y condiciones hidráulicas de los cauces en la entrada y salida de las mismas. La revisión consistió en transitar el gasto de diseño por las obras de drenaje, para determinar si las alcantarillas son suficientes, requieren ampliación o construcción.

**Estudio hidráulico.** En la revisión de las alcantarillas desde el punto de vista hidráulico, se aplicó el método de Manning (sección y pendiente), en donde se hace transitar un gasto de diseño, velocidad y tirante, dependiendo de las condiciones de esviaje de la obra, características geométricas y estado físico de la misma.

La formula que se utilizó es:

$Q = V A$  y  $V = R^{2/3} S^{1/2} / n$  donde:

Q; gasto máximo de diseño,  $m^3/s$ .

V; velocidad media del flujo de agua, en m/s.

R; radio hidráulico, en m.

S; pendiente del cauce, en m/m.

N; coeficiente de rugosidad de Manning, adimensional.

De acuerdo con la inspección realizada en campo, se detectó que las obras presentan un funcionamiento deficiente, ya que en la mayoría se encuentran parcialmente azolvadas de sedimentos de suelo y vegetación, así como falta de canalización de los escurrimientos del agua en las salidas de los cuerpos, además se tienen obras de drenaje con diámetros de 0.75 y 0.80 m.

Se recomienda realizar un programa de mantenimiento de limpieza y desazolve de las obras, para prolongar su vida útil. En la tabla B.7 del anexo B, se presentan los resultados del estudio

hidrológico e hidráulico, ubicación de las alcantarillas y las recomendaciones que deben de hacerse para su mejor funcionamiento.

En la revisión de diseño de las obras, éstas resultaron suficientes y adecuadas desde el punto de vista hidráulico e hidrológico; sin embargo, se recomienda sustituir las alcantarillas que tienen diámetros menores de 0.80 m, por alcantarillas de 1.20 m de diámetro, con la finalidad de tomar en cuenta los azolves y facilidad de mantenimiento, ya que éstas tienen longitudes transversales del orden de 16 a 20 m por cuerpo. Información tomada de las referencias 3 y 15.

## 2.4 CONDICIONES AMBIENTALES

La autopista México- Querétaro y tramo km 90+000-148+000, es una de las vías más importantes del país y de los estados de México y Querétaro, el tramo inicia en el Estado de México y cruza varias poblaciones y municipios de los estados referidos; sus condiciones son:

### **Orografía.**

El Estado de México se localiza en las coordenadas geográficas al Norte  $20^{\circ} 17'$  y al Sur  $18^{\circ} 22'$  de latitud Norte; al Este  $98^{\circ} 36'$  y al Oeste  $100^{\circ} 37'$  de longitud Oeste. Colinda al Norte con Michoacán de Ocampo, Querétaro de Arteaga; al Este con Hidalgo, Tlaxcala, Puebla, Morelos y Guerrero y al Oeste con Guerrero y Michoacán de Ocampo; la superficie territorial es de  $22\,333\text{ km}^2$ , que representa el 1.1 % de la superficie total de la república mexicana.

Querétaro de Arteaga se encuentra en las coordenadas geográficas al Norte  $21^{\circ} 40'$  y al Sur  $20^{\circ} 01'$  de latitud Norte; al Este  $99^{\circ} 03'$  y al Oeste  $100^{\circ} 36'$  de longitud Oeste. Colinda al Norte con los estados de San Luis Potosí y Guanajuato, al Este con el de Hidalgo y San Luis Potosí, al Sur con los estados de Hidalgo, México y Michoacán de Ocampo y al Oeste con Guanajuato. Este estado es una de las entidades federativas del país con menor superficie y su densidad demográfica es el doble de la media nacional. Tiene una superficie territorial de  $12\,769\text{ km}^2$ , que representa el 0.6 % de la superficie total de la extensión del país.

### **Clima.**

En México el clima está determinado por varios factores, entre los que se encuentran: la altitud sobre el nivel del mar, la latitud geográfica, las diferentes condiciones atmosféricas y la distribución de tierra y agua, por lo que el país cuenta con una gran diversidad de climas, los cuales se clasifican, según su temperatura, en cálido y templado; de acuerdo con la humedad existente en el medio, en húmedo, subhúmedo y muy seco.

En el estado de México por su latitud se localiza en la zona intertropical; la altitud que predomina es mayor de 2 000 m, gran parte pertenece al Eje Neovolcánico, por su ubicación la temperatura debería ser alta, sin embargo, la altitud modifica esa consideración y contribuye a que prevalezcan temperaturas con valores medios anuales entre  $12^{\circ}$  y  $18^{\circ}\text{ C}$  y bajas de  $5$  a  $12^{\circ}\text{ C}$ .

En el estado de Querétaro las condiciones del terreno permiten que el clima sea variado, en el Norte el clima es templado subhúmedo con lluvias en verano C(w) y en la Sierra Madre es templado húmedo con abundantes lluvias en verano C(m). En la parte Central y Suroeste el clima predominante es semiseco templado BS<sub>1k</sub>. En la capital del estado la temperatura media anual es  $19^{\circ}\text{ C}$  y la precipitación anual media es de 549 mm.

El subtramo de la autopista presenta uniformidad en el clima, el cual es templado sub-húmedo con lluvias en verano de humedad media; tiene una altitud de 2000 a 2200 m. La precipitación anual media es de 600 mm y la temperatura media anual varía de 12<sup>o</sup> y 18<sup>o</sup> C.

### **Regiones fisiográficas.**

El Estado de México incluye en su territorio áreas pertenecientes a dos provincias fisiográficas: Eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur. La primera región comprende alrededor de tres cuartas partes de la entidad, cubriendo el Oriente, Centro, Norte y Oeste, la segunda en el Sur y Suroeste.

El Estado de Querétaro es montañoso en el que se distinguen dos sistemas: al Norte la Sierra Gorda y al Sur la Sierra Queretana. Los picos principales de la primera son: Puerta del Cielo, Pico del Carmen, Pinal del Zamorano y Peñal del Bernal. En la región de Cadereyta se tienen las montañas del Mineral del Doctor y de las Aguas. Cerca de San Juan del Río están el Mastranzo, la Sierra de la Llave, la Sierra Galindo y la Muralla. En el Sur cerca de Querétaro se tiene la Sierra de Santa Rosa, Saldarriaga, el Divisadero, el Cerro de las Campanas y el Cerro Cimatario. Los valles importantes son los de la ciudad de Querétaro y San Juan del Río.

### **Heladas.**

Las heladas ocurren cuando la temperatura es más baja en el día, por lo regular es al amanecer, la temperatura es igual o inferior a 0<sup>o</sup> C, ocasionando serios daños a la agricultura. Las primeras heladas en las montañas se registran generalmente después de la segunda quincena de octubre y con mayor frecuencia de diciembre a marzo. Las temperaturas gélidas del invierno son ocasionadas por una máxima inclinación de los rayos del sol, la altitud, la escasa humedad de la atmósfera y la invasión de masas de aire frío provenientes del Norte.

### **Vegetación.**

La vegetación en el tramo y subtramo es de una amplia diversidad florística, que se desarrolla en diversos ecosistemas, producto de la interacción de los diferentes factores climáticos, geológicos, fisiográficos y ecológicos. Esta variedad que se tiene es determinada por el gradiente de altitud que influye en la heterogeneidad en la región. La vegetación que se tiene es:

Oyamel. Son árboles altos del orden de 30 m o masas arboladas que están conformadas por elementos de la misma especie o mixtos, acompañados por diferentes especies de coníferas y latifoliadas; algunos bosques son densos, sobre todo en condiciones libres de disturbio, pero debido a la explotación y actividades del hombre, su área se encuentra en disminución, para dar lugar a espacios agrícolas y pecuarios.

Pino- encino. Es un tipo de árbol que se encuentra ampliamente distribuido en la entidad y es compartido por diferentes especies de pinos y encinos; dependiendo del dominio de unos a otros se denominan zonas de pino-encino, si predominan las coníferas y si predomina el encino la zona se llama encino-pino. La transición del encino, al pino, pasando por encino-pino y pino-encino, está determinada por el gradiente de altitud. En las partes bajas domina el encino y conforme se va ascendiendo aparecen algunos elementos de pino mezclados entre encinos, al aumentar la elevación los pinos empiezan a dominar sobre los encinos, en altitudes mayores de 2200 m los bosques son conformados por pinos.

Encino. Generalmente se encuentra en una transición entre los bosques de coníferas y las selvas, pueden alcanzar alturas de 4 a 30 m, los hay abiertos o muy densos; se desarrollan en diversas condiciones ecológicas desde el nivel del mar hasta los 3 000 m de altitud.

Pastizales. Es aquella vegetación denominada por gramíneas, son plantas llamadas pastos o zacates. El pastizal puede aparecer como consecuencia de desmontes de cualquier tipo de vegetación; también pueden estar en zonas agrícolas o bien en terrenos que se incendian con frecuencia, su distribución abarca las laderas y pendientes de los cerros. Información tomada de la referencia 3.

## 2.5 EFECTO DE LAS VARIABLES EN ALTERNATIVAS Y ESTRATEGIAS

En las alternativas viables de solución en el diseño de pavimentos flexibles, se toman en cuenta las variables de diseño y estrategias de construcción del referido pavimento, esto es con la finalidad de que su comportamiento mecánico de la estructura sea el de mayor confiabilidad y de que su vida útil sea la planeada. El efecto de las variables de diseño de mayor significación son: los materiales disponibles, estrategias de construcción y costos.

Materiales disponibles. Son los que se presentan en la capa de subrasante (estudios de bancos), en la que se debe conocer la calidad del material, como el valor relativo de soporte (VRS) crítico o de diseño, módulo de resiliencia ( $M_R$ ) y el módulo elástico (E), así como la sub-base y base hidráulica o estabilizada, carpeta de concreto asfáltico o carpeta de concreto asfáltico con polímeros.

Con lo que respecta al subtramo de la autopista y los resultados de laboratorio obtenidos en el estudio geotécnico (tabla B.1, B.3, B.5 y B.6), de las capas del terreno natural y subrasante existentes se determinó el VRS de diseño de los carriles de baja del cuerpo A y B, aplicando las expresiones siguientes:

$$\hat{VRS} = \overline{VRS}(1-0.84V) ; \overline{VRS} = \sum VRS/N ; S = \sqrt{\sum (VRS - \overline{VRS})^2/N} \text{ y } V = S/\overline{VRS} \text{ donde:}$$

$\hat{VRS}$ ; valor relativo de soporte crítico o de diseño

$\overline{VRS}$ ; valor relativo de soporte medio

S; desviación estándar

V; coeficiente de variación

N; número de muestras

Cuerpo B carril de baja (terreno natural)

VRS (%)	$\overline{(VRS - \overline{VRS})^2}$ (%)
11	0.49
10	0.09
11	0.49
5	28.09
9	1.69
6	18.49
20	94.09
11	0.49
14	13.69
6	18.49
$\Sigma$ 103	176.10

Sustituyendo valores en las expresiones anteriores, se tiene:

$$\overline{VRS} = 103/10 = 10.30\%, S = 176.10/10 = 4.20, V = 4.20/10.30 = 0.41 \text{ y}$$

$$\overline{VRS} = 10.30 (1 - 0.84 \times 0.41) = 6.80\%.$$

De la misma forma se obtiene el VRS de la capa subrasante, así como los valores de VRS del terreno natural y subrasante del cuerpo B, los cuales se presentan a continuación.

CAPA	CUERPO "A" CARRIL DE BAJA. VRS (%)	CUERPO "B" CARRIL DE BAJA. VRS (%)
Terreno natural	6.30	6.91
Subrasante	26.37	28.40

Además se indica la información de los módulos de elasticidad típicos de los materiales naturales y estabilizados, que puede tener la estructura del pavimento flexible y terracerías.

CAPA	Carpeta	Base hidráulica	Base estabilizada con cemento	Base negra	Sub-base hidráulica	Sub-base estabilizada con cemento	Subrasante e inferiores
MÓDULO ELÁSTICO (kg/cm <sup>2</sup> )	2 000 a 50 000	3 000 a 5 000	5 000 a 20 000	5 000 a 15 000	2 000 a 4 000	3 000 a 15 000	300 a 1 500

Los módulos elásticos obtenidos de la referencia número 3, en el subtramo de la autopista México-Querétaro del cuerpo A carril de baja son:

CAPA	Carpeta	Base hidráulica	Base estabilizada con cemento	Base negra	Sub-base hidráulica	Sub-base estabilizada con cemento	Subrasante e inferiores
MÓDULO ELÁSTICO (kg/cm <sup>2</sup> )	24 557	3 467	8 104	-	2 877	5 059	987

Cuerpo B carril de baja es:

CAPA	Carpeta	Base hidráulica	Base estabilizada con cemento	Base negra	Sub-base hidráulica	Sub-base estabilizada con cemento	Subrasante e inferiores
MÓDULO ELÁSTICO (kg/cm <sup>2</sup> )	29 768	2 964	13 194	-	2 115	-	880

Los módulos de resiliencia, son obtenidos directamente por pruebas de laboratorio o estimados con expresiones en donde se tienen los valores relativos de soporte críticos esperados, resistencia del concreto a la compresión simple de suelos estabilizados con cemento Pórtland o cal y los módulos elásticos de la carpeta asfáltica. Los valores del módulo de resiliencia de los materiales aumentan en forma considerable, si éstos son estabilizados con materiales de mayor calidad y los porcentajes del material estabilizante en la mezcla, son los óptimos en su diseño.

Las estrategias de construcción toman en cuenta el índice de servicio en su nivel de rechazo y los lapsos de tiempo en los que se planea la construcción de sobre carpeta, en su vida útil de proyecto de la obra, partiendo de su construcción en su diseño inicial. En el subtramo de la autopista en cuestión, se realizará en un lapso de tiempo con una vida útil de proyecto de 20 años; En la figura 2.1 y 2.3 se muestra el comportamiento esperado y el análisis de estrategias.

Los costos. La variación de costos con el comportamiento de los pavimentos, considera un costo total, que incluye: el costo de la inversión inicial, de conservación y de operación en su vida útil de proyecto, cuidando que el nivel de rechazo de servicio no sea inferior al permitido o planeado. Está variable es probablemente la de mayor impacto y significación en la selección y alternativas para construir tramos de autopistas o caminos, pero en todo estudio y proyecto es recomendable hacer un análisis en forma integral con todas las variables de diseño de un pavimento flexible por construir o rehabilitar; en la figura 2.2 y 2.3 se muestran las variaciones de costos contra lapsos de tiempo en la vida útil de un camino.

**AUTOPISTA: MÉXICO-QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN – PALMILLAS, KM 90+000 – 148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN – PALMILLAS, KM 133+000 – 148+000**

## **F I G U R A S**

AUTOPISTA: MÉXICO-QUERÉTARO  
TRAMO: TEPOZOTLÁN – PALMILLAS, KM 90+000 – 148+000  
SUBTRAMO: POLOTITLÁN – PALMILLAS, KM 133+000 – 148+000

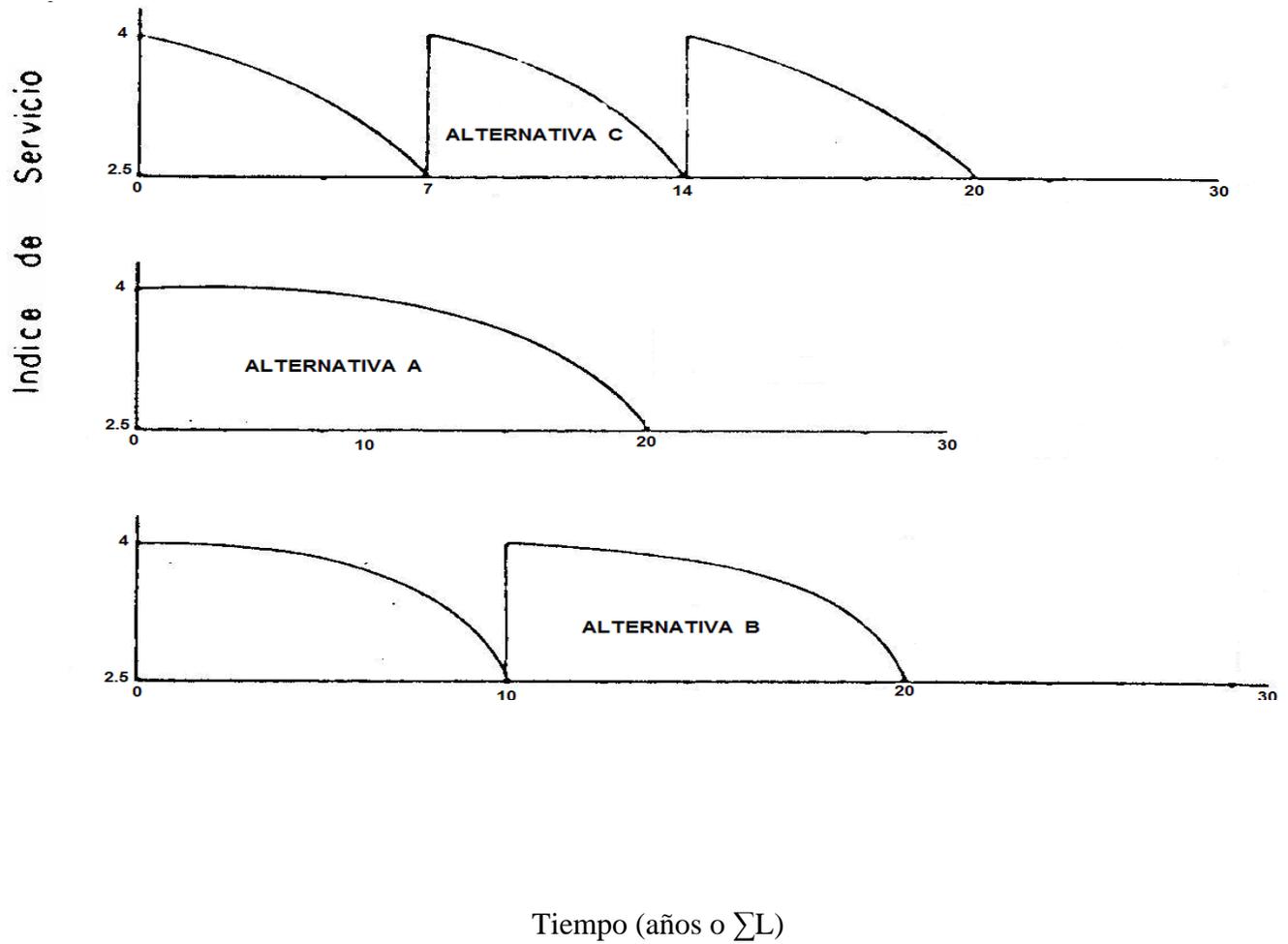


Figura 2.1 Comportamiento esperado de alternativas de diseño (Referencia 13)

AUTOPISTA: MÉXICO-QUERÉTARO  
TRAMO: TEPOZOTLÁN – PALMILLAS, KM 90+000 – 148+000  
SUBTRAMO: POLOTITLÁN – PALMILLAS, KM 133+000 – 148+000

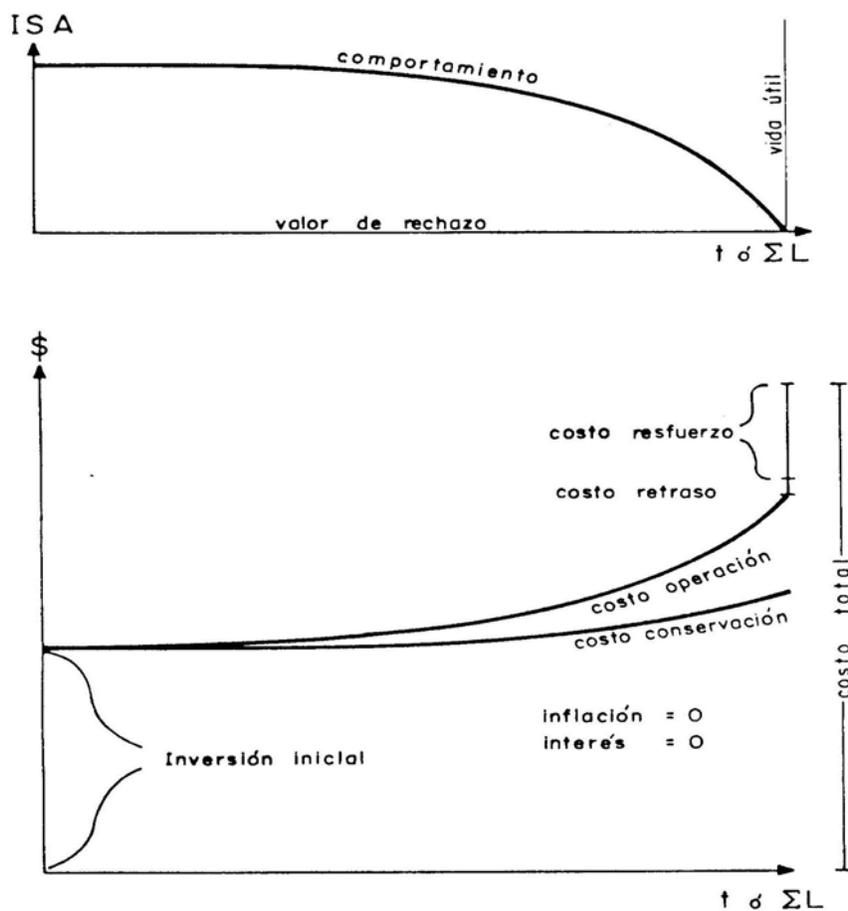


Figura 2.2 Variación de costos con el comportamiento del pavimento  
(Referencia 13)

**AUTOPISTA: MÉXICO-QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN – PALMILLAS, KM 90+000 – 148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN – PALMILLAS, KM 133+000 – 148+000**

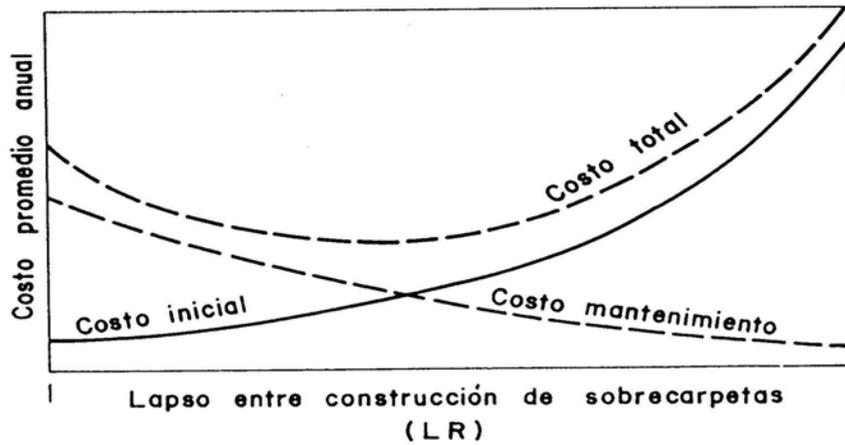
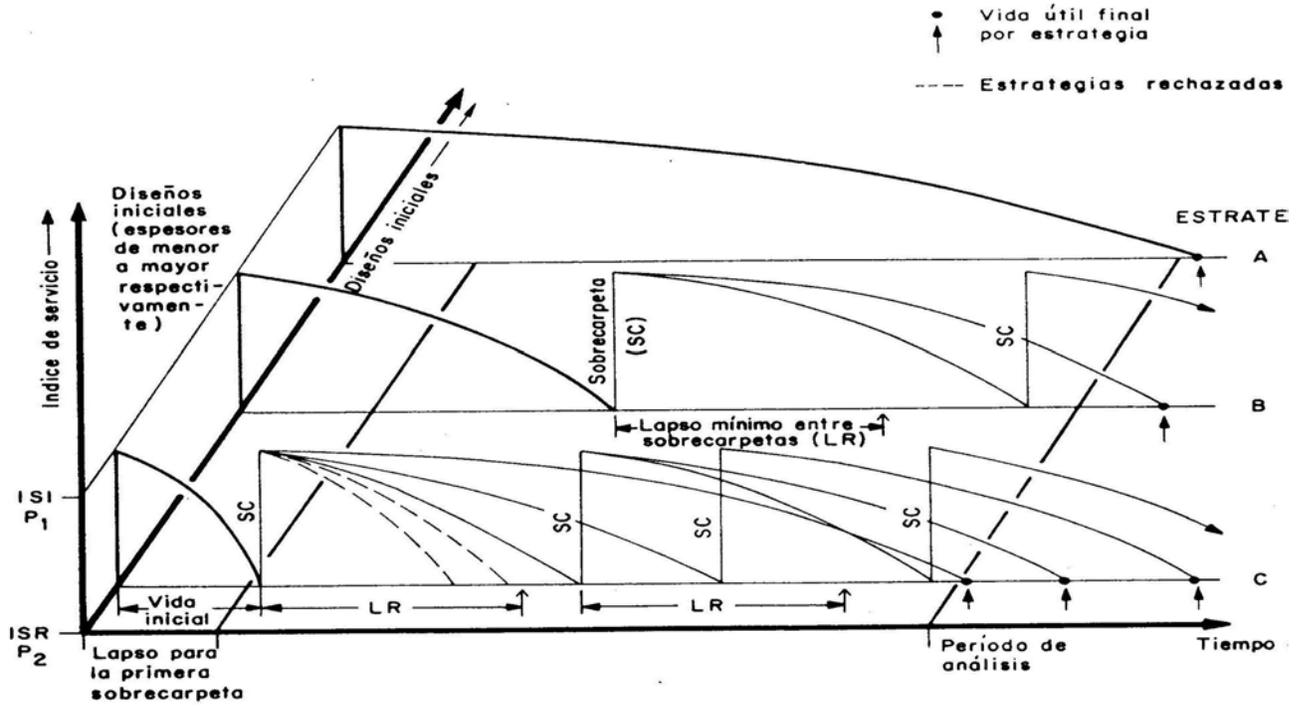


Figura 2.3 Análisis de estrategias (Referencia 13)

## **CAPÍTULO 3**

# **NORMATIVIDAD SCT DE LA CALIDAD DE LOS MATERIALES Y PRUEBAS DE LABORATORIO**

En toda construcción, rehabilitación y conservación de una obra vial, es necesario contar con una norma que regule los requisitos de calidad que deben tener los materiales al ser empleados en un estudio y proyecto, así como valores mínimos o máximos de las características de las pruebas de laboratorio, con la finalidad de que las obras tengan la vida útil de proyecto de acuerdo a su diseño.

Con fundamento en el artículo 11 de la Ley de Secretarías y Departamentos de Estado y en el artículo 9<sup>o</sup> fracción VIII de esa misma Ley, en marzo de 1957 entra en vigor el documento llamado “Especificaciones Generales de Construcción”, por el organismo de la Dirección General de Proyectos y Laboratorios de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas, en ediciones publicadas en los periodos de 1957 a 1980; en éstas normas y con respecto a carreteras, se reconoce en 1961 que las fallas de la estructura del pavimento que se han presentado en algunos tramos carreteros del país, es atribuible a la insuficiencia del espesor del pavimento, debido al crecimiento vehicular, tanto en número como en magnitud de cargas; en el año de 1965 con base en la observación y comportamiento de la red carretera conduce a darle una mayor importancia a la capa de subrasante, la cual requiere la necesidad de seleccionar los materiales que deben de constituirla y contar con un espesor mínimo, esto se plasmó en la primera edición de la parte octava del libro de las Normas de Construcción de SCT de 1981; en los años de 1973 a 1975, se actualizan los métodos de compactación en su procedimiento de ejecución, dando mayor energía de compactación por medio de pruebas de impacto.

En el período de 1981 a 1983, edita la Secretaría de Comunicaciones y Transportes las “Normas de Construcción de SCT” y de 1984 a 1999 las normas son denominadas “Normas de Construcción e Instalaciones”, en este lapso de tiempo, en las normas se realizan ajustes en los valores de las características de los materiales, de tal forma de que éstos tengan mayor calidad y se eliminan algunas pruebas de laboratorio, ya que no son acordes de acuerdo con el equipo de construcción que se utilizan.

A partir de los años 2000 y 2004 se presenta la Normativa para la Infraestructura del Transporte (Normativa SCT), la normativa modifica y actualiza en forma periódica los temas referentes a: Carreteras (CAR), Aeropuertos (AER), Ferrocarriles (FER), Puertos (PUE) y Edificaciones Diversas (EDV).

La normativa SCT, es el conjunto de criterios, métodos y procedimientos para la correcta ejecución de los trabajos que realiza la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, para la infraestructura del transporte. Los objetivos referentes al tema de la infraestructura carretera (CAR) son:

1. Uniformizar el estilo y calidad de las obras públicas, estableciendo los criterios y procedimientos para la planeación, ejecución, licitación, adjudicación, contratación, supervisión, operación e impacto ambiental.
2. Establecer los criterios y procedimientos para la concesión en la infraestructura para el transporte.
3. Normar las relaciones de la SCT con las personas físicas y/o morales que contraten la ejecución de las obras públicas y los servicios relacionados con ellas.
4. Orientar en la selección y aplicación de los criterios, métodos y procedimientos más convenientes para la realización de los estudios y proyectos para la ejecución, supervisión, aseguramiento de calidad, operación e impacto ambiental de la infraestructura carretera durante su construcción, rehabilitación y conservación.

La normatividad SCT se presenta en tres publicaciones denominadas: Normas (N), Manuales (M) y Prácticas Recomendables (R). Las normas proponen valores específicos para su diseño, como: características y calidad de los materiales, equipos de instalación permanentes, tolerancias en los acabados, métodos generales de ejecución, medición y base de pago de los diversos conceptos de obra; los manuales presentan los métodos y procedimientos para la realización de todas las actividades relacionadas con la infraestructura del transporte; las prácticas recomendables proponen y explican los criterios y la aplicabilidad de teorías a casos específicos. Los temas son identificados por doce libros mediante las siguientes claves:

<b>LIBROS</b>	<b>CLAVE</b>
INTRODUCCIÓN	INT
LEGISLACIÓN	LEG
PANEACIÓN	PLN
DERECHO DE VÍA Y ZONAS ALEDAÑAS	DRV
PROYECTO	PRY
CONSTRUCCIÓN	CTR
CONSERVACIÓN	CSV
OPERACIÓN	OPR
CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE CALIDAD	CAL
CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES	CMT
CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS Y SISTEMAS DE INSTALACIÓN PERMANENTE	EIP
MÉTODOS DE MUESTREO Y PRUEBAS DE MATERIALES	MMP

Para la identificación de cada fascículo publicado, se designa de la forma siguiente: N.CMT.CAR.4.02.001/04, en donde (N) corresponde a la norma, (CMT) del libro características de los materiales, parte 4 materiales para pavimento, título 02 materiales para sub-bases y bases, capítulo 001 materiales para sub-bases y publicado 2004.

### **3.1 TERRACERÍAS**

Las terracerías son las capas que constituyen el terraplén, subyacente y subrasante, construidas de materiales de suelo y fragmentos de roca, producto de cortes o de la extracción de bancos que nos permite apoyar el desplante de la estructura del pavimento.

## Requisitos de calidad

Los materiales que se utilizan para la formación de las capas de terracerías del terraplén, subyacente y subrasante, cumplirán con los requisitos de calidad y pruebas de laboratorio de los materiales que se presentan en la tabla 3.1; los materiales que no se pueden utilizar son los altamente orgánicos como la turba (Pt), ni materiales productos de despalmes. La capa subyacente es función de la intensidad del tránsito esperado en términos del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas, acumulados durante la vida útil del proyecto ( $\sum L$ ), cumplirán como se indica a continuación:

1. Cuando la intensidad del tránsito ( $\sum L$ ) es menor de diez mil (10 000) ejes equivalentes, no se requiere la capa subyacente.
2. Cuando la intensidad del tránsito ( $\sum L$ ) es de diez mil (10 000) a (1) millón de ejes equivalentes, se requiere capa subyacente y tendrá un espesor mínimo de 30 cm.
3. Cuando la intensidad del tránsito ( $\sum L$ ) es de un (1) millón a diez (10) millones de ejes equivalentes, la capa subyacente tendrá un espesor de 70 cm mínimo.
4. Cuando la intensidad de tránsito ( $\sum L$ ) es mayor de (10) millones de ejes equivalentes, la capa subyacente será motivo de diseño especial.
5. Si la capa subyacente se desplanta directamente sobre el terreno de cimentación y su espesor es menor de 30 ó 70 cm, y cuando los requisitos del material no cumplan con las normas, se excavará una caja hasta la profundidad necesaria para completar el espesor mínimo.

La capa subrasante en función de la intensidad de tránsito acumulado ( $\sum L$ ) cumplirá con lo siguiente:

1. Cuando la intensidad del tránsito ( $\sum L$ ) es igual a (1) millón de ejes equivalentes o menor, se requiere de la capa subrasante y tendrá un espesor de 20 cm mínimo.
2. Cuando la intensidad del tránsito ( $\sum L$ ) es de (1) millón a (10) millones de ejes equivalentes, la capa de subrasante tendrá un espesor de 30 cm mínimo.
3. Cuando la intensidad de tránsito ( $\sum L$ ) sea mayor de (10) millones de ejes equivalentes, la capa de subrasante será motivo de diseño especial.
4. Si la capa de subrasante se desplanta directamente sobre el terreno de cimentación y su espesor es menor de 20 ó 30 cm y cuando los requisitos del material no cumplan con las normas, se excavará una caja hasta la profundidad necesaria para completar el espesor mínimo.

Además los materiales que sean utilizados en las capas antes mencionadas, cumplirán con los requisitos de transporte y almacenamiento de materiales, así como los criterios para aceptación o rechazo de la normatividad SCT.

En el subtramo km 133+000 al 148+000 de la autopista México-Querétaro, al aplicar la normativa actual en la verificación y evaluación de las propiedades de los materiales existentes de las capas del terraplén, subyacente y subrasante del cuerpo A y B, carriles de baja y central; los resultados se presentan en la tablas C.1 y C.2 del anexo C el aseguramiento de la calidad de los materiales, para ello se utilizaron las siguientes expresiones:

$$\overline{VRS} = \sum VRS/N \text{ y } S = \sqrt{\sum (VRS - \overline{VRS})^2 / N} \text{ donde:}$$

$\overline{VRS}$ ; valor relativo de soporte medio.

S; desviación estándar

N; número de eventos

La información de los ensayos de laboratorio fueron tomados de las tablas B.1, B.2, B.3 y B.4 del capítulo 2 de este trabajo. Además se consideró de acuerdo a cálculos preliminares la intensidad de tránsito acumulado ( $\Sigma L$ ) es mayor de  $10^6$  ejes equivalentes, el cual se ratifica en el siguiente capítulo.

De acuerdo con los resultados y la verificación de la capa de subrasante y subyacente, éstas no cumplen con los requisitos de calidad con respecto al grado de compactación y espesores mínimos respectivamente; la capa de terraplén cumple con los requisitos de calidad y su espesor varía de 20 a 155 cm., por tanto para fines de diseño, se adapta y se propone la siguiente estructura de las terracerías, las cuales son las más críticas. Para la obtención del valor relativo de soporte crítico o de diseño se utilizó la expresión:

$$VRS^{\wedge} = VRS - (1-0.85 V)$$

#### Cuerpo A carril de baja.

CAPA	ESPESOR (cm)	$\wedge$ VRS (%)	OBSERVACIONES
Subrasante.	30	26	Se requiere compactar al $100\pm 2$
Subyacente	30	24	Se requiere compactar al $95\pm 2$
Terraplén	Variable	16	

#### Cuerpo B carril de baja

CAPA	ESPESOR (cm)	$\wedge$ VRS (%)	OBSERVACIONES
Subrasante.	30	28	Se requiere compactar al $100\pm 2$
Subyacente	30	17	Se requiere compactar al $95\pm 2$
Terraplén	Variable	14	

### 3.2 ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

La estructura del pavimento son las capas que constituyen la sub-base, base hidráulica o bases tratadas y carpeta asfáltica; estas capas son construidas con productos de materiales cribados, parcialmente triturados y/o totalmente triturados, así como productos asfálticos que nos permite soportar las cargas vehiculares, absorber los esfuerzos y proporcionar una superficie de rodamiento adecuada, con la finalidad de dar un servicio confortable.

## Requisitos de calidad

Los materiales que se utilizan para la formación de las capas de sub-base y base hidráulica, cumplirán con los requisitos de calidad y pruebas de laboratorio de los materiales que se presentan en la tabla 3.2; las capas de los materiales son función de la intensidad de tránsito esperado en términos del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas, acumulados durante la vida útil del proyecto ( $\Sigma L$ ), cumplirán como se indica a continuación.

### Capa de sub-base

1. El material tendrá las características granulométricas que se muestran en la figura 3.1 y valores siguientes.

Malla		Porcentaje que pasa	
Abertura mm	Designación	$\Sigma L \leq 10^6$	$\Sigma L > 10^6$
50	2"	100	100
37.5	1 ½"	72-100	72-100
25	1"	58-100	58-100
19	¾"	52-100	52-100
9.5	3/8"	40-100	40-100
4.75	Nº 4	30-100	30-80
2	Nº 10	21-100	21-60
0.85	Nº 20	13-92	13-45
0.425	Nº 40	8-75	8-33
0.25	Nº 60	5-60	5-26
0.15	Nº 100	3-45	3-20
0.075	Nº 200	0-25	0-15

2. La curva granulométrica del material por emplear determinada mediante el procedimiento contenido en el manual M.MMP.4.01.003; la curva granulométrica de la figura 3.1, no debe tener cambios bruscos de pendiente; la relación entre el porcentaje en la masa que pase la malla número 200 al que pase la malla número 40, no será mayor de 0.65.

3. Si la granulometría del material obtenido de un banco, una vez sujeto al tratamiento mecánico no cumple con los requisitos de calidad de esta norma, se podrá mezclar con materiales de otros bancos, en la proporción para que se cumpla con los requisitos referidos.

### Capa de base hidráulica

1. El producto del material de base hidráulica es función de lo siguiente.

( $\Sigma L$ )	Trituración de la roca sana (%)
$> 10^6$	100
$< 10^6 > 10^6$	75
$< 10^6$	50

2. El material tendrá las características granulométricas que se muestran en la figura 3.2 y los valores siguientes.

Malla		Porcentaje que pasa	
Abertura mm	Designación	$\sum L \leq 10^6$	$\sum L > 10^6$
37.5	1 ½"	100	100
25	1"	70-100	70-100
19	¾"	60-100	60-86
9.5	3/8"	40-100	40-65
4.75	Nº 4	30-80	30-50
2	Nº 10	21-60	21-36
0.85	Nº 20	13-44	13-25
0.425	Nº 40	8-31	8-17
0.25	Nº 60	5-23	5-12
0.15	Nº 100	3-17	3-9
0.075	Nº 200	0-10	0-5

3. Cuando sobre la base hidráulica que se construya y se coloque solamente un tratamiento asfáltico superficial, el material para la base tendrá las características granulométricas que se muestran en la figura 3.3 y los valores siguientes.

Malla		Porcentaje que pasa	
Abertura mm	Designación	$\sum L \leq 10^6$	$\sum L > 10^6$
37.5	1 ½"	100	100
25	1"	100	70-100
19	¾"	60-100	60-85
9.5	3/8"	40-83	40-65
4.75	Nº 4	30-67	30-50
2	Nº 10	21-50	21-36
0.85	Nº 20	13-37	13-25
0.425	Nº 40	8-28	8-17
0.25	Nº 60	5-22	5-12
0.15	Nº 100	3-17	3-9
0.075	Nº 200	0-10	0-5

4. La curva granulométrica del material por emplear determinada mediante el procedimiento contenido en el manual M.MMP.4.01.003; la curva granulométrica de la figura 3.2 y 3.3, no debe tener cambios bruscos de pendiente; la relación entre el porcentaje en la masa que pase la malla número 200 al que pase la malla número 40, no será mayor de 0.65.

5. Si la granulometría del material obtenido de un banco, una vez sujeto al tratamiento mecánico no cumple con los requisitos de calidad de esta norma, se podrá mezclar con materiales de otros bancos, en la proporción para que se cumpla con los requisitos referidos.

El material por utilizar en las capas de sub-base y base hidráulica, cumplirá con los requisitos de almacenamiento, criterios para aceptación y rechazo de esta normativa.

Aplicando la normativa SCT, en la verificación y evaluación de las propiedades de los materiales existentes de la capa de base hidráulica del cuerpo A y B, carril de baja y central; los resultados se presentan en las tablas C.3 y C.4 del anexo C el aseguramiento de la calidad de los materiales, en donde se utilizaron las expresiones de valor relativo de soporte medio y la desviación estándar.

De acuerdo con los resultados y la verificación, la capa de sub-base y base hidráulica no cumplen con los requisitos de calidad. Comparando las características y resultados de las pruebas de laboratorio de la base hidráulica con la especificación de la SCT de una sub-base, como se indica a continuación.

Cuerpo A Normativa SCT, N.CMT.4.02.001/04

Carril de baja		Carril central	Especificación SCT
Características	% de muestras que no cumplen especificación	% de muestras que no cumplen especificación	$\sum L > 10^6$
LL; %	100	100	25
IP; %	100	100	6
VRS; %	0	0	60
EA; %	66	100	40
Compactación; %	100	100	100

Cuerpo B Normativa SCT, N.CMT.4.02.001/04

Carril de baja		Carril central	Especificación SCT
Características	% de muestras que no cumplen especificación	% de muestras que no cumplen especificación	$\sum L > 10^6$
LL; %	69	100	25
IP; %	69	100	6
VRS; %	0	0	60
EA; %	100	100	40
Compactación; %	100	100	100

En la normativa SCT, N.CMT.4.02.001/04 de sub-base, la base hidráulica no cumple con los requisitos de calidad en los materiales como sub-base, esto se debe a que los suelos son gravas y arenas arcillosas que constituyen las capas de sub-base y base hidráulica, presentando alto porcentaje de suelo fino plástico y aunado a la baja compactación de las capas. En el cuerpo A y B carril de baja, se tiene una sub-base estabilizada con el 6% de cemento Pórtland, con el que fue construida; el espesor promedio es de 17 y 16 cm respectivamente.

Con base a lo anterior, en el tramo y subtramo de la autopista se recomienda lo siguiente:

1. Abrir caja con una profundidad suficiente de acuerdo al diseño estructural del pavimento, que incluya recuperar el material de la base hidráulica y carpeta asfáltica.

2. Utilizar el material recuperado de la base hidráulica y agregar material de banco, producto de cribado o trituración parcial en proporción adecuada, que cumpla los requisitos de calidad de la normativa SCT para una base.
3. El material recuperado de la carpeta asfáltica retirarlo; el material recuperado de la base se puede agregar material de banco producto de trituración total de roca sana y estabilizarlo con cemento Pórtland o asfalto, en proporción adecuada de acuerdo a diseño de mezcla, para ser utilizado como base estabilizada y que cumpla la normatividad SCT.

### Requisitos de calidad de la base estabilizada

La base estabilizada (base tratada), son materiales granulares que no cumplen con algunos de los requisitos de calidad establecidos en la norma N.CMT.4.02.002, materiales para bases hidráulicas o que por razones estructurales requiere la incorporación de un producto que modifica alguna de sus características físicas, generalmente haciéndolos más rígidos y resistentes, mejorando su comportamiento mecánico e hidráulico; estos materiales, según el producto que se utilice en su tratamiento son:

Producto	% en masa	Observaciones
Cal	3 a 4	Materiales modificados; modifica la plasticidad y reduce el efecto de la materia orgánica en los suelos
Cemento Pórtland	3 a 4	Material modificado; modifica la plasticidad e incrementa la resistencia
Cemento Pórtland	8 a 10	Material estabilizado; incrementa la resistencia ( $\geq 25$ kg/cm <sup>2</sup> ), rigidez y reduce el efecto de fatiga sobre la carpeta asfáltica
Asfalto (emulsión o asfalto rebajado)	3 a 4	Material estabilizado; mejora el comportamiento mecánico y el efecto de la plasticidad
Asfalto (cemento asfáltico)	4 a 5	Base negra; mejora el comportamiento mecánico y se incorpora cemento asfáltico en caliente o en frío

### Requisitos de calidad

Los materiales modificados o estabilizados provenientes de un banco y que se utilizan para la formación de sub-bases y base hidráulica, en la tabla 3.3 y 3.4 se indica el producto, la norma de aplicación, la característica de los materiales y el capítulo del libro, donde los materiales deben de cumplir con los requisitos de calidad.

### Carpeta asfáltica

Es la capa constituida de mezcla asfáltica de producto obtenido de la incorporación y distribución uniforme de un material asfáltico en uno pétreo. Los tipos de carpetas asfálticas se clasifican en:

- ◆ Tratamientos superficiales. En estos tratamientos se utiliza material pétreo denominado 3A, 3B y 3E, así como emulsión asfáltica y mediante un procedimiento constructivo adecuado, se aplica sobre una base hidráulica debidamente conformada, compactada impregnada y seca.

- ◆ Mezcla en el lugar. Ésta se lleva a cabo en el lugar, ya sea en una plataforma acondicionada o en un tramo de un carril del camino y mediante un procedimiento constructivo adecuado, se mezcla material pétreo y emulsión asfáltica por medio del uso de motoconformadoras o mezcladora ambulante y se aplica sobre una base hidráulica debidamente preparada.
- ◆ Mezcla en planta. La mezcla de material pétreo y emulsión asfáltica se dosifica por volumen en planta en la que generalmente se calienta el material pétreo y la emulsión; posteriormente mediante un procedimiento constructivo adecuado, se aplica sobre la base hidráulica debidamente preparada.
- ◆ Concreto asfáltico. La mezcla de material pétreo y cemento asfáltico se hace por peso en las plantas estacionarias, calentando la mezcla a las temperaturas de 133 a 177 °C y mediante un procedimiento constructivo adecuado, se aplica sobre una base hidráulica o estabilizada debidamente preparada. La mezcla asfáltica que se puede obtener depende de la granulometría del material pétreo y ésta debe ser de: granulometría abierta, semiabierta y abierta.

Generalmente las carreteras primarias y autopistas, se construyen con carpetas de concreto asfáltico y además carpetas porosas delgadas (con asfalto modificado).

Los requisitos de calidad que debe de cumplir la capa asfáltica es en: materiales asfálticos, pétreos y mezcla asfáltica.

### **Material asfáltico.**

El asfalto es un material bituminoso de color, negro, constituido principalmente por asfáltenos, resinas y aceites, elementos que proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad; es sólido o semisólido y tiene propiedades cementantes a temperaturas ambientales normales.

Los materiales asfálticos se emplean en la elaboración de carpetas, morteros, riegos y estabilizaciones, ya sea para aglutinar los materiales pétreos utilizados para ligar o unir diferentes capas del pavimento, o bien para estabilizar bases y subbases.

Cementos asfálticos. Los cementos asfálticos son asfaltos obtenidos del proceso de destilación del petróleo para eliminar solventes volátiles y parte de sus aceites. Su viscosidad varía con la temperatura y entre sus componentes, las resinas le producen adherencia con los materiales pétreos, siendo excelentes ligantes, pues al ser calentados se licúan, lo que les permite cubrir totalmente las partículas del material pétreo.

Emulsiones asfálticas. Las emulsiones asfálticas son los materiales asfálticos líquidos estables, constituidos por dos fases, la fase continua de la emulsión está formada por agua y la fase discontinua por pequeños glóbulos de cemento asfáltico.

Asfaltos rebajados. Los asfaltos rebajados se utilizan para la elaboración de carpetas de mezcla en frío, así como en impregnaciones de subbases y bases hidráulicas; son los materiales asfálticos líquidos compuestos por cemento asfáltico y un solvente, clasificados según su velocidad de fraguado.

En las tablas 1 a 4 de la norma N.CMT.4.05.001/00 se presenta la clasificación de los materiales asfálticos, cementos asfálticos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados. Referencia número 18.

Material pétreo. Son los materiales seleccionados o sujetos a tratamientos de disgregación, cribado, trituración o lavado y que aglutinados con material asfáltico se emplean en la elaboración de mezclas asfálticas.

En la tabla 3.5 y 3.6 se señalan los requisitos de las pruebas de laboratorio para carpeta de mezcla asfáltica se muestra el producto, la norma SCT por aplicar y las características del material, considerando los tipos de carpetas y la intensidad de tránsito ( $\Sigma L$ ). En las tablas 3 a 6, 10 y 11 de la norma N.CTM.4.04/01, tablas 5 a 9 de la norma N.CMT.4.05.001/00 y tablas 1y 2 de la norma N.CMT.4.05.003/02, se presentan los requisitos de calidad de los materiales. Referencia número 18.

Material asfáltico modificado. Cuando en una obra vial el comportamiento mecánico presenta problemas debido al material asfáltico por envejecimiento y oxidación, la capacidad para soportar altas y bajas temperaturas y alto índice de tránsito en el cual las cargas son transmitidas al pavimento y éstas son detectadas de la forma siguiente:

- ◆ Deformación permanente que refleja la aparición de roderas, en la que el asfalto no es capaz de soportar las cargas, debido a las altas temperaturas del pavimento.
- ◆ Fatiga. Esto se debe primordialmente al número de repeticiones de las cargas y a la intensidad de éstas y normalmente se reflejan en la aparición de grietas en formación de tipo piel de cocodrilo.
- ◆ Grieta por baja temperatura que se ocasiona cuando el asfalto para la capa rígida y no es capaz de soportar movimientos ocasionados por las capas inferiores del pavimento “fragilidad” y se traduce en grietas gruesas en forma de cuadrícula.
- ◆ Envejecimiento y oxidación. El asfalto es susceptible de ser atacado por los agentes atmosféricos, sobre todo en la película delgada que envuelve al material pétreo, debido al ataque del oxígeno provocando el envejecimiento que se traduce en rigidez, desgranamiento o la aparición de calaveras o baches cuando ya es más intenso.

Para prevenir los problemas anteriores le sugiere:

- ◆ Deformación permanente. En ocasiones es factible reducir el fenómeno de roderas por alta temperatura, utilizando un asfalto de alta viscosidad que sea capaz de soportar la temperatura del pavimento siempre y cuando a este asfalto se le verifique que no requiera que trabaje a bajas temperaturas que no las soporte el de más alta viscosidad, en caso contrario será necesario modificar el asfalto con un polímero de tipo SBS o un asfáltico natural tipo gilsonita.
- ◆ Fatiga. Esto se puede deber a la falta de espesor de la carpeta o de las capas inferiores del pavimento, la mala distribución de los módulos dinámicos en las capas del pavimento o también en que la mezcla asfáltica no sea capaz de absorber los esfuerzos que le

trasmitten esas capas y en este caso, deberá modificarse el asfalto para tener una mejor trabajabilidad con un polímero de tipo EVA, SBS o SBR, así como un modificador catalítico, pero deberá revisarse de acuerdo a estudios realizados.

- ◆ Grieta por baja temperatura. Cuando se tengan problemas de altas temperaturas en verano y bajas temperaturas en invierno se recomienda el uso de polímeros de tipo SBS o SB.
- ◆ El fenómeno de envejecimiento por oxidación debido a la lluvia, frío, calor, aire, etc., se debe a la presencia de película delgada en el pétreo y que los asfaltos pierden cierto tipo de aceites que dan cambios en la composición del asfalto, lo que redundaría en mayor rigidez por envejecimiento, los polímeros del tipo SBS al formar cadenas dan mayor película de asfalto y retardan el envejecimiento, incrementando su vida útil de 40 a un 80%.
- ◆ Reflejo de grietas de las capas inferiores. Los tratamientos superficiales a base de riegos o de carpetas delgadas de graduación media o abierta con asfalto modificado con hule molido de neumáticos de 15 a 20% pueden ser adecuados.

Por definición, los materiales asfálticos modificados son el producto de la disolución o incorporación en el asfalto de un polímero o de hule molido de neumáticos, que son sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperatura que se le añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades físicas y reológicas y así disminuir su susceptibilidad a la temperatura y a la humedad, así como a la oxidación. Los modificadores producen una actividad superficial iónica, que incrementa la adherencia en la interfase entre el material pétreo y el material asfáltico, conservándola aun en presencia del agua. También aumentan la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos, por lo tanto a la fatiga y reducen el agrietamiento, así como la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de temperatura. Los principales modificadores utilizados en los materiales asfálticos son:

### **Polímero tipo I**

Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas tanto a altas como a bajas temperaturas. Es fabricado con base en bloques de estireno, en polímeros elastoméricos radiales de tipo bibloque o tribloque, mediante configuraciones como estireno-butadieno-estireno (SBS) o estireno-butadieno (SB), entre otras. Se utiliza en mezclas asfálticas para carpetas delgadas y carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito y de vehículos pesados, en climas fríos y cálidos, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales

### **Polímero tipo II**

Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas a bajas temperaturas. Es fabricado con base en polímeros elastoméricos lineales mediante una configuración de caucho de estireno, butadieno-látex. Se utiliza en todo tipo de mezclas asfálticas para pavimentos en los que se requiera mejorar su comportamiento de servicio, en climas fríos y templados, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

### **Polímero tipo III**

Es un modificador de asfaltos que mejora la resistencia al ahuellamiento de las mezclas asfálticas, disminuye la susceptibilidad del cemento asfáltico a la temperatura y mejora su comportamiento a altas temperaturas. Es fabricado con base a un polímero de tipo plastómero, mediante configuraciones como etil-vinil-acetato (EVA) o polietileno de alta o baja densidad (HDPE, LDPE), entre otras. Se utiliza en climas calientes, en mezclas asfálticas para carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

### **Hule molido de neumáticos**

Es un modificador de asfaltos que mejora la flexibilidad y resistencia a la tensión de las mezclas asfálticas reduciendo la aparición de grietas por fatigas o por cambios de temperatura es fabricado con base en el producto de la molienda de neumáticos. Se utiliza en carpetas delgadas de granulometría abierta y tratamientos superficiales.

En las tablas 1 a 4 de la norma CMT.4.05.002/01, se presentan los requisitos de calidad del cemento asfáltico AC-5 y AC-20 modificado, granulometría para hule molido y emulsión asfáltica modificada. Referencia número 18.

### **Pruebas de laboratorio**

En toda obra vial es necesario obtener las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas, para ello se realizan pruebas de laboratorio con la finalidad de conocer en forma cualitativa y cuantitativa los valores de las características de los materiales que conforman las capas de un pavimento y terracerías. Los valores de los ensayos realizados, nos permiten cuantificar la calidad de los materiales para su control y verificación de la calidad de la obra, asimismo, utilizar los valores en los estudios de diseño estructural de pavimentos. En la tabla 3.7 se muestra la caracterización de los materiales en las estructuras viales, donde se presentan los ensayos típicos, métodos de prueba y la norma SCT y en la tabla 3.8 se muestran los parámetros de resistencia y deformación para el diseño estructural de pavimentos flexibles.

**AUTOPISTA: MÉXICO-QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN – PALMILLAS, KM 90+000 – 148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN – PALMILLAS, KM 133+000 – 148+000**

## **T A B L A S**

**Y**

## **F I G U R A S**

AUTOPISTA: MÉXICO QUERÉTARO  
 TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000148+000  
 SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 33+000-148+000

**TABLA 3.1. REQUISITOS DE CALIDAD Y PRUEBAS DE LABORATORIO DE LOS MATERIALES DE LAS CAPAS DE TERRACERÍAS**

Características	Valor	Designación	
		Norma	Manual
<b>Terraplén</b>			
Límite líquido; %, máximo	50	N. CMT. 1. 01/02	M. MMP. 1.07
Valor Soporte de California (CBR); % mínimo	5	N. CMT. 1. 01/02	M. MMP. 1.11
Expansión; %, máximo	5	N. CMT. 1. 01/02	M. MMP. 1.11
Grado de compactación; %	90±2	N. CMT. 1. 01/02	M. MMP. 1.10
<b>Subyacente</b>			
Tamaño máximo y granulometría	Compactable	N. CMT. 1. 02/02	M. MMP. 1.02
Límite líquido ; % , máximo	50	N. CMT. 1. 02/02	M. MMP. 1.07
Valor soporte de California (CBR) %, mínimo	10	N. CMT. 1. 02/02	M. MMP. 1.11
Expansión; %, máximo	3	N. CMT. 1. 02/02	M. MMP. 1.11
Grado de compactación; %	95±2	N. CMT. 1. 02/02	M. MMP. 1.10
<b>Subrasante</b>			
Tamaño máximo ; mm	76	N. CMT. 1. 03/02	M. MMP. 1.02
Límite líquido ; % , máximo	40	N. CMT. 1. 03/02	M. MMP. 1.07
Índice plástico; %, máximo	12	N. CMT. 1. 03/02	M. MMP. 1.07
Valor Soporte de California (CBR); % mínimo	20	N. CMT. 1. 03/02	M. MMP. 1.11
Expansión ; %	2	N. CMT. 1. 03/02	M. MMP. 1.11
Grado de compactación; %	100±2	N. CMT. 1. 03/02	M. MMP. 1.10

AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO  
 TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000  
 SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000

**TABLA 3.2 REQUISITOS DE CALIDAD Y PRUEBAS DE LABORATORIO DE LOS MATERIALES DE LAS CAPAS DE ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO.**

Características	Valor		Designación	
	$\sum L \leq 106$	$\sum L > 106$	Norma	Manual
<b>Sub-base</b>				
Límite líquido; % máximo	30	25	N. C. MT. 4. 02. 001/04	M. MMP. 4. 01. 006
Índice plástico; % máximo	10	6	N. C. MT. 4. 02. 001/04	M. MMP. 4. 01. 006
Valor soporte de California (CBR); % mínimo	50	60	N. C. MT. 4. 02. 001/04	M. MMP. 4. 01. 007
Equivalente de Arena; % mínimo	30	40	N. C. MT. 4. 02. 001/04	M. MMP. 4. 01. 008
Desgaste los Ángeles; % máximo	50	40	N. C. MT. 4. 02. 001/04	M. MMP. 4. 01. 009
Grado de compactación; % mínimo	100	100	N. C. MT. 4. 02. 001/04	M. MMP. 4. 01. 0011
<b>Base hidráulica</b>				
Límite líquido; % máximo	25	25	N. C. MT. 4. 02. 002/04	M. MMP. 4. 01. 006
Índice plástico; % máximo	6	6	N. C. MT. 4. 02. 002/04	M. MMP. 4. 01. 006
Valor soporte de California (CBR); % mínimo	40	50	N. C. MT. 4. 02. 002/04	M. MMP. 4. 01. 007
Equivalente de Arena; % mínimo	80	100	N. C. MT. 4. 02. 002/04	M. MMP. 4. 01. 008
Desgaste los Ángeles; % máximo	35	30	N. C. MT. 4. 02. 002/04	M. MMP. 4. 01. 009
Grado de compactación; % mínimo	100	100	N. C. MT. 4. 02. 002/04	M. MMP. 4. 01. 0011
Partículas alargadas y lajeadas; % máximo	40	35	N. C. MT. 4. 02. 002/04	M. MMP. 4. 01. 0016

**AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

**TABLA 3.3 REQUISITOS DE CALIDAD**

**MATERIALES MODIFICADOS CON CAL, CON CEMENTO O ESTABILIZADOS CON CEMENTO, PROVENIENTES DE UN BANCO**

<b>Producto</b>	<b>Norma SCT</b>	<b>Características de los materiales y capítulo del libro</b>
Cal o cemento Pórtland (tipo CPO)	N.CMT.4.03.001	Cal para Estabilización de Suelos Calidad del Cemento Pórtland
Material por modificar	N.CMT.4.02.002 M. MMP.4.01.012	Granulometría; Materiales para Bases Hidráulicas Procedimiento de prueba; Contenido de Materia Orgánica
Material modificado	N.CMT.4.02.002	Características y valores; Materiales para Bases Hidráulicas
Material estabilizado por cemento Pórtland	M.MMP.2.02.058 M.MMP.4.01.010	Resistencia; Resistencia a la Compresión Simple Aashto modificada; Compactación Aashto
Material modificado o estabilizado	M.MMP.4.01.010	Grado de compactación; Compactación Aashto

**MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO PROVENIENTES DE UN BANCO**

<b>Producto</b>	<b>Norma SCT</b>	<b>Características de los materiales y capítulo del libro</b>
Asfalto (según tipo)	N.CMT-405.001	Características físicas y químicas; Calidad de Materiales Asfálticos
Material por estabilizar	N.CMT.4.02.002 M. MMP.4.04.009 M.MMP.4.04.010	Granulometría; Materiales para Bases Hidráulicas Desprendimiento por fricción y cubrimiento con asfalto; Desprendimiento por Fricción de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas y Cubrimiento del Asfalto
Para estabilizar los materiales no plásticos	M.MMP.4.01.014	Contenido de asfalto; Determinación del contenido de Asfalto para Estabilizar Suelos Finos no Plásticos
Para estabilizar los materiales plásticos	N.CMT.4.02.002 M.MMP.4.01.015	Límite líquido y equivalente de arena; Materiales para Bases Hidráulicas Estabilidad, expansión y absorción; Determinación del contenido de Asfalto para Estabilizar Suelos Finos Plásticos
Material estabilizado	M.MMP.4.01.010	Grado de compactación; compactación Aashto

AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO  
 TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000  
 SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000

**TABLA 3.4 REQUISITOS DE CALIDAD**

**MATERIALES PARA BASE DE MEZCLA ASFÁLTICA (BASE NEGRA) PROVENIENTES DE UN BANCO**

<b>Producto</b>	<b>Norma SCT</b>	<b>Características de los materiales y capítulo del libro</b>
Asfalto (según tipo)	N.CMT.4.05.001	Características físicas y químicas; Calidad de los Materiales Asfálticos
Material pétreo	N.CMT.4.02.003	Granulometría, límite líquido, índice plástico, contenido de agua, equivalente de arena, partículas alargadas y lajeadas, desgaste de los ángeles y perdida de estabilidad; Material para Bases Tratadas. Las características están en función de la intensidad de tránsito ( $\Sigma L$ )
Mezcla asfáltica	M.MMP.4.05.034	Diseño de mezcla (compactación, estabilidad, flujo y vacíos en la mezcla asfáltica); Método Marshall para Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa; el diseño está en función de la intensidad de tránsito ( $\Sigma L$ )
Mezcla asfáltica elaborada con cemento asfáltico en caliente	M.MMP.4.05.004 M.MMP.4.02.003	Viscosidad; Viscosidad Saybolt-Furol en Materiales Asfálticos. Temperatura; Materiales para Bases Tratadas
Mezcla asfáltica elaborada con emulsión asfáltica o asfalto rebajado	N.CMT.4.02.003	Temperatura; Materiales para Bases Tratadas
Bases asfálticas compactadas	M.MMP.4.05.038 M.MMP.4.05.039 M.MMP.4.05.040	Contenido de cemento, agua y disolvente; Contenido de Cemento Asfáltico, Agua y Disolvente en Mezclas Asfálticas
Bases de mezcla asfáltica	N.CMT.4.02.003 M.MMP.4.05.034	Espesor; Materiales para Bases Tratadas Diseño de mezcla asfáltica y compactación; Método Marshall para Mezcla Asfáltica de Granulometría Densa Temperatura; Materiales para Bases Tratadas

AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO  
 TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000  
 SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000

**TABLA 3.5 REQUISITOS DE CALIDAD**

<b>Producto</b>	<b>Norma SCT</b>	<b>Características de los materiales y tablas</b>
Material pétreo para carpeta asfáltica de granulometría densa	N.CMT.4.04/01	Para $\sum L > 10^6$ Granulometría, densidad relativa, desgaste de los Ángeles, partículas alargadas, partículas lajeadas, equivalente de arena y pérdida de estabilidad; tabla 3 y 4 de la norma.
Material pétreo para carpeta asfáltica de granulometría semiabierta	N.CMT.4.04/01	Granulometría, para mezcla con cemento asfáltico y con cemento asfáltico y hule molido, densidad relativa, desgaste de los Ángeles, partículas alargadas, partículas lajeadas, equivalente de arena y pérdida de estabilidad; tabla 5 y 6 de la norma.
Material pétreo para carpeta por el sistema de riesgos	N.CMT.4.04/01	Granulometría, desgaste de los Ángeles, partículas alargadas, partículas lajeadas, intemperismo acelerado, desprendimiento por fricción y cubrimiento con asfalto; tabla 10 y 11 de la norma.
Cemento asfáltico	N.CMT.4.05.001/00	Viscosidad, penetración, punto de inflación, solubilidad, punto de reblandecimiento, perdida por calentamiento, ductibilidad y penetración retenida; tabla 5 de la norma.
Emulsiones asfáltico aniónica y catiónicas	N.CMT.4.05.001/00	Contenido de cemento asfáltico, viscosidad, asentamiento retenido en malla N° 20, pasa malla N° 20 y retiene malla N° 60, cubrimiento del agregado, miscibilidad con cemento Pórtland, carga eléctrica de las partículas, demulsibilidad, penetración, solubilidad y ductibilidad; tabla 6 y 7 de la norma.
Asfaltos rebajados	N.CMT.4.05.001/00	Punto de inflamación, viscosidad, contenido de solvente, contenido de cemento asfáltico, destilación a 360 °C, contenido de agua por destilación, penetración, ductibilidad y solubilidad; tabla 8 de la norma.
Aceptación o rechazo en la revisión durante la ejecución de la obra	N.CMT.4.05.001/00	Viscosidad, punto de inflamación, contenido de cemento asfáltico, cubrimiento del agregado, carga eléctrica de la partícula, contenido de solvente, perdida por calentamiento, ductibilidad y penetración; tabla 9 de la norma.

**AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

**TABLA 3.6 REQUISITOS DE CALIDAD**

<b>Producto</b>	<b>Norma SCT</b>	<b>Características de los materiales y tablas</b>
Mezcla asfáltica en caliente	N.CMT.4.05.003/02	Diseño de la mezcla mediante del método marshall; compactación, estabilidad, flujo, vacíos en la mezcla asfáltica y vacíos ocupados por el asfalto. Diseño de la mezcla mediante método Hveen; granulometría, valor de estabilidad y expansión; tabla 1 y 2 de la norma
Mezcla asfáltica en frío	N.CMT.4.05.003/02	- Diseño de la mezcla mediante del método marshall; compactación, estabilidad, flujo, vacíos en la mezcla asfáltica y vacíos ocupados por el asfalto - Diseño de la mezcla mediante método Hveen; granulometría, valor de estabilidad y expansión tabla; 1 y 2 de la norma
<p>En las mezclas asfálticas, los materiales pétreos y los materiales asfálticos que se utilicen en la elaboración de mezclas asfálticas, cumplirán con lo establecido en la normas N.CMT. 4.04, Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, N.CMT.4.05.001, Calidad de los Materiales Asfálticos y N.CMT.4.05.002, Calidad de Materiales Asfálticos Modificados.</p> <p>Las mezclas asfálticas en caliente, diseñadas de acuerdo con los procedimientos descritos en los Manuales M.MMP.4.05.031, Método Marshall para Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa, M.MMP.4.05.032, Método Hveem para Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa M.MMP.4.05.033, Método Cántabro para Mezcla Asfálticas de Granulometría Abierta y M.MMP.4.05.034.</p> <p>Las mezclas asfálticas en frío, diseñadas de acuerdo con los procedimientos descritos en los manuales M.MMP.4.05.031, Método Marshall para Mezclas Asfálticas de Granulometría Densas, M.MMP.4.05.032, Método Hveem para Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa o M:MMP.4.05.034</p>		

**AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

**TABLA 3.7 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES EN LAS ESTRUCTURAS VIALES**

Propiedades	Ensayes típicos	Métodos de prueba	Norma SCT	Terreno de cimentación	Terracerías y subrasante	Sub-base y base	Carpeta Asfáltica
Clasificación	Clasificación de suelos	SUCS	M. MMP.1.07	XXXXXXXX	XXXXXXXX	XXXXXX	XXXXXX
	Clasificación de rocas	Análisis petrográfico	M. MMP.1.02	XXXXXXXX	XXXXXXXX	XXXXXX	XXXXXX
	Contenido de agua (w)	Por secado al horno	M. MMP.104	XXXXXXXX	XXXXXXXX	XXXXXX	
		Aparato nuclear			XXXXXXXX	XXXXXX	
	Peso volumétrico "in situ"(δd)	Muestra inalterada	*	XXXXXXXX	XXXXXXXX		XXXXXX
		Cono de arena	*	XXXXXXXX	XXXXXXXX	XXXXXX	
		Volúmetro de membrana		XXXXXXXX	XXXXXXXX	XXXXXX	
	Peso volumétrico seco suelto (δds)	En suelos y gravas	*		XXXXXXXX	XXXXXX	XXXXXX
	Peso volumétrico seco suelto(δds)	En arenas	*		XXXXXXXX	XXXXXX	XXXXXX
	Límites de consistencia	Líquido (LL) y plástico (LP)	M. MMP.1.07	XXXXXXXX	XXXXXXXX	XXXXXX	
Granulometría (G,S,F)	Mallas e hidrómetro		XXXXXXXX	XXXXXXXX	XXXXXX	XXXXXX	
	Finos por lavado	*	XXXXXXXX	XXXXXXXX	XXXXXX		
Forma y textura de partículas	Índice de forma	M. MMP.4.01.016			XXXXXX	XXXXXX	
(δ dmax) (Wop) compactación	Por impactos (Proctor)	AASHTO estándar	M. MMP.1.09	XXXXXXXX	XXXXXXXX		
		AASHTO modificada	M. MMP.4.1.010	XXXXXXXX	XXXXXXXX	XXXXXX	
		En suelos estabilizados			XXXXXXXX	XXXXXX	
	Por presión estática (porter)	Porter estándar SCT	*			XXXXXX	
	Por amasado en suelos (Hveem)	California (301)	*		XXXXXXXX	XXXXXX	
	Por vibración	Mesa vibratoria		XXXXXXXX	XXXXXXXX	XXXXXX	
	Por impactos en mezcla asfáltica	Marshall	M. MMP.4.05.031				XXXXXX
Por amasado en mezcla asfáltica	California (304)	M. MMP.4.01.011				XXXXXX	
<b>RESISTENCIA</b>							
Esfuerzo cortante	Compresión sin confinar	En suelos		XXXXXXXX	XXXXXXXX		
		En suelos estabilizados			XXXXXXXX	XXXXXX	
	Compresión simple repetitiva	Módulo dinámico (E)					XXXXXX
		Compresión triaxial	No consolidad no drenada		XXXXXXXX	XXXXXXXX	
		Consolidad no drenada		XXXXXXXX			
		Consolidada drenada		XXXXXXXX			
	Compresión triaxial repetitiva	Módulo de resiliencia (MR)			XXXXXXXX	XXXXXX	XXXXXX
	Valor relativo de soporte	En muestra inalterada		XXXXXXXX	XXXXXXXX		
		"in situ"		XXXXXXXX	XXXXXXXX	XXXXXX	
	Estabilidad y presión de exudación	Cuerpo de Ingenieros	M. MMP.1.11		XXXXXXXX	XXXXXX	
California, Cal 301 (R, Pexud)		*		XXXXXXXX	XXXXXX		
Estabilidad en mezcla asfáltica	California, Cal 304 (S)	*				XXXXXX	
Tensión	Tensión en compresión diametral	Marshall	M. MMP.4.05.031				XXXXXX
		Tensión indirecta (E <sub>R</sub> )					XXXXXX
	Tensión por flexión	Cohesiómetro (Cal 304)				XXXXXX	XXXXXX
		En suelos estabilizados			XXXXXXXX	XXXXXX	
		Resistencia a la tensión					
Tensión por flexión repetitiva	Módulo de resiliencia (Es)					XXXXXX	

<b>DEFORMABILIDAD</b>		Métodos de prueba	Norma SCT	Terreno de cimentación	terraceras y subrasante	sub-base y base	Carpeta Asfáltica	
Compresibilidad	Consolidación unidimensional	Odómetro		XXXXXXXX				
Expansibilidad	Contenido de agua (w)	Por secado al horno	M. MMP.1.02	XXXXXXXX	XXXXXXXX	XXXXXX		
	Límites de consistencia	Líquido (L L) y plástico (LP)	M. MMP.1.07	XXXXXXXX	XXXXXXXX	XXXXXX		
	Contracción volumétrica	Límite de contracción (LC)	M. MMP.1.07	XXXXXXXX	XXXXXXXX			
	Peso volumétrico "in situ"	Muestra inalterada	*		XXXXXXXX	XXXXXXXX		
		Cono de arena	*		XXXXXXXX	XXXXXXXX	XXXXXX	
		Volúmetro de membrana			XXXXXXXX	XXXXXXXX	XXXXXX	
	Potencial de expansión	Índice de expansión			XXXXXXXX	XXXXXXXX		
	Valor relativo de soporte (C B R)	Saturación estándar	M.MMP.4.01.007			XXXXXXXX	XXXXXX	
		Muestra inalterada			XXXXXXXX	XXXXXXXX		
	Presión de expansión (Pexp)	California, (Cal 301)	*			XXXXXXXX	XXXXXX	
	Saturación bajo presión	Odómetro			XXXXXXXX	XXXXXXXX		
Expansión unidimensional	Odómetro			XXXXXXXX	XXXXXXXX			
<b>DEFORMABILIDAD</b>								
Plástica	Límites de consistencia	Líquido (L L) y plástico (LP)	M. MMP.1.07	XXXXXXXX	XXXXXXXX	XXXXXX		
	Contracción volumétrica	Límite de contracción	M. MMP.1.07	XXXXXXXX	XXXXXXXX	XXXXXX		
	Equivalente de arena (EA)	Equivalente de arena	M. MMP.4.01.008			XXXXXX	XXXXXX	
	Estabilidad en suelos (R)	California, (Cal 301)	*		XXXXXXXX	XXXXXX		
	Estabilidad en mezcla Asfáltica	California, ( Cal 304)	*		XXXXXXXX	XXXXXX	XXXXXX	
	Flujo plástico	Marshall	M.MMP.4.05.031			XXXXXX	XXXXXX	
	Compresión triaxial	No consolidada no drenada			XXXXXXXX	XXXXXXXX		
Consolidada no drenada				XXXXXXXX				
Consolidada drenada				XXXXXXXX				
Elástica	Módulo de resiliencia ( E <sub>R</sub> )	Tensión indirecta				XXXXXX	XXXXXX	
		Compresión triaxial repetitiva			XXXXXXXX	XXXXXX	XXXXXX	
Permeabilidad	Granulometría	Mallas e hidrómetro (G,S,F)	M.MMP.4.01.003	XXXXXXXX	XXXXXXXX	XXXXXX	XXXXXX	
	Perméametros	De carga constante		XXXXXXXX	XXXXXXXX			
		De carga variante			XXXXXXXX	XXXXXXXX	XXXXXX	XXXXXX
Durabilidad	Densidad y absorción	Agregado grueso	M. MMP.4.04.003				XXXXXX	
		Agregado fino	M. MMP.4.04.003				XXXXXX	
	Sanidad	Intemperismo acelerado	M. MMP.4.04.008			XXXXXX	XXXXXX	
	Abrasión o desgaste	Los Ángeles	M. MMP.4.04.006			XXXXXX	XXXXXX	
	Durabilidad	Índice de Durabilidad				XXXXXX		
	Desgaste en suelos estabilizados	Humedecimiento y secados	M. MMP.4.04.006			XXXXXX		
	Forma de partículas	Índice de forma	M. MMP.4.04.005				XXXXXX	XXXXXX
Índice de lajeo		M. MMP.4.04.005					XXXXXX	

\* Los ensayos típicos y métodos de prueba se encuentran en proceso y/o revisión para ser incluidos en la norma SCT.

**AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

**TABLA 3.8 PARÁMETROS DE RESISTENCIA-DEFORMACIÓN PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES**

Parámetro	Método de prueba	Norma SCT	Símbolo	Unidad
Valor relativo de soporte	“in situ”		CBR	%
Valor Relativo de Soporte y expansión unidimensional restringida	En muestra inalterada	*	CBR	%
Valor Relativo de Soporte y expansión unidimensional restringida	Cuerpo de Ingenieros	M. MMP. 1.11	exp	%
			CBR	%
Presión de exudación Presión de expansión Estabilidad	California, Cal 301	*	exp	%
			P <sub>exud</sub>	kg/cm <sup>2</sup>
Módulo de ruptura	En suelos estabilizados	*	P <sub>exud</sub>	kg/cm <sup>2</sup>
			R	
			R	kg/cm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidad dinámico	Compresión triaxial cíclica		M <sub>R</sub>	kg/cm <sup>2</sup>
Tensión de compresión diametral	Marshall	M.MMP.4.05.03 1	Estabilidad	kg
Estabilidad y expansión en mezcla asfáltica	California, Cal 304	*	S	
Módulo de resiliencia	Tensión indirecta repetitiva		exp	mm
			E <sub>R</sub>	kg/cm <sup>2</sup>
			E <sub>S</sub>	kg/cm <sup>2</sup>
	Tensión por flexión repetitiva			

\* Los parámetros y métodos de pruebas se encuentran en proceso y/o revisión para ser incluidas en la norma SCT.

AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO  
TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000  
SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000

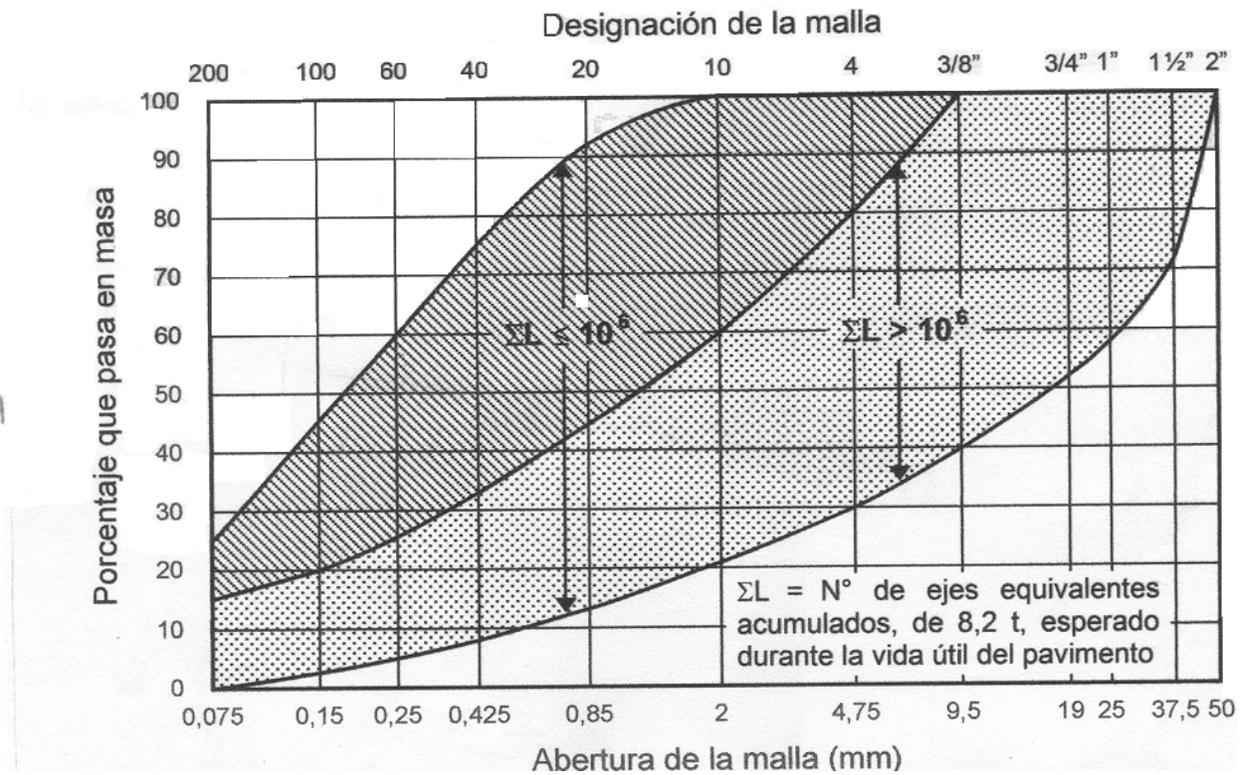
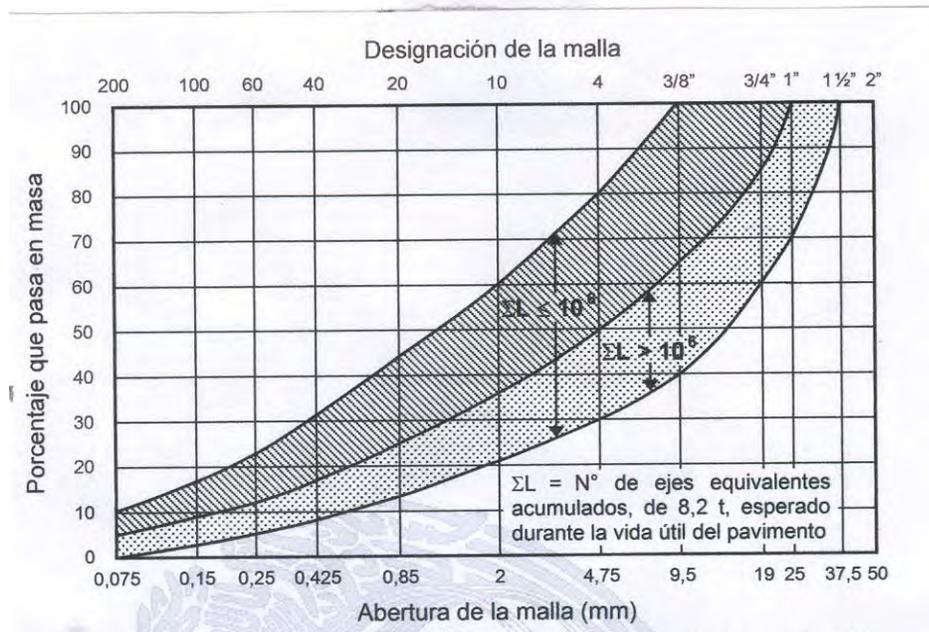


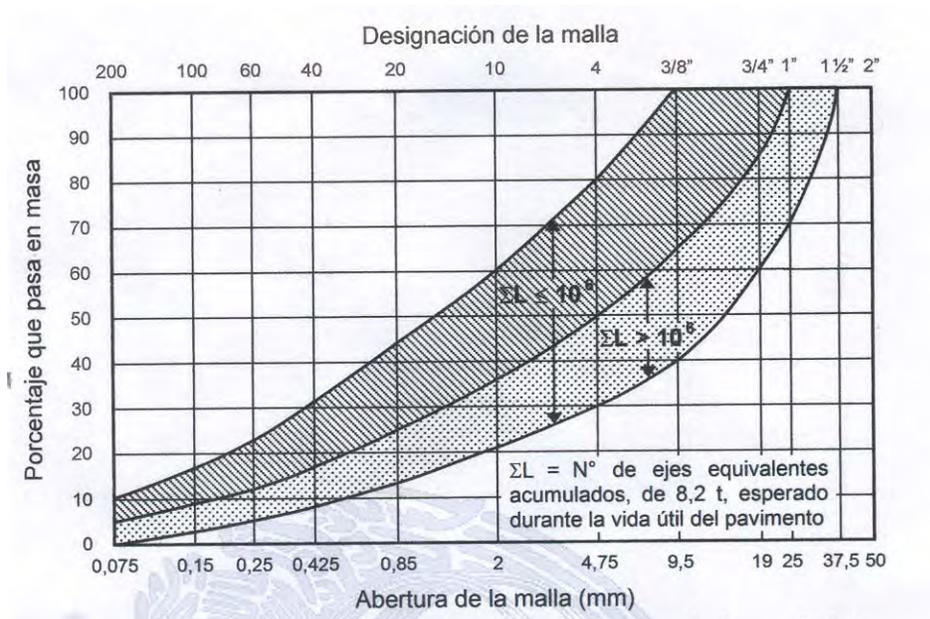
Figura 3.1 Zonas granulométricas recomendables de los materiales para sub-bases (Referencia 18)

AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO  
TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000  
SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000



**Figura 3.2 Zonas granulométricas recomendadas de los materiales para base de pavimentos con carpetas de mezcla asfáltica de granulométrica densa.**  
(Referencia 18)

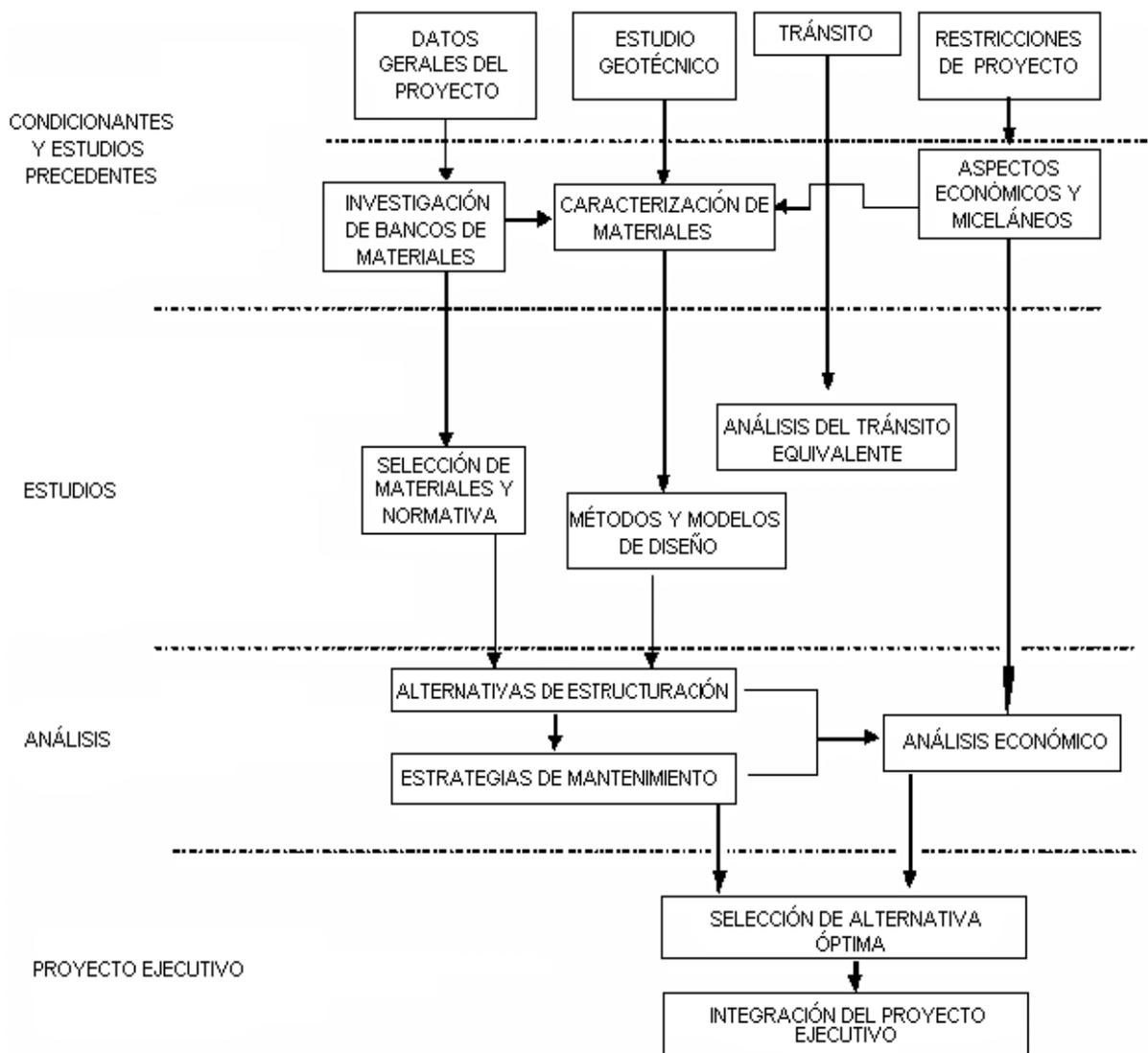
AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO  
TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000  
SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000



**Figura 3.3 Zonas granulométricas recomendadas de los materiales para bases de pavimentos asfálticos y de concreto hidráulico. (Referencia 18)**

## CAPÍTULO 4 APLICACIÓN DEL DISEÑO ESTRUCTURAL EN PAVIMENTO FLEXIBLE EN EL SUBTRAMO CARRETERO

En este capítulo se aplican las metodologías de diseño de pavimentos flexibles basados en la experimentación en laboratorio y de campo, modelos teóricos y de secciones de pavimentos por catálogo. En los métodos de diseño se hace una descripción de los mismos, se dan los procedimientos para diseño, así como su aplicación en el subtramo carretero de la autopista México-Querétaro, tomando en cuenta los estudios realizados, variables de diseño, materiales naturales o estabilizados y la normatividad SCT 2004. En el siguiente esquema se presenta el proceso de aplicación de diseño estructural de pavimentos en carreteras (referencia 13).



## 4.1 MÉTODOS EXPERIMENTALES

### 4.1.1 Instituto de Ingeniería UNAM. DISPAV-5 versión 2

El método de diseño para pavimentos fue desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, partió del análisis de datos experimentales en tramos de prueba en carreteras en operación, investigación teórica y de experimentación en laboratorio en la pista circular de prueba. El producto de trabajo de años del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se ha dado conocer en unos informes de publicaciones recientes: serie 444 de noviembre de 1981, serie 598 de diciembre de 1999 y CI-8 de septiembre de 1999.

La serie CI-8, presenta el diseño estructural de pavimentos Asfálticos, incluyendo carreteras de altas especificaciones, DISPAV-5 versión 2. El método toma en cuenta la información experimental de carreteras de altas especificaciones y la información de fatiga de mezcla asfáltica.

El método de diseño utiliza un programa interactivo de cómputo, empleando secciones estructurales hasta 5 capas e incorpora el cálculo por deformación permanente, en el modelo elasto-plástico desarrollado en la serie 325 del Instituto de Ingeniería, como el cálculo por fatiga empleando los modelos elásticos de varias capas.

El DISPAV-5, es un programa que permite calcular carreteras secundarias, primarias y de altas especificaciones. Su fundamento es teórico-experimental, y para su aplicación se emplean conceptos y métodos de cálculo mecanicistas. El método considera las deformaciones permanentes acumuladas y agrietamiento a fatiga en las capas ligadas con asfalto; además previene en la estructura del pavimento la deformación excesiva en las capas no estabilizadas con asfalto. La capa de mezcla asfáltica debe de ser estudiada con un proporcionamiento en forma adecuada, para que las deformaciones de la capa asfáltica sean relativamente pequeñas.

Al aplicar el método de diseño estructural, debe tenerse suficiente información de los insumos requeridos, ya que la confiabilidad de los resultados del cálculo depende de los datos empleados que deben ser representativos.

El programa DISPAV-5, permite dos procedimientos de cálculo que son: para diseño estructural del pavimento y revisión de la estructura del pavimento existente, el cálculo presenta las siguientes opciones:

1. Diseño de un pavimento, a partir de un tránsito de proyecto y de características mecánicas de materiales conocidos, para llegar a la determinación de los espesores de capa requeridos para el tránsito de proyecto.
2. Determinación de la vida previsible por deformación permanente y por agrietamiento, debido a fatiga del sistema de capa analizado.

Para el sub-tramo km 133+000-148+000 de la autopista México-Querétaro, se utilizará el procedimiento de diseño estructural del pavimento y revisión de la estructura actual del mismo, los cuales se presentan a continuación.

## PROCEDIMIENTO PARA DISEÑO ESTRUCTURAL

### Entrada de datos del proyecto

El programa requiere la alimentación de información referente al tipo de carretera, tránsito de proyecto, materiales a emplear y nivel de confianza. A continuación se detalla esta información.

1. Tipo de carretera. Se presentan dos modelos de diseño:

- ◆ Diseño de carreteras de altas especificaciones en las cuales se requiere conservar un nivel de servicio alto de la superficie de rodamiento, durante la vida de servicio. Al término de la vida de proyecto la deformación esperada con este modelo de diseño es del orden de  $\Delta_{20} = 1.2$  cm (percentil 80 de la deformación máxima) con agrietamiento ligero o medio.
- ◆ Diseño en carreteras normales (secundarias y primarias), en donde la deformación permanente esperada al término de la vida de proyecto, es de  $\Delta_{20} = 2.5$  cm, con agrietamiento medio o fuerte. En este tipo de diseño se debe hacer mantenimiento rutinario frecuente.

En el caso de los caminos de altas especificaciones, es necesario elegir materiales de construcción de muy buena calidad; emplear un diseño correcto en las mezclas asfálticas, considerando la posibilidad de realizar pruebas de comportamiento de las mismas, para tener una mayor confiabilidad en el proyecto; así como aplicar un control de calidad riguroso durante el proceso constructivo.

2. Tránsito de proyecto

El método requiere dos tránsitos de proyecto: tránsito equivalente para el diseño por fatiga de capas ligadas (daño superficial), y tránsito equivalente para el diseño por deformación permanente acumulada (daño profundo). En la experimentación se toman en cuenta las cargas reales. Sin embargo, en el proceso de análisis se acostumbra utilizar el “tránsito equivalente”, usualmente a ejes sencillo con llantas gemelas y peso estándar de 8.2 t, el cual produce el mismo daño que el “tránsito mezclado” que se presenta en la realidad.

En carreteras de dos carriles, el tránsito del carril del proyecto se considera como la mitad del total que soportará la carretera. En carreteras con más de dos carriles, debe estimarse la proporción de vehículos que soportará el carril de proyecto; si no se cuenta con información, pueden estimarse las siguientes distribuciones del tránsito total para dicho carril de proyecto como se presenta a continuación.

Número de carriles en ambas direcciones	Coefficiente de distribución en el carril de proyecto, en por ciento
2	50
4	40-50
6 o más	30-40

Para anotar los insumos correspondientes al tránsito equivalente en el carril de proyecto, que deberá soportar la carretera durante su vida útil, se dispone de dos alternativas:

- ◆ Si se conocen los tránsitos equivalentes de 8.2 toneladas métricas (18 000 libras) en el carril de proyecto, basta simplemente introducirlos, anotando su valor en millones de ejes estándar, apretando después la tecla de entrada.
- ◆ Si se desconocen dichos tránsitos equivalentes, se pueden estimar empleando la subrutina incluida en el programa, a partir de los siguientes datos: tránsito diario promedio en el carril de proyecto en número de vehículo; composición del tránsito por tipo de vehículo en por ciento; carga por eje (sencillo, doble o triple) de cada tipo de vehículo en toneladas métricas; proporción de vehículos cargados y vacíos, en forma global o por cada tipo de unidad; tasa de crecimiento anual del tránsito en por ciento y período de proyecto en años.

Después de haber calculado el tránsito de proyecto, el programa lo clasifica en cuatro niveles, con objeto de establecer espesores mínimos de capa, de acuerdo con lo siguiente:

#### Niveles del tránsito equivalente en el carril de proyecto

Nivel del tránsito equivalente	Ejes equivalentes de 8.2 toneladas métricas
I	$T \leq 10^6$
II	$10^6 < T \leq 10^7$
III	$10^7 < T < 5 \times 10^7$
IV	$5 \times 10^7 < T$

### 3. Capas consideradas

Para iniciar el diseño se requiere saber cómo lo concibe el proyectista y se piden las capas que se están considerando incluir. Desde el punto de vista estructural, es conveniente emplear un número de capas no mayor de cinco, de tal manera que tanto el análisis como la construcción correspondan a un proyecto bien definido, fácil de construir y de conservar durante su vida de servicio.

El programa DISPAV-5 está proyectado para analizar secciones estructurales con un máximo de cinco capas, las cuales pueden ser en este orden:

- ◆ Carpeta asfáltica
- ◆ Base granular o estabilizada con asfalto
- ◆ Sub-base granular
- ◆ Subrasante
- ◆ Terracería.

El número mínimo de capas consideradas es de dos y éstas deben ser la terracería y capa de carpeta asfáltica o base hidráulica.

El método de diseño proporciona una estimación adecuada de las deformaciones unitarias por fatiga en las capas estabilizadas con asfalto.

^

### 4. Valores relativos de soporte críticos, $VRSz = VRS$

Se piden los valores relativos de soporte críticos de cada una de las capas no estabilizadas. El VRSz es una de las variables de proyecto más importante y el proyectista debe de estimar de manera que sea representativa de las condiciones esperadas en el camino durante la vida de servicio de la obra vial. Se pueden consultar los informes 325 y 444 de las series del Instituto de Ingeniería, UNAM, para recomendaciones sobre su elección.

En este punto el programa revisa los valores relativos de soporte críticos introducidos (VRSz), en relación con los valores máximo y mínimos permisibles para cada capa.

El VRSz es comparado con el máximo permisible (VRSmax), el cual está basado en consideraciones prácticas de proyecto. Si dicho VRSz es mayor, entonces se toma el VRSmax como valor de proyecto (VRSp) para efectos de diseño por deformación permanente acumulada, conservando el VRSz estimado por el proyectista para su utilización posterior.

#### **VRSmax para todos los niveles de tránsito, (VRSp)**

Capa	VRSmax
Base	120
Sub-base	30
Subrasante	20
Terracería	20

Los valores máximos de VRSz se establecen para obtener espesores razonables desde el punto de vista constructivo y por confiabilidad del diseño. Los VRSz mínimos se especifican para limitar la calidad mínima de la base y de la terracería. Para base hidráulica VRSp mínimo 70% y terracería VRSp mínimo 3%; si se introducen valores menores a éstos el programa se detiene.

#### 5. Módulos elásticos de las capas no estabilizadas

Para el diseño por fatiga se requiere encontrar las deformaciones unitarias críticas de tensión en la parte inferior de la carpeta. Para esto, se necesita conocer el módulo de rigidez (módulo elástico) de las capas no estabilizadas.

El programa solicita al usuario ese módulo de rigidez. En caso de que no se tenga una estimación fundamentada de ese valor, se presenta al usuario la opción de estimar a partir del VRSz crítico esperado en el lugar (sin afectarlo por restricciones de valores mínimos o máximos), de acuerdo con el modelo desarrollado en el Instituto de Ingeniería, UNAM,  $E = 130 \text{ VRSz}^{0.7}$ .

Las relaciones empíricas entre el módulo de rigidez y el VRSz deben tomarse con precaución, pues se obtienen para condiciones muy generales y pueden requerir modificaciones en proyectos específicos. El programa permite que el usuario cambie los valores sugeridos para tomar en cuenta su experiencia con los materiales específicos del proyecto.

#### 6. Módulo de rigidez de la carpeta

Los requisitos establecidos en el modelo hacen necesario contar con carpeta asfáltica para tránsito de proyecto medios y altos; para tránsito bajo su inclusión es opcional.

Para fines de cálculo estructural, cuando se utiliza carpeta asfáltica se requiere introducir el módulo de rigidez, o módulo dinámico, en  $\text{kg/cm}^2$ . La estimación del módulo de rigidez de proyecto es un procedimiento que debe hacerse con mucho cuidado, ya que debe representar el comportamiento de dicha capa en condiciones de servicio, durante la vida útil de la carretera.

En la reología de las mezclas asfálticas, la temperatura y el tiempo de aplicación de carga tiene una influencia significativa en el valor del módulo en un momento determinado, por lo cual se recomienda hacer estudios regionales para fijar los valores de proyecto.

Si no se reconoce el módulo de rigidez de la carpeta el programa, se detiene para darle oportunidad al proyectista de obtenerlo experimentalmente o de estimarlo a partir de la composición volumétrica, características del asfalto, frecuencia de aplicación de carga y temperatura; por medio del programa MÓDULO-5 se puede obtener el módulo de rigidez que se presenta en el informe CI-8 de la serie del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

## 7. Relación de Poisson

También se necesita la relación de Poisson de todas las capas. Este parámetro es difícil de determinar experimentalmente, ya que se requiere máquinas de prueba con una instrumentación que permita medir con precisión las deformaciones resilientes vertical y horizontal. El programa suministra valores promedio para cada capa y permite al usuario modificar esos valores en caso de contar con información confiable de ese parámetro para los materiales específicos que emplea.

## 8. Nivel de confianza del proyecto

El nivel de confianza se refiere a la probabilidad de que la duración real del pavimento sea al menos igual a la de proyecto. Se sugiere el empleo de un nivel de 85 por ciento, pero el método permite al usuario el empleo de cualquier nivel entre 50 y 99 por ciento.

Con este dato termina la entrada de datos del proyecto por deformación permanente y se pasa al cálculo de espesores.

### **Diseño por deformación permanente en la rodada.**

Al tener el tránsito equivalente, los VRSz de las capas no estabilizadas, el módulo elástico de la carpeta y el nivel de confianza del proyecto, se determinan los espesores requeridos para cada capa de la sección estructural, empleando los modelos matemáticos desarrollados para ese fin.

En caso de que al terminar los espesores se encuentre alguna capa que requiera espesores muy pequeños (menores que 10 cm), se pone a consideración del proyectista la conveniencia de reconsiderar el proyecto desechando el uso de esa capa. Si el proyectista está de acuerdo con ello, se calculan de nuevo los espesores sin esa capa. Si no se acepta la sugerencia, el diseño continúa con las capas propuestas inicialmente, ajustando el espesor calculando al espesor mínimo correspondiente a esa capa y al tránsito de proyecto.

## 1. Espesores mínimos de cada capa

El espesor obtenido para cada capa se compara con el espesor mínimo especificado para el nivel de tránsito de proyecto establecido. Si el espesor calculado es menor al mínimo especificado, se toma dicho espesor mínimo como espesor del proyecto y se disminuyen los espesores de las capas inferiores, de acuerdo con los coeficientes estructurales de esas capas.

Los espesores mínimos especificados para las capas de base y sub-base se fijan por consideraciones constructivas, fundamentados en el comportamiento de carreteras en condiciones reales de servicio.

<b>Espesores mínimos de las capas de pavimento, en cm</b>				
capa	Tránsito			
	I	II	III	IV
Carpeta *	0	5	5	5
Base*	15	15	15	15
Sub-base*	15	15	15	15
Subrasante **	20	30	30	30
Subrasante ***	30	40	40	40
Notas. Aplicable a caminos normales y carreteras de altas especificaciones (*) Aplicable a caminos normales (**) Aplicable a carreteras de altas especificaciones (***)				

Se estima que los caminos con tránsito equivalente menor de un millón de ejes estándar, pueden construirse con un tratamiento superficial sobre una base de buena calidad. Para tránsitos mayores, es conveniente la colocación de una carpeta de concreto asfáltico, o base asfáltica con un tratamiento superficial.

Al terminar esta etapa se presenta al proyectista el diseño por deformación, tanto el cálculo sin restricción de espesor, como el recomendado por espesores mínimos.

Si el proyecto incluye una carpeta asfáltica se pregunta al proyectista si desea continuar el análisis por fatiga. Se recomienda que el proyectista continúe ese camino, ya que es indispensable para realizar el análisis estructural completo. Si el proyectista decide no continuar el análisis por fatiga por no tener carpeta asfáltica, sino simplemente un riego de sello, el programa finaliza con el diseño por deformación permanente acumulada, dando oportunidad al usuario de imprimir el resultado.

## Revisión del diseño por efectos de fatiga

### 1. Revisión de los módulos elásticos

El programa revisa que la relación de módulos entre dos capas adyacentes no estabilizadas no sobrepase cierto límite, para evitar la generación teórica de esfuerzos de tensión excesivos en la

parte inferior de la capa superior. Esta relación límite se toma de estudios de la compañía Shell que nos indica que  $K=0.2h^{0.45}$ , donde K es la relación de módulos admisibles, h es el espesor de la capa superior en mm. En caso de que se exceda la relación de módulos, el programa propone el ajuste recomendable en el valor de los módulos de rigidez, si el proyectista acepta la sugerencia se hace el ajuste, en caso contrario se continúa con los valores iniciales.

## 2. cálculo de la deformación unitaria de tensión en la carpeta

Se calcula la deformación unitaria de tensión en la carpeta, para ello se hace uso del programa de computadora CHEV4, desarrollado por la compañía CHEVRON y adaptado en el Instituto de Ingeniería, UNAM (CHEV5).

## 3. Vida previsible por deformación permanente y por fatiga

El valor calculado de la deformación unitaria de tensión en la carpeta, permite la obtención de la vida previsible por fatiga empleando el modelo matemático de vida por fatiga, desarrollado en el Instituto de Ingeniería, UNAM; de acuerdo con el nivel de confianza elegido para el proyecto.

### **Ajuste al diseño anterior**

La vida previsible por fatiga o por deformación es menor que el tránsito de proyecto, el resultado puede ser uno de los siguientes.

- ◆ La vida previsible obtenida antes se compara con el tránsito de proyecto correspondiente. En este caso se requieren ajustes para obtener un diseño adecuado.
- ◆ Las vidas previsibles son iguales a la de proyecto (dentro de una tolerancia de +/- 10% del tránsito de proyecto) o alguna de ellas está en esa tolerancia y la otra es mayor. Tomando en cuenta la posibilidad real de que uno de los criterios sea el que defina el espesor y el otro criterio queda sobrado; aquí se considera que el pavimento puede ser el adecuado, aunque conviene buscar ajustes al diseño para tratar de obtener un diseño más económico.
- ◆ Ambas vidas previsibles son mayores que el tránsito de proyecto, tomando en cuenta la tolerancia de 10%. En este caso se considera que el diseño requiere ajustes para un diseño más económico.

El procedimiento seguido en cada uno de los casos anteriores, se describe a continuación

### 1. La vida previsible es menor que el tránsito de proyecto

En este caso el programa presenta cuatro opciones al proyectista:

- ◆ Cambiar las propiedades de las capas (s) asfálticas (s). En esta opción no se permite cambiar el número de capas, sólo cambiar el módulo de rigidez de las capas asfálticas. En general se recomienda que si se van a cambiar los materiales se piense el proyecto de nuevo, reiniciando desde el principio.

- ◆ Aumentar el espesor de alguna (s) capa (s). En esta segunda opción se permite modificar el espesor de algunas capas del pavimento. Por ejemplo, aumentar el espesor de carpeta y disminuir el espesor de alguna capa inferior, cuidando siempre los espesores mínimos.
- ◆ Considerar la colocación de una base asfáltica. La tercera opción incorpora una capa de base asfáltica al proyecto. En este caso se requiere dar las características mecánicas de la nueva capa: espesor propuesto para esta capa, módulo de rigidez y relación de Poisson.

Si una vez introducida la base asfáltica el número de capas del pavimento es mayor que cinco, se requiere eliminar una de las capas no asfálticas, para no rebasar el número máximo de capas aceptado por el programa. Si el número de capas, incluida la base asfáltica no rebasa cinco, no se requiere ningún ajuste. Después de haber ajustado el número de capas, en caso de ser necesario, el proyectista tiene opción de imprimir los espesores de las capas restantes para tomar en cuenta los cambios realizados.

Después de cambiar las propiedades de los materiales o de incrementar algunos espesores de capa o definir la capa de base asfáltica, el programa vuelve a calcular la vida previsible por fatiga y por deformación para el nuevo sistema de capas y compara de nuevo con los tránsitos de proyecto.

Terminar la corrida del programa. En este caso el programa le da la opción de imprimir el último diseño encontrado, antes de terminar.

## 2. La vida previsible está en un intervalo de +/-10% del tránsito de proyecto

En este caso se tiene ya un diseño que satisface los requerimientos para evitar la deformación excesiva o la falla por fatiga de manera prematura, o ambos criterios. Sin embargo, en caso de que alguno de los criterios de diseño se encuentre sobrado, es recomendable analizar diferentes alternativas de ajuste para buscar alguna solución más económica que siga siendo satisfactoria.

Si el proyectista decide continuar estudiando el diseño, el programa le da opción a imprimir el diseño actual antes de modificarlo; a continuación se presentan las mismas opciones consideradas en el punto anterior para modificar el diseño actual y hacer su verificación posterior.

En caso de que el proyectista decida no continuar el diseño, el programa permite la impresión de resultados antes de terminar.

## 3. La vida previsible es mayor que el tránsito de proyecto

Si la vida previsible tanto en deformación como fatiga es mayor que el tránsito de proyecto, considerando la tolerancia de 10%, se permite al proyectista hacer ajuste en materiales o espesores para llegar a un diseño más aceptable o terminar la corrida del programa.

## PROCEDIMIENTO PARA REVISIÓN

El procedimiento de revisión permite el cálculo de la vida previsible por deformación y fatiga de pavimentos previamente definidos, ya sean pavimentos actualmente construidos o en proyectos.

El procedimiento consiste en:

1. Entrada de datos: espesores, características mecánicas de cada capa como módulos de rigidez,  $VRS_s$ , relaciones de Poisson y nivel de confianza.
2. Cálculo de la vida por deformación permanente en la zona transitada.
3. Cálculo de la vida de agrietamiento debido a fatiga.
4. Posibilidad de cálculo de nuevas vidas por deformación y agrietamiento, haciendo modificaciones en los espesores o propiedades mecánicas de las capas introducidas originalmente.

Los datos requeridos para la revisión son similares a los solicitados para el diseño, ya que se toman en cuenta los datos actuales de la estructura del pavimento y el período de diseño. Información tomada de la referencia 21.

### Aplicación del método en el subtramo de la autopista México- Querétaro

Información del subtramo:

Autopista conformada de dos cuerpos A y B, en cada cuerpo se tienen tres carriles de circulación.  
 Tipo de carretera: de altas especificaciones  
 Coeficiente direccional: 0.50  
 Coeficiente de distribución en el carril de proyecto: 0.75  
 Período de diseño (n): 20 años  
 Tasa de crecimiento (r): 5.00 %  
 Tránsito promedio diario anual (TPDA): 30 784 vehículos en ambos sentidos  
 Composición vehicular: A2=56.50%, B2=5.00%, B3=1.00%, B4=0.40%, C2=7.30%, C3=8.10%, T2-S2=0.30%, T3-S2=15.40%, T3-S3=2.40%, T3-S2-R2=1.10% y T3-S2-R4=2.50%

### REVISIÓN DE LA ESTRUCTURA ACTUAL DEL PAVIMENTO.

Para realizar la revisión del pavimento actual, se tienen además los siguientes datos:

#### Cuerpo A carril de baja

Capa	Espesor (cm)	$VRS_s$ (%)	Módulo ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )
Carpeta asfáltica	10	-	24 557
Base hidráulica	20	98	3 467
Sub-base estabilizada con cemento Pórtland	22	-	8 104
Subrasante	25	26	987
Subyacente	21	24	900
Terraplén	variable	16	900

### Cuerpo B carril de baja

Capa	Espesor (cm)	VRS <sub>s</sub> (%)	Módulo (kg/cm <sup>2</sup> )
Carpeta asfáltica	12	-	29 768
Base hidráulica	21	99	2 964
Sub-base estabilizada con cemento Portlánd	21	-	13 194
Subrasante	15	28	880
Subyacente	22	17	800
Terraplén	variable	14	800

Aplicando el método y ajustando valores mínimos y máximos en capas, espesores y valores relativos de soporte críticos. Se tiene en el cuerpo A carril de baja los resultados de la revisión, con un nivel de confianza en el diseño: 85%

capa	H (cm)	VRS <sub>z</sub> (%)	E (kg/cm <sup>2</sup> )	ν	Vida previsible	
					Deformación	Fatiga
Carpeta	10	-	24 557	0.35		3.9
Base hidráulica	20	98	3 467	0.35	23.3	
Sub-base estabilizada	22	30	8 104	0.45	8.6	
Subrasante	46	20	987	0.45	75.9	
Terracerías	-	16	900	0.45	> 150	
	Vida previsible		Tránsito proyecto			
Deformación	8.6		241.45			
Fatiga	3.9		201.09			

**El resultado del subtramo nos indica que la vida remanente del pavimento por fatiga tiene una vida útil de  $3.9 \times 10^6$  por menos de un año; por deformación el pavimento tiene una vida útil de  $8.6 \times 10^6$  por menos de un año.**

Con las características mecánicas de cada una de las capas del pavimento, la revisión por deformación para un nivel de confianza de 85% y un tránsito de proyecto de 241.45 millones de ejes estándar, se requieren los siguientes espesores de diseño y de proyecto que previenen contra la deformación excesiva.

Capa	Espesor de diseño	Espesor de proyecto
Carpeta	13.80	13.80
Base hidráulica	28.10	28.10
Sub-base	13.40	15.00
Subrasante	8.60	40.00

Se tiene en el cuerpo B carril de baja los resultados de la revisión, con un nivel de confianza en el diseño: 85%

capa	H (cm)	VRSz (%)	E (kg/cm <sup>2</sup> )	v	Vida previsible	
					Deformación	Fatiga
Carpeta	12	-	29 768	0.35		7.7
Base hidráulica	21	99	2 964	0.35	139.2	
Sub-base estabilizada	21	30	13 194	0.45	38.0	
Subrasante	37	20	880	0.45	> 150	
Terracerías	-	14	800	0.45	> 150	

	Vida previsible	Tránsito proyecto
Deformación	38.0	241.45
Fatiga	7.7	201.09

**El resultado del subtramo nos indica que la vida remanente del pavimento por fatiga tiene una vida útil de  $7.7 \times 10^6$  por menos de dos años; por deformación el pavimento tiene una vida útil de  $38.0 \times 10^6$  por cinco años.**

Con las características mecánicas de cada una de las capas del pavimento, la revisión por deformación para un nivel de confianza de 85% y un tránsito de proyecto de 241.45 millones de ejes estándar, se requieren los siguientes espesores de diseño y de proyecto que previenen contra la deformación excesiva.

Capa	Espesor de diseño	Espesor de proyecto
Carpeta	12.90	12.90
Base hidráulica	28.30	28.30
Sub-base	13.40	15.00
Subrasante	14.10	40.00

En tablas D.1 a D.2 del anexo D, se presentan los resultados del cálculo de tránsito acumulado a ejes equivalentes de 8.2 toneladas y el cálculo creciente del subtramo de la autopista. En las tablas 4.1 y 4.2, se muestran los pesos de los vehículos y la composición porcentual estimada de la red básica de carreteras en el país; además los diagramas de flujo en las figuras D.1 y D.2 del método.

## DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

Con la información del tránsito del subtramo de la autopista, parte de los datos de la estructura actual, los avances tecnológicos referentes a materiales naturales y estabilizados, así como los requisitos que deben cumplir los materiales de acuerdo a la normativa SCT. De acuerdo con los

resultados obtenidos en el diseño de la estructura del pavimento, se presentan las siguientes alternativas de solución I, II, III y IV.

### ALTERNATIVA I

Nivel de confianza en el diseño: 85%

capa	H (cm.)	VRSz (%)	E (kg/cm <sup>2</sup> )	ν	Vida previsible	
					Deformación	Fatiga
Carpeta	25	-	30 000	0.35		> 150
Base hidráulica	18	110	3 800	0.35	> 150	
Sub-base	15	30	3 000	0.45	> 150	
Subrasante	40	20	880	0.45	> 150	
Terracerías	-	14	800	0.45	> 150	

	Vida previsible	Tránsito proyecto
Deformación	> 150	241.45
Fatiga	> 150	201.09

La vida previsible es cercana o mayor que la vida de proyecto; la tolerancia es +/- 10% del tránsito de proyecto.

### ALTERNATIVA II

Nivel de confianza en el diseño: 85%

capa	H (cm)	VRSz (%)	E (kg/cm <sup>2</sup> )	ν	Vida previsible	
					Deformación	Fatiga
Carpeta	10	-	30 000	0.35		> 150
Base estabilizada con emulsión asfáltica	25	-	20 000	0.35		> 150
Sub-base	15	30	3 000	0.45	> 150	
Subrasante	40	20	880	0.45	> 150	
Terracerías	-	14	800	0.45	> 150	

	Vida previsible	Tránsito proyecto
Deformación	> 150	241.45
Fatiga	> 150	201.09

### ALTERNATIVA III

Nivel de confianza en el diseño: 85%

capa	H (cm)	VRSz (%)	E (kg/cm <sup>2</sup> )	v	Vida previsible	
					Deformación	Fatiga
Carpeta con polímero	10	-	35 000	0.35		> 150
Base estabilizada con cemento asfáltico	20	-	30 000	0.35		> 150
Sub-base	15	30	3 000	0.45	> 150	
Subrasante	40	20	880	0.45	> 150	
Terracerías	-	14	800	0.45	> 150	

	Vida previsible	Tránsito proyecto
Deformación	> 150	241.45
Fatiga	> 150	201.09

La vida previsible es cercana o mayor que la vida de proyecto; la tolerancia es +/- 10% del tránsito de proyecto.

### ALTERNATIVA IV

Nivel de confianza en el diseño: 85%

capa	H (cm)	VRSz (%)	E (kg/cm <sup>2</sup> )	v	Vida previsible	
					Deformación	Fatiga
Carpeta con polímero	10	-	40 000	0.35		> 150
Base estabilizada con cemento asfáltico y polímero	18	-	35 000	0.35		> 150
Sub-base	15	30	3 000	0.45	> 150	
Subrasante	40	20	880	0.45	> 150	
Terracerías	-	14	800	0.45	> 150	

	Vida previsible	Tránsito proyecto
Deformación	> 150	241.45
Fatiga	> 150	201.09

En las alternativas II y IV la vida previsible es mayor que el tránsito de proyecto; la tolerancia es +/- 10% del tránsito de proyecto.

### 4.1.2 Método AASHTO

El método AASHTO, versión 1993, describe los procedimientos para el diseño de la sección estructural de los pavimentos flexibles y rígidos en carreteras. En el caso de los pavimentos flexibles, el método establece que la superficie de rodamiento es para el concreto asfáltico y tratamientos superficiales, pues asume que tales estructuras soportarán niveles de alto volumen de tránsito y para tránsito de poco volumen, como son los caminos revestidos o de terracería que no los toma en cuenta.

Método de diseño.

Los procedimientos involucrados en el método de diseño para pavimentos flexibles, está basado en las ecuaciones originales de la AASHTO que datan de 1961 producto de las pruebas en Ottawa, Illinois, con tramos a escala natural y para todo tipo de pavimentos. La versión de 1986 y la de 1993 se han modificado para incluir factores o parámetros de diseño que no habían sido considerados y que son producto de la experiencia adquirida por este organismo entre el método original y su versión de 1993, además de incluir experiencias de otras dependencias y consultores independientes.

El diseño se basa primordialmente en encontrar un “número estructural SN” para el pavimento flexible que pueda soportar el nivel de carga y el tránsito admisible en ejes equivalentes acumulados ( $W_{18}$ ). Para determinar el número estructural SN requerido y el tránsito en ejes equivalentes acumulados, el método proporciona la ecuación general (4.0) y la gráfica de la figura 4.1, que contiene lo siguiente:

$$\text{Log}_{10}(W_{18}) = Z_R \times S_0 + 9.36 \times \log_{10}(\text{SN} + 1) - 0.20 + \frac{\text{Log}_{10}[\Delta\text{PSI}/4.2-1.5]}{0.40 + 1094/(\text{SN}+1)^{5.19}} + 2.32 \times \log_{10}(M_R) - 8.07 \quad (4.0)$$

Donde:

$W_{18}$ , el tránsito en ejes equivalentes acumulados para el período de diseño seleccionado; el parámetro de confiabilidad, “R”; la desviación estándar global, “ $S_0$ ”; el módulo de resiliencia efectivo, “ $M_r$ ” del material usado para la subrasante; la pérdida o diferencia entre los índices de servicio inicial y final deseados, “ $\Delta\text{PSI}$ ” y  $Z_R$  la desviación normal estándar.

#### 1. Tránsito.

Para el cálculo del tránsito, el método contempla los ejes equivalentes sencillos de 18,000Ib (8.2 ton) acumulados durante el período de diseño, se sugiere que para fines de diseño en “etapas o fases” se dibuje una gráfica donde se muestre año con año el crecimiento de los ejes acumulados (ESAL) vs tiempo, en años, hasta llegar al fin del período de diseño o primera vida útil del pavimento. La ecuación siguiente puede ser usada para calcular el parámetro del tránsito  $W_{18}$  en el carril de diseño.

$$W_{18} = D_D \times D_L \times W_{18} \quad (4.1)$$

$W_{18}$ ; tránsito acumulado en ejes equivalentes sencillos de 8.2 ton, en el carril de diseño.

$D_D$ ; factor de distribución direccional; se recomienda 50% para la mayoría de las carreteras, pudiendo variar de 0.3 a 0.7, dependiendo de en qué dirección va el tránsito con mayor porcentaje de vehículos pesados.

^

$W_{18}$ ; ejes equivalentes acumulados en ambas direcciones en el período de diseño.

$D_L$ ; factor de distribución por carril, cuando se tengan dos o más carriles por sentido.

El factor de distribución que se recomiendan son los siguientes valores:

#### FACTOR DE DISTRIBUCIÓN POR CARRIL

Nº CARRILES EN CADA SENTIDO	PORCENTAJE DE $W_{18}$ EN EL CARRIL DE DISEÑO
1	100
2	80-100
3	60-80
4 o más	50-75

Una vez calculados los ejes equivalentes acumulados en al primer año, el diseñador deberá estimar con base en la tasa de crecimiento anual y el período de diseño en años, el total de ejes equivalentes acumulados y así contar con un parámetro de entrada para la ecuación general o para el nomograma de la figura 4.1.

En la siguiente tabla se recomiendan los siguientes períodos de diseño, en función del tipo de carretera:

TIPO DE CARRETERA:	PERÍODO DE DISEÑO
Urbana con altos volúmenes de tránsito.	30-50 años
Interurbana con altos volúmenes de tránsito.	20-50 años
Pavimentada con bajos volúmenes de tránsito	15-25 años
Revestidas con bajos volúmenes de tránsito	10-20 años

## 2. Confiabilidad “R”.

Con el parámetro de confiabilidad “R”, se trata de llegar a cierto grado de certeza en el método de diseño, para asegurar que las diversas alternativas de la sección estructural que se obtengan durarán como mínimo el período de diseño. Se consideran posibles variaciones en las predicciones del tránsito en ejes acumulados y en el comportamiento de la sección diseñada.

El método AASHTO para el diseño de la sección estructural de pavimentos flexibles, recomienda valores desde 50 y hasta 99.9 para el parámetro “R” de confiabilidad, con diferentes clasificaciones funcionales, notándose que los niveles más altos corresponden a obras que estarán

sujetas a un uso intensivo, mientras que los niveles más bajos corresponden a obras o caminos secundarios y rurales. Los valores de “R” de confiabilidad, con diferentes clasificaciones funcionales se presentan a continuación.

**VALORES DE “R” DE CONFIABILIDAD, CON DIFERENTES CLASIFICACIONES FUNCIONALES**

NIVELES DE CONFIABILIDAD	
CLASIFICACIÓN FUNCIONAL:	NIVEL RECOMENDADO POR AASHTO PARA CARRETERAS
Carretera interestatal o autopista.	80- 99.9
Red principal o federal.	75 – 95
Red secundaria o estatal.	75 – 95
Red rural o local.	50 – 80

De la confiabilidad del tipo de carretera, se obtiene la desviación normal estándar con la siguiente tabla.

**DESVIACIÓN NORMAL ESTÁNDAR PARA VARIOS NIVELES DE CONFIABILIDAD**

Confiabilidad (%)	Desviación normal estándar ( $Z_R$ )	Confiabilidad (%)	Desviación normal estándar ( $Z_R$ )
50	0.000	93	-1.476
60	-0.253	94	-1.555
70	-0.524	95	-1.645
75	-0.674	96	-1.751
80	-0.841	97	-1.881
85	-1.037	98	-2.054
90	-1.282	99	-2.327
91	-1.340	99.9	-3.090
92	-1.405	99.99	-3.750

3. Desviación estándar global “ $S_o$ ”.

Este parámetro está ligado directamente con la confiabilidad (R), habiéndolo determinado, en este paso deberá seleccionarse un valor  $S_o$  desviación estándar global, representativo de condiciones locales particulares que considera posibles variaciones en el comportamiento del pavimento y en la predicción del tránsito.

Valores de “ $S_o$ ” en los tramos de prueba de AASHTO no incluyeron errores en la estimación del tránsito: sin embargo, el error en la predicción del comportamiento de las secciones en tales tramos, fue de 0.35 para pavimentos flexibles, lo que corresponde a valores de la desviación estándar total debidos al tránsito de 0.45 para pavimentos flexibles.

4. Módulo de Resiliencia efectivo.

En el método AASHTO, la parte fundamental para caracterizar debidamente a los materiales consiste en la obtención del módulo de resiliencia, con base en pruebas de laboratorio realizadas

en materiales a utilizar en la capa subrasante (método AASHTO T-274), con muestras representativas (esfuerzo y humedad) que simulen las estaciones del año respectivas. El módulo de resiliencia “estacional” será obtenido alternadamente por correlaciones con propiedades del suelo, tales como el contenido de arcilla, humedad, índice plástico, etc.

Finalmente, deberá obtenerse un “módulo de resiliencia efectivo”, que es equivalente al efecto combinado de todos los valores de módulos estacionales.

Para la obtención del módulo estacional o variaciones del  $M_R$  a lo largo de todas las estaciones del año, se ofrecen dos procedimientos: uno, obteniendo la relación en el laboratorio entre el módulo de resiliencia y el contenido de humedad de diferentes muestras en diferentes estaciones del año y dos, utilizando algún equipo para medición de deflexiones sobre carreteras en servicio durante diferentes estaciones del año.

Sin embargo, para el diseño de pavimentos flexibles, únicamente se recomienda convertir los datos estacionales en módulo de resiliencia efectivo de la capa subrasante, con el auxilio de la figura 4.7 que proporciona un valor en función del “daño equivalente anual” obtenido para cada estación en particular; también puede utilizarse la siguiente ecuación:

$$Uf = 1.18 \times 10^8 \times M_R^{-2.32} \quad (4.2)$$

Donde:

$Uf$ ; daño relativo en cada estación (por mes o quincenal).

$M_R$ ; módulo de resiliencia de la capa subrasante, obtenido en laboratorio o con deflexiones cada quincena o mes.

Y  $\bar{U}f$  = promedio de daño relativo =  $\sum \bar{U}f/n$ ;

Por lo que el,  $M_R$  efectivo, será el que corresponde al  $\bar{U}f$  promedio (Ecuación 4.2).

#### 5. Pérdida o diferencia entre índices de servicio inicial y terminal.

El cambio o pérdida en la calidad de servicio que la carretera proporciona al usuario, se define en el método con la siguiente ecuación:

$$\Delta PSI = p_o - p_t \quad (4.3)$$

Donde:

PSI; índice de servicio presente

$\Delta PSI$ ; diferencia entre los índices de servicio inicial u original y el final o terminal deseado.

$P_o$ ; índice de servicio inicial para pavimentos flexibles.

$P_t$ ; índice de servicio terminal, para el cual AASHTO maneja en su versión 1993 valores de 3.0, 2.5 y 2.0, recomendando 2.5 ó 3.0 para caminos principales y 2.0 para secundarios.

La escala del índice de servicio varía de 0 a 5 para caminos intransitables hasta carreteras perfectas, respectivamente. Sin embargo, se sugiere que el criterio para definir el índice de servicio terminal o mínimo de rechazo (menor índice tolerado antes de realizar alguna operación de rehabilitación, encarpetado o reconstrucción), esté en función de la aceptación de los usuarios de la carretera.

Para el caso de diseño de pavimentos en climas muy extremosos, en especial los fríos, la guía de diseño del método recomienda evaluar adicionalmente la pérdida del índice de servicio original y terminal debido a factores ambientales por congelamiento y deshielo, que producen cambios volumétricos notables en la capa subrasante y capas superiores de la estructura del pavimento. En tales casos, el diseñador deberá consultar el método AASHTO 1993, capítulo 2 parte 2.1.4.

### **Determinación de espesores por capas.**

Una vez obtenido el número estructural SN para la sección estructural del pavimento utilizando el gráfico o la ecuación general básica de diseño, (figura 4.1), donde se involucraron los parámetros anteriormente descritos (tránsito, R,  $S_o$ ,  $M_R$  y  $\Delta PSI$ ), se requiere ahora determinar una sección multicapa que en conjunto provea de suficiente capacidad de soporte equivalente al número estructural de diseño original. La siguiente ecuación puede utilizarse para obtener los espesores de cada capa, para la superficie de rodamiento o carpeta, base y sub-base; además los coeficientes de drenaje para la base y sub-base.

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 \quad (4.4)$$

$a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$ ; coeficientes de capa representativos de carpeta, base y sub-base respectivamente.  
 $D_1$ ,  $D_2$  y  $D_3$ ; espesor de la carpeta, base y sub-base respectivamente, en pulgadas.  
 $m_2$  y  $m_3$ ; coeficientes de drenaje para base y sub-base, respectivamente.

Para la obtención de los coeficientes de capa  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$ , deberán utilizarse las figuras 4.2 a 4.6 para carpeta asfáltica, bases granulares, sub-bases granulares y bases estabilizadas con asfalto, donde se representan valores de correlación hasta de cinco diferentes pruebas de laboratorio: módulo elástico, Texas triaxial, R – valor, VRS y estabilidad Marshall.

Para la obtención de los coeficientes de drenaje,  $m_2$  y  $m_3$ , correspondientes a las capas de base y sub-base respectivamente, el método AASHTO se basa en la capacidad del drenaje para remover la humedad interna del pavimento.

En la siguiente tabla se presentan los valores recomendados para  $m_2$  y  $m_3$  (bases y sub-bases granulares sin estabilizar) en función de la calidad del drenaje y el porcentaje del tiempo a lo largo de un año, en el cual la estructura del pavimento pueda estar expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación.

**VALORES  $m_i$  RECOMENDADOS PARA MODIFICAR LOS COEFICIENTES ESTRUCTURALES DE CAPA DE BASES Y SUBBASES SIN TRATAMIENTO, EN PAVIMENTOS FLEXIBLES.**

Calidad del drenaje	Agua removida en:	Porcentaje de tiempo al cual está expuesta la estructura del pavimento a niveles de humedad próxima a la saturación			
		Menor del 1%	1 - 5%	5 - 5%	Mayor del 25%
Excelente	2 horas	1.40 – 1.35	1.35 – 1.30	1.30 – 1.20	1.20
Bueno	1 día	1.35 – 1.15	1.25 – 1.15	1.15 – 1.00	1.00
Regular	1 semana	1.25 – 1.15	1.15 – 1.05	1.00 – 0.80	0.80
Pobre	1 mes	1.15 – 1.05	1.05 - 0.80	0.80 – 0.60	0.60
Muy pobre	Agua no drenada	1.05 – 0.95	0.95 – 0.75	0.75 – 0.40	0.40

Para capas estabilizadas con cemento o asfalto y para la superficie de rodamiento elaborada con concreto asfáltico, el método no considera un posible efecto por el drenaje, por lo que en la ecuación de diseño sólo intervienen valores de  $m_2$  y  $m_3$  y no se asigna valor para  $m_1$  correspondiente a la carpeta.

Para el cálculo de los espesores  $D_1$ ,  $D_2$  y  $D_3$  (en pulgadas), el método sugiere respetar los siguientes valores mínimos, en función del tránsito en ejes equivalentes sencillos acumulados:

**ESPEORES MÍNIMOS, EN PULGADAS, EN FUNCIÓN DE LOS EJES EQUIVALENTES**

TRÁNSITO (ESAL's) EN EJES EQUIVALENTES	CARPETAS DE CONCRETO ASFÁLTICO	BASES GRANULARES
Menor de 50,000	1.0 ó T.S.	4.0
50,001 – 150,000	2.0	4.0
150,001 – 500,000	2.5	4.0
500,001 – 2'000,000	3.0	6.0
2'000,001 – 7'000,000	3.5	6.0
Mayor de 7'000,000	4.0	6.0

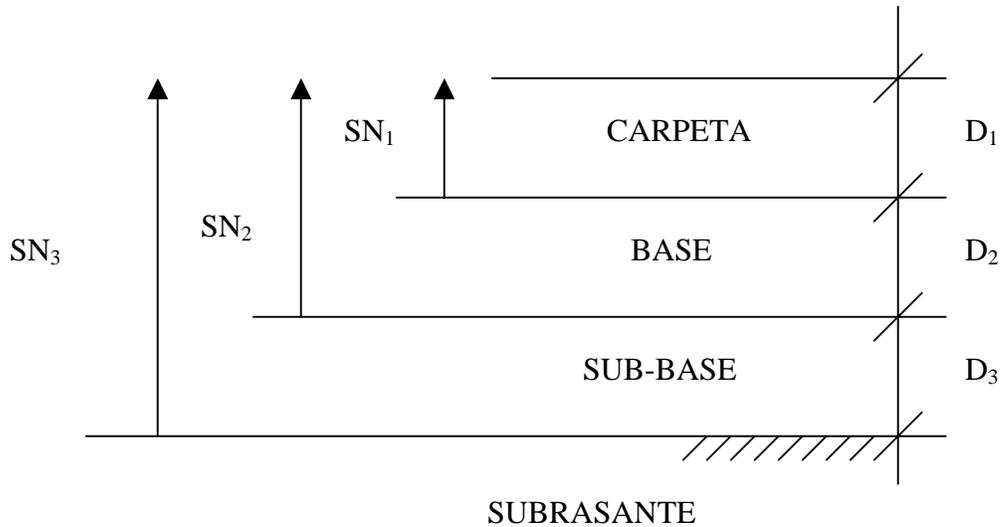
(T.S.) tratamiento superficial con sellos

**Análisis del diseño final con sistema multicapa.**

Para pavimentos flexibles la estructura es un sistema de varias capas y por ello debe diseñarse el “número estructural SN” sobre la capa subrasante o cuerpo del terraplén es lo primero en calcularse. De la misma manera deberá obtenerse el número estructural requerido sobre las capas de la sub-base y base, utilizando los valores de resistencia aplicables para cada uno. Trabajando con las diferencias entre los números estructurales que se requieran sobre cada capa, el espesor máximo permitido de cualquier capa puede ser calculado. Por ejemplo, el número estructural máximo permitido para material de la capa de sub-base, debe ser igual al número estructural

requerido sobre la sub-base restado del SN requerido sobre la subrasante. Información tomada de las referencias 1 y 24.

En el siguiente esquema se presenta la sección estructural de proyecto y ecuaciones.



$$D^*_1 \geq SN_1 / a_1$$

$$SN^*_1 = a_1 D_1 \geq SN_1$$

$$D^*_2 = (SN_2 - SN^*_1) / a_2 \quad m_2$$

$$SN^*_1 + SN^*_2 \geq SN_2$$

$$D^*_3 \geq [SN_3 - (SN^*_1 + SN^*_2)] / a_3 \quad m_3$$

NOTAS: 1) a, D, M, y SN corresponden a valores mínimos requeridos.

2) D\* y SN representan los valores finales de diseño.

## Aplicación del método en el subtramo de la autopista México- Querétaro

Información del subtramo:

Autopista conformada de dos cuerpos A y B, en cada cuerpo se tienen tres carriles de circulación.

Tipo de carretera: de altas especificaciones

Coefficiente direccional: 0.50

Coefficiente de distribución en el carril de proyecto: 0.75

Período de diseño (n): 20 años

Tasa de crecimiento (r): 5.00 %

Tránsito promedio diario anual (TPDA): 30 784 vehículos en ambos sentidos

Composición vehicular: A2=56.50%, B2=5.00%, B3=1.00%, B4=0.40%, C2=7.30%, C3=8.10%, T2-S2=0.30%, T3-S2=15.40%, T3-S3=2.40%, T3-S2-R2=1.10% y T3-S2-R4=2.50%

### REVISIÓN DE LA ESTRUCTURA ACTUAL DEL PAVIMENTO.

Para realizar la revisión del pavimento actual, se tienen además los siguientes datos:

Capa	Cuerpo a carril de baja		Cuerpo B carril de baja	
	Espesor (cm)	Módulo (Psi)	Espesor (cm)	Módulo (Psi)
Carpeta asfáltica	10	349 268	12	423 382
Base hidráulica	20	49 310	21	42 156
Sub-base estabilizada	22	115 261	21	187 655
Subrasante	25	140 38	15	12 516
Subyacente	21	12 800	22	11 378
Terraplén	variable	12 800	variable	11 378

Aplicando el método y ajustando valores mínimos y máximos en capas, espesores y valores relativos de soporte críticos. Se tiene en el cuerpo A carril de baja los resultados de la revisión I.

Tránsito de diseño:  $E_{sal_{req}} = 220\ 065\ 082$  y  $S_{N_{req}} = 6.67$

Tránsito de la estructura:  $E_{sal_{adm}} = 35\ 150\ 698$

Capa	E psi	a	M	e in	$S_N$	e cm
Carpeta	349 268	0.43		3.94	1.69	10.00
Base hidráulica	54 046	0.22	1.20	7.87	1.73	20.00
Sub-base	42 668	0.21	1.15	8.66	1.82	22.00
Subrasante	14 038					
					5.24	

**El resultado del subtramo indica que la vida del pavimento tiene una vida útil de  $35.15 \times 10^6$  para 4.8 años.**

Se tiene en el cuerpo B carril de baja los resultados de la revisión II.

Tránsito de diseño:  $E_{sal_{req}} = 220\ 065\ 082$  y  $S_{N_{req}} = 6.67$

Tránsito de la estructura:  $E_{sal_{adm}} = 55\ 101\ 841$

Capa	E psi	a	M	e in	$S_N$	e cm
Carpeta	423 382	0.43		4.72	2.03	11.99
Base hidráulica	42 156	0.22	1.20	8.27	1.73	20.00
Sub-base	42 668	0.21	1.15	8.66	1.82	22.00
Subrasante	12 516					
					5.58	

**El resultado del subtramo indica que la vida del pavimento tiene una vida útil de  $55.10 \times 10^6$  para 7.15 años.**

En las tablas 4.3 y 4.4, se presentan los factores de equivalencia de carga (FEC) para vehículos más frecuentes en carreteras mexicanas y factores de equivalencia de carga (FEC) para un ISR de 2.5, que se utilizan en el método.

#### DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

Con la información del tránsito del subtramo de la autopista, parte de los datos de la estructura actual, los avances tecnológicos referentes a materiales naturales y estabilizados, así como los requisitos que deben cumplir los materiales de acuerdo a la normativa SCT y de acuerdo con los resultados obtenidos en el diseño de la estructura del pavimento, se presentan las siguientes alternativas de solución I, II, III y IV.

#### Resultados del diseño estructural del pavimento:

##### ALTERNATIVA I.

Tránsito de diseño:  $E_{sal_{req}} = 220\ 065\ 082$  y  $S_{N_{req}} = 6.67$

Tránsito de la estructura:  $E_{sal_{adm}} = 204\ 362\ 390$

Capa	E psi	A	m	e in	$S_N$	e cm
Carpeta	426 682	0.43		8.26	3.55	21.00
Base hidráulica	54 046	0.22	1.20	6.69	1.47	18.00
Sub-base	42 668	0.21	1.15	7.87	1.65	20.00
Subrasante	12 516					
					6.67	

ALTERNATIVA II.

Tránsito de diseño:  $E_{sal_{req}} = 220\ 105\ 767$  y  $S_{N_{req}} = 6.68$

Tránsito de la estructura:  $E_{sal_{adm}} = 216\ 692\ 076$

Capa	E Psi	a	m	e in	$S_N$	e cm
Carpeta	426 682	0.43		3.94	1.69	10.00
Base estabilizada con emulsión asfáltica	284 454	0.26		12.99	3.38	33.00
Sub-base	42 668	0.21	1.15	7.88	1.65	20.00
Subrasante	12 516					
					6.72	

ALTERNATIVA III.

Tránsito de diseño:  $E_{sal_{req}} = 220\ 105\ 767$   $S_{N_{req}} = 6.68$

Tránsito de la estructura:  $E_{sal_{adm}} = 219\ 225\ 896$

Capa	E Psi	a	m	e in	$S_N$	e cm
Carpeta	497 795	0.46		3.94	1.81	10.00
Base estabilizada con cemento asfáltico	426 682	0.28		11.81	3.31	30.00
Sub-base	42 668	0.21	1.15	7.48	1.57	19.00
Subrasante	13 100					
					6.69	

ALTERNATIVA IV.

Tránsito de diseño:  $E_{sal_{req}} = 220\ 065\ 082$  y  $S_{N_{req}} = 6.67$

Tránsito de la estructura:  $E_{sal_{adm}} = 216\ 611\ 764$

Capa	E Psi	a	m	e in	$S_N$	e cm
Carpeta	426 682	0.43		3.94	2.54	15.00
Base estabilizada con cemento Pórtland	853 364	0.23		12.60	2.53	30.00
Sub-base	42 668	0.21	1.15	7.87	1.65	20.00
Subrasante	12 516					
					6.72	

En las alternativas I, II, III y IV el tránsito de diseño ( $E_{sal_{req}}$ ) es  $\pm$  el 10 % del tránsito de la estructura ( $E_{sal_{adm}}$ ), por lo tanto los diseños son correctos. En las tablas D.3 a D.10 del anexo D, se presenta el diseño del pavimento y el tránsito equivalente acumulado de las alternativas propuestas en este método.

## 4.2 MÉTODO TEÓRICO

### 4.2.1 Modelo Kenlayer

El modelo Kenlayer, es aplicado a pavimentos flexibles sin juntas o capas rígidas y se presenta mediante un programa de computadora, además se describe la teoría del sistema multicapa elástico bajo un área cargada circular. Las soluciones son superpuestas para ruedas múltiples, aplicadas iterativamente para capas no lineales y calcular en varios momentos para capas visco elásticas. Por consiguiente, Kenlayer puede ser aplicado en sistemas en capas bajo ruedas solas, dobles, dobles-tándem y dobles-tridem. El comportamiento del pavimento depende de las características de los materiales y éstos pueden ser: lineal elástico, no lineal elástico o visco elástico. Se hace un análisis de daño del conjunto de las propiedades de los materiales que conforman las diferentes capas de la estructura del pavimento en períodos durante cada año y un máximo de grupo de carga, ya sea sola o múltiple. El daño causado por el agrietamiento de fatiga y deformación permanente en cada período y grupo de carga es sumado, permite evaluar la vida de diseño del pavimento.

El programa de computadora es un procedimiento interactivo que permite obtener los esfuerzos, deformación unitaria, desplazamientos verticales y desplazamientos radiales en la estructura del pavimento. La capacidad de análisis es para 19 capas máximas y 25 puntos especificados.

El programa requiere de los siguientes insumos:

Parámetros de entrada especificados, módulos resilientes de las capas, tránsito, tipos de carga, número de capas y punto para su análisis, número de períodos por año, número de grupo de carga, relación de Poisson, presión de contacto, radio de contacto, coeficientes de daño, unidad de masa de las capas, condiciones de interfase de las capas, número total de capas, número de capas de tensión, número de capas a compresión, número de puntos en las coordenadas X y Y, número de distancia radial, número de capa visco elástica, temperatura de la capa visco elástica, espesores de cada capa, repeticiones de carga en cada período, espaciamiento de centro a centro de las ruedas en dirección eje (X y Y) y distancia vertical z.

### TEORÍA DEL SISTEMA

#### 1. Sistema multicapa elástico.

En la figura 4.8, se muestra el sistema de “n” capas en coordenadas cilíndricas con espesores ( $z_n - 2$ ) y la inferior de espesor infinito, módulos de elasticidad  $E_i$  y relación de Poisson  $\nu_i$  respectivamente.

Los problemas en elasticidad en el eje asimétrico, el método asume una función de esfuerzos que satisface a la ecuación diferencial básica, la frontera y condiciones de continuidad del sistema. Después de ser encontrada la función de esfuerzos, los esfuerzos y los desplazamientos pueden ser determinados (Timoshenko y Goodier 1951). La función de esfuerzos para cada capa tiene 4 constantes de integración,  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  y  $D_i$ , donde  $i$  es el número de capa porque la función de esfuerzo debe desaparecer a una profundidad infinita, las constantes  $A_n$  y  $C_n$  deben ser iguales a cero. Para un sistema de  $n$  capas del número total de las constantes o incógnitas es  $(4n - 2)$  que deben ser valoradas por dos condiciones de frontera y  $4(n-1)$  con las condiciones de continuidad. Las dos condiciones de frontera son que el esfuerzo vertical bajo una área cargada circular es

igual a “q” y que la superficie esté libre de esfuerzo cortante; las cuatro condiciones de la capa una de las interfaces de (n-1) son la continuidad de esfuerzo vertical, desplazamiento vertical, esfuerzo cortante y desplazamiento radial. Si la interfase de las capas es sin fricción, la continuidad de esfuerzo cortante y desplazamiento radial es reemplazada por desaparecer el esfuerzo cortante arriba y abajo de la interfase.

## 2. Superposición de cargas de rueda.

Las soluciones para sistemas multicapas elásticas bajo una carga única puede ser extendida a los casos que involucren a cargas múltiples donde se aplica el principio de superposición de carga; en la figura 4.9a, se muestra en un plano un conjunto de ruedas dobles-tándem. El esfuerzo y desplazamiento vertical bajo el punto A puede ser obtenido añadiendo éstos debido a cada una de las cargas, porque todas están en la misma vertical o dirección z. Sin embargo el esfuerzo radial  $\sigma_r$ , el esfuerzo tangencial  $\sigma_t$  y el esfuerzo cortante  $\tau_{rz}$ , debido a cada carga no puede ser añadida directamente por que no están en la misma dirección, como se indica por las cuatro diferentes direcciones radiales al punto A. Sin embargo,  $\sigma_r$ ,  $\sigma_t$ , y  $\tau_{rz}$  deben ser resueltos en las componentes de la dirección X y Y, como se muestra en la figura 4.9b para esfuerzos al punto A, debido a la carga del punto B. Resolviendo el sistema de la figura anterior y aplicando el principio de superposición de carga así como el análisis no lineal, se llega a las siguientes ecuaciones que son introducidas en el sistema Kenlayer:

$$\varepsilon_1 = 1/E [\sigma_1 + \nu (\sigma_2 + \sigma_3)] \quad (4.5)$$

$$\varepsilon_2 = 1/E [\sigma_2 + \nu (\sigma_3 + \sigma_1)] \quad (4.6)$$

$$\varepsilon_3 = 1/E [\sigma_3 + \nu (\sigma_1 + \sigma_2)] \quad (4.7)$$

$$\varepsilon_t = (\varepsilon_x + \varepsilon_y)/2 - \sqrt{[(\varepsilon_x - \varepsilon_y)/2]^2 + \gamma_{xy}^2} \quad (4.8)$$

$$\varepsilon_x = 1/E [\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)] \quad (4.9)$$

$$\varepsilon_y = 1/E [(\sigma_y - \nu (\sigma_x + \sigma_z))] \quad (4.10)$$

$$\gamma_{xy} = 2(1 + \nu) / E (\tau_{xy}) \quad (4.11)$$

Donde:

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$  y  $\varepsilon_3$ ; deformaciones principales

$\sigma_1, \sigma_2$  y  $\sigma_3$ ; esfuerzos principales

E; módulo de elasticidad

$\nu$ ; relación de Poisson

$\varepsilon_t$ ; deformación principal de tensión horizontal en la parte inferior de la capa de asfalto

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$  y  $\varepsilon_z$ ; deformaciones en la dirección eje X, Y y Z

$\gamma_{xy}$ ; deformación por cortante en dirección eje X y Y

$\tau_{xy}$ ; esfuerzo cortante en la dirección X y Y

### 3. Análisis de daño

El análisis de daño es llevado a cabo tanto para agrietamiento por fatiga como para deformación permanente.

El criterio de falla para agrietamiento de fatiga es expresado por:

$$N_f = f_1 (\epsilon_t)^{-f_2} (E_1)^{-f_3} \quad (4.12)$$

Donde:

$N_f$ ; es el número permisible de las repeticiones de carga para prevenir el agrietamiento de fatiga

$\epsilon_t$ ; es la deformación de tensión en la parte inferior de la capa de asfalto

$E_1$ ; módulo elástico de la capa de asfalto

$f_1$ ,  $f_2$  y  $f_3$ ; son constantes determinadas en laboratorio de pruebas de fatiga, con  $f_1$  modificado correlacionándolo con observaciones de campo.

El Instituto del Asfalto usa 0.0796, 3.291 y 0.854 para  $f_1$ ,  $f_2$  y  $f_3$  respectivamente, en su procedimiento de diseño analíticamente fundado; los valores utilizados por Shell son 0.0685, 5.671 y 2.363 (Shook et al., 1982); para capas de asfalto de espesores menores de 4" Graus et al 1984, que en el criterio del Instituto del Asfalto para  $f_1$  se redujera al valor 0.0636

Criterio de falla por deformación permanente es expresado por:

$$N_d = f_4 (\epsilon_c)^{-f_5} \quad (4.13)$$

Donde:

$N_d$ ; es el número permisible de las repeticiones de carga para limitar la deformación permanente

$\epsilon_c$ ; es la deformación de compresión en la parte superior de la capa de subrasante

$f_4$  y  $f_5$ ; son constantes determinadas de pruebas campo en carreteras

Los valores sugeridos de  $f_4$  y  $f_5$  son:  $1.365 \times 10^{-9}$  y 4.477 por el Instituto del Asfalto,  $6.15 \times 10^{-7}$  y 4.0 por Shell.

### 4. Ejes múltiples

Debido al espacio largo entre dos ejes, la deformación por tensión crítica y compresiva bajo ejes múltiples son significativamente diferentes de las producidas por un eje. Si el paso de un conjunto de ejes múltiples se supone tener una repetición y el daño causado por un eje solo (80kN) 18 kip es casi el mismo, como es causado por ejes tánden (160 kN) 36 kip o ejes tridem (240 kN) 54 kip. Si un paso de ejes tánden se supone por tener dos repeticiones y que el eje tridem tiene tres repeticiones, el daño causado por ejes tánden (160kN) 36 kip y eje tridem (240 kN) 54 kip son 2 y 3 veces más grande que el que produce un eje solo (80kN) 18 kip. El factor de equivalencia sugerido por el Instituto del Asfalto es 1.38 para eje tánden y 1.66 para eje triden.

Para el análisis de daño, el procedimiento usado en Kenlayer debido a carga de eje tánden, como se presenta en la figura 4.10; en la figura 4.10a se muestra que primero se determina la deformación de tensión y compresiva en los 3 puntos bajo rueda doble-tánden, el resultado es la deformación máxima de tensión ( $\epsilon_t$ ) y la deformación máxima de compresión ( $\epsilon_c$ ); después se

determina la deformación de tensión y compresiva en los puntos situados entre los dos ejes, como se muestra en la figura 4.10b, también el resultado son las deformaciones máximas de tensión y compresión en la figura 4.10c, se muestra la deformación obtenida en el primer eje de carga ( $\epsilon_a$ ) y la obtenida en el segundo eje de carga ( $\epsilon_b$ ), por lo tanto, para el análisis de daño debido al segundo eje de carga es  $\epsilon_a - \epsilon_b$ .

Un procedimiento similar pero más aproximado es usado para ejes triden en donde primero se determina la deformación máxima  $\epsilon_a$  en los 3 puntos de acuerdo a la figura 4.11a comparando las deformaciones en los tres puntos, entonces se determina la deformación  $\epsilon_b$  como se muestra en la figura 4.11b. Las deformaciones que deben ser usadas en el análisis de daño de las 3 cargas de eje son:  $\epsilon_a$ ,  $\epsilon_a - \epsilon_b$  y  $\epsilon_a - \epsilon_b$  respectivamente.

## 5. Capas no lineales

Es conocido que los materiales granulares y suelo de la subrasante son no lineales con módulo elástico de niveles de esfuerzo variado. Los módulos elásticos de ser usados en el sistema de capas son los módulos resilientes obtenidos de pruebas de compresión triaxial no confinada y repetida. Las propiedades de materiales no lineales que han sido incorporados en Kenlayer son:

Material granular.

Relación establecida. Una simple relación entre módulos resilientes y el primer esfuerzo invariante puede ser expresado como:

$$E = k_1 \theta^{k_2} \quad (4.14)$$

Donde:

$k_1$  y  $k_2$ ; son constantes del material encontradas experimentalmente  
 $\theta$ ; esfuerzo invariante

El esfuerzo invariante puede ser:

$$\theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (4.15)$$

$$\theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z + \gamma z (1+2 k_0) \quad (4.16)$$

Donde:

$\gamma$ ; peso volumétrico promedio

$z$ ; distancia abajo de la superficie el cual el módulo es determinado

$k_0$ ; coeficiente de presión de tierra en reposo

$\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$ ; esfuerzos en direcciones X, Y y Z

Kenlayer usa en mecánica de suelos la convención de signos para esfuerzos y deformaciones; por lo tanto,  $\theta$  es positivo cuando hay compresión y negativo cuando hay tensión; en las siguientes tablas se presentan los valores típicos de varios materiales y las constantes  $k_1$  y  $k_2$ .

## CONSTANTES NO LINEALES PARA MATERIALES GRANULARES

Tipo de material	Núm. de datos	K <sub>1</sub> (psi)		K <sub>2</sub>	
		Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar
Arena de aluvión	8	1 620	78	0.62	0.13
Arena-grava	37	4 480	4 300	0.53	0.17
Mezcla de arena y agregados	78	4 350	2 630	0.59	0.13
Piedra triturada	115	7 210	7 490	0.45	0.23

Referencia	Material	K <sub>1</sub> (psi)	K <sub>2</sub>
Hicks (1970)	Grava parcialmente triturada	1 600-5 000	0.57-0.73
Hicks y Finn (1970)	Pruebas en carreteras de San Diego de bases no tratadas.	2 100- 5 400	0.61
Allen (1973)	Grava triturada	1 800-8 000	0.32-0.70
Kalcheff y Hicks (1973)	Piedra triturada	4 000-9 000	0.46-0.64
Bobice et al. (1976)	Caliza bien graduada triturada	8 000	0.67
Monismith y Witzak (1980)	Materiales de base y sub-base en servicio	2 900-7 750	0.46-0.65

### Suelo fino

Los módulos resilientes de suelo fino decrecen con el incremento del esfuerzo desviador  $\sigma_d$ . En pruebas triaxiales de laboratorio  $\sigma_2 = \sigma_3$ , así el esfuerzo desviador es definido como:

$$\sigma_1 = \sigma_2 - \sigma_3 \quad (4.17)$$

En el sistema de capas,  $\sigma_2$  puede ser no igual a  $\sigma_3$ , por lo tanto, el esfuerzo desviador incluyendo el peso del sistema de capas es:

$$\sigma_d = \sigma_1 - 0.5 (\sigma_2 + \sigma_3) + \gamma z (1-k_0) \quad (4.18)$$

Kenlayer usa los tres esfuerzos normales  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  para reemplazar los esfuerzos principales  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ . Si el punto seleccionado para calcular el módulo está sobre el eje de simetría para rueda sola o sobre el plano de simetría entre dos ruedas duals, los tres esfuerzos, normales y los tres esfuerzos principales son idénticos.

En la figura 4.12, se muestra la relación general entre el módulo resiliente y el esfuerzo desviador del suelo fino obtenido de pruebas de laboratorio de carga repetida. El comportamiento bilinial puede ser expresado como:

$$E = K_1 + K_3 (K_2 - \sigma_1), \text{ cuando } \sigma_d < k_2 \quad (4.19)$$

$$E = K_1 + K_4 (\sigma_d - K_2), \text{ cuando } \sigma_d > k_2 \quad (4.20)$$

$K_1, K_2, K_3$  y  $K_4$  son constantes del material.

Thompson y Elliott (1985) presentan los valores del módulo resiliente en punto de quiebre de la curva bilineal, como se muestra en la figura 4.12 por  $K_1$ ; el módulo resiliente es un buen indicador de comportamiento, mientras las otras constantes  $K_2, K_3$  y  $K_4$  muestran una variabilidad menor y una respuesta de influencia del pavimento a un menor grado que  $K_1$ . El suelo fino clasificado que se muestra en la figura 4.13 es: muy blando, blando, medio y rígido; el módulo resiliente máximo es cuando el esfuerzo desviador es 2 psi (13.8 kPa) y los módulos resilientes mínimos son: 6.21 psi (42.8 kPa), 12.90 psi (89.0 kPa), 22.85 psi (157 kPa) y 32.8 psi (226 kPa) para los 4 tipos de suelo. Las ecuaciones 4.19 y 4.20 son incorporadas al modelo Kenlayer.

### Dos métodos de análisis de daño

Es conocido que la mayoría de los materiales granulares no pueden tomar ninguna tensión. Desafortunadamente, cuando son usados como una base o sub-base sobre una subrasante más débil, los esfuerzos horizontales en la parte inferior de estos materiales están más probables a tensión. Dos métodos han sido incluidos en Kenlayer para el análisis.

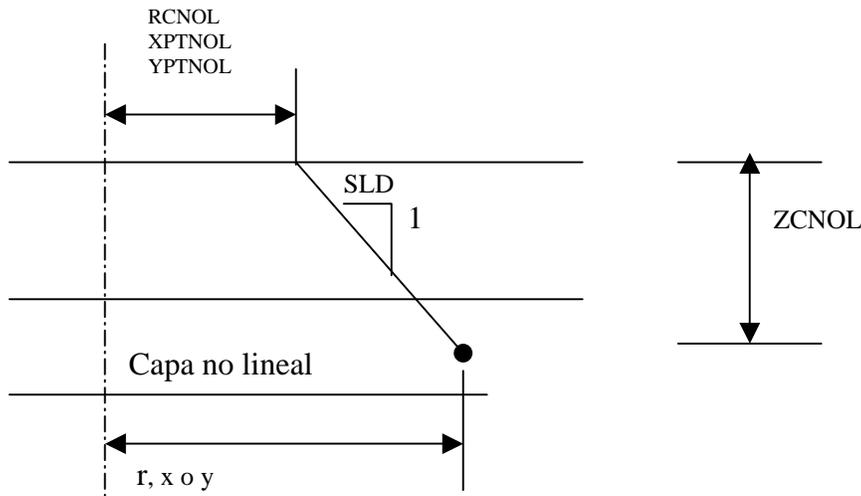
Método 1, la capa granular no lineal es subdividida en varias capas y los esfuerzos a la mitad de cada capa son usadas para determinar el módulo; si los esfuerzos horizontales incluyendo los esfuerzos geostáticos, es negativo o en tensión, es puesto a cero, esta modificación de esfuerzos es necesario para evitar  $\theta$  negativo; el método produce resultados más exactos pero requiere mucho más tiempo de cálculo.

Método 2, todo el material granular es considerado como una sola capa y un punto apropiado generalmente entre el cuarto superior y el tercero de la capa, es seleccionado para calcular el módulo; porque el punto está en la parte superior de la capa, la oportunidad de  $\theta$  negativo es raro, así ningún esfuerzo requiere modificación; si el resultado fuera negativo, un arbitrario o módulo mínimo (EMIN) es asignado. El método puede producir resultados comparables con una fracción de tiempo de cálculo requerido.

Si el método 1 con modificación de esfuerzos o método 2 sin modificación de esfuerzos al ser usados para capas granulares dependen de EMIN; si EMIN es especificado como 0, el método 1 es aplicado y ninguna tensión es admitida; si EMIN es no 0, el método 2 es usado sin modificación de esfuerzos.

### Puntos de esfuerzo para capa no lineal

El módulo elástico de capa no lineal es determinado en un punto de acuerdo a los esfuerzos encontrados; este punto es llamado punto de esfuerzos y es definido por un punto sobre la superficie de pavimento, una pendiente de distribución de carga SLD y una coordenada  $z$  (ZCNOL), como se muestra en la siguiente figura.



El punto sobre la superficie puede ser localizada por la coordenada radial RCNOL, para rueda sola o coordenada X y Y, XCNOL y YCNOL para rueda múltiple. Para un ZCNOL la coordenada r del punto de esfuerzo es:

$$R = RCNOL + (SLD) (ZCNOL) \quad (4.21)$$

Las coordenadas X y Y de los puntos de esfuerzo son:

$$X = XPTNOL + (SLD) (ZCNOL) \quad (4.22)$$

$$Y = YPTNOL + (SLD) (ZCNOL) \quad (4.23)$$

Si solamente el esfuerzo máximo, deformación o deflexiones son requeridas, entonces los puntos de esfuerzos pueden ser localizados bajo el centro de la rueda sola con RCNOL = 0 y SLD=0 o entre el centro de dos duals XPNOL = 0, YPTNOL = YW/2 y SLD= 0; YW es el espacio de centro a centro del duals como se muestra en la figura 4.14. Si el promedio de respuestas tal como la deflexión de un basal bajo un área circular es requerida, entonces use RCNOL = 0.5a, donde “a” es el radio de la área cargada y SLD = 0.25 es recomendado. Esto es basado sobre la presunción general que empezando desde la orilla de la área cargada, la carga es distribuida hacia abajo con una pendiente de 0.5, por tanto, a lo largo de la línea con XCNOL = 0.5a y SLD = 0.25 puede ser considerado como promedio de la zona de influencia para cargas de eje tándem, solamente la carga sobre un eje es usada para calcular el módulo, porque los ejes están separados y la zona de influencia no se sobreponen significativamente. Después los módulos son determinados, todas las cargas en el eje deberán ser usadas para el análisis.

#### DESCRIPCION DEL PROGRAMA DE COMPUTADORA

El programa Kenlayer es un procedimiento interactivo de cómputo y que puede ser aplicado a un máximo de 19 capas de un pavimento con salidas de 10 coordenadas radiales diferentes y 19 coordenadas verticales o un total de 190 puntos para ruedas múltiples, además de las 19 coordenadas verticales, las soluciones pueden ser obtenidas en un total de 25 puntos especificando las coordenadas X y Y de cada punto. Los tiempos de fluencia pueden ser

especificados en un máximo de 15 duraciones de tiempo. El análisis de daño puede ser hecho, dividiendo cada año en un máximo de 24 períodos, con cada grupos de cargas de 24 máximo, antes de operar Kenlayer el programa Layerinp de entrada debe ser operado, primero un conjunto de archivo de datos. Después de que un archivo ha sido establecido, Kenlayer puede ser operado, simplemente escribiendo. El programa pedirá un nombre de archivo y empezará la ejecución cuando el nombre del archivo sea ingresado.

#### 1.- Características generales.

La capacidad de Kenlayer puede ser demostrada por los siguientes parámetros de entrada que deben ser especificados en cada cálculo.

MATL= 1 para lineal elástico, 2 para elástico no lineal, 3 para lineal visco elástico y 4 para no lineal elástico y lineal visco elástico.

NDAMA= 1 con análisis de daño y 0 sin análisis de daño

NPY = Número de períodos por año

NLG= Número de grupos de carga

#### Materiales

Todas las capas son supuestas elásticas lineales con módulos elásticos constantes para el caso lineal elástico, las soluciones para ruedas múltiples son obtenidas por superposición de esas debido a ruedas solas. Para el caso elástico no lineal, el módulo elástico de algunas capas son dependientes del esfuerzo y estas capas deben ser identificadas.

Un procedimiento interactivo es usado, en el cual el módulo de capas no lineales se ajustan conforme varían los esfuerzos, mientras el módulo de las capas lineales permanecen igual. Durante cada iteración, un conjunto de módulos es calculado sobre la base de esfuerzos obtenidos de la iteración previa, así el problema es considerado lineal y el principio de superposición puede ser aplicado todavía a ruedas múltiples.

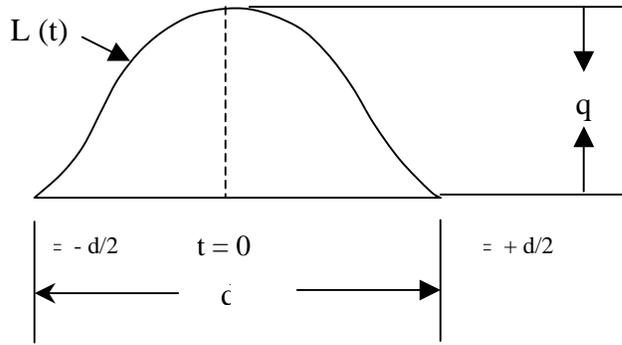
Después los esfuerzos debido a ruedas solas o múltiples son determinados, el módulo elástico de las capas no lineales es recalculado y un nuevo conjunto es determinado. El proceso es repetido hasta que el módulo converge a una tolerancia especificada.

Para el caso lineal visco elástico, las capas visco elásticas deben ser identificadas y los tiempos de fluencia especificados, mientras otras capas son lineal elásticas. Las soluciones atribuibles a las cargas móviles o estacionarias pueden ser obtenidas.

Las cargas móviles son basadas sobre una función cuadrática que es usada para el análisis de daño. Si las cargas estacionarias son especificadas, la solución es elástica que correspondan al tiempo de flujo especificado serán calculados en la última duración de tiempo y son usadas para el análisis de daño.

Para una combinación en un caso no lineal elástico y visco elástico lineal, algunas capas son elásticas no lineales, algunas son visco elásticas y las restantes si las hay elásticas lineales; sí solo

una capa es visco elástica, los esfuerzos de cada capa serán dependientes del tiempo. En los esfuerzos ha de usarse el módulo de la capa no lineal son los esfuerzos pico en el  $t=0$  bajo la carga móvil, como se muestra en la figura siguiente o los esfuerzos en el tiempo de duración última bajo la carga estacionaria.



### Análisis de daño

El análisis de daño sobre la base de deformación de tensión horizontal en la parte inferior de las capas especificadas, usualmente en HMA o capa 1 y la deformación compresiva de las partes superiores de las capas, generalmente la capa de subrasante o la capa más baja. En lugar de leer en las coordenadas de  $z$ , sólo especificar el número total de capas para tensión inferior (NLBT), el número total de capas para compresión superior (NLTC), el número de capa para tensión inferior (LNBT) y el número de capa para compresión superior (LNTC) el programa determinará la coordenada  $z$  de todos los puntos necesarios y calculará las deformaciones requeridas. Si algunos puntos de coordenadas radiales son especificados bajo rueda sola o algunos puntos de coordenadas  $X$  y  $Y$  bajo ruedas múltiples, el programa comparará las deformaciones en esos puntos y seleccionará los más críticos para el análisis de daño.

Cada año puede ser dividido en 24 períodos como máximo. El módulo elástico, coeficiente no lineal  $K_1$  y el momento de fluencia, puede ser diferente de período a período. El número pronosticado de las repeticiones de carga para cada grupo de carga especificado para cada período, el número admisible de repetición de carga para el agrietamiento de fatiga y para deformación permanente es determinado (ecuación 4.12 y 4.13). El módulo elástico de la capa visco elástica, se calculará con las siguientes expresiones:

$$E = [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)] / \epsilon_3 \quad (4.26)$$

$$E = [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] / \epsilon_1 \quad (4.27)$$

La relación de daño, en la cual la relación es entre el número de repeticiones pronosticadas y admisibles, además es calculada para cada grupo de carga en cada período y sumada a lo largo del año por:

$$Dr = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^m (n_{i,j}) / N_{i,j} \quad (4.28)$$

En la que  $D_r$  es la relación de daños al final de un año,  $n_{i,j}$  es el número pronosticado de repeticiones de carga para carga  $j$  en el período  $i$ ,  $N_{i,j}$  es el número admisible de repeticiones de carga para carga  $j$ ,  $p$  es el número de períodos en cada año y  $m$  es el número de grupo de carga. La vida de diseño que es igual a  $1/D_r$ , es evaluado tanto agrietamiento de fatiga como deformación permanente y el que tenga la vida menor controla el diseño.

#### Número de períodos por año

El número de períodos por año (NPY) es usado principalmente para el análisis de daño, cada año puede ser considerado como un período con las mismas propiedades de materiales durante todo el año o dividido en 4 estaciones, 12 meses o 24 períodos cada uno con un conjunto diferente de propiedades de materiales. Si ningún análisis de daños se hace o  $NDAMA = 0$ , NPY es especificado como 1 generalmente. Sin embargo, NPY puede ser más de 1, incluso sin ningún análisis de daño requerido. En este caso NPY debería ser interpretado como el número de propiedades del material de tal forma que varios conjuntos de propiedades de materiales pueden ser corridos uno después de otro.

#### Carga

Si una carga tiene ruedas solas o múltiples es identificada por un parámetro LOAD, con 0 para rueda sola, 1 para eje solo con rueda duals, 2 para ejes tánden y 3 para ejes triden. Las dos ruedas dual deben ser orientadas en la dirección y con espacio dual YW; si YW es especificado como 0 las cargas en eje tánden o triden son aplicadas sobre rueda sola, de lo contrario son aplicados en ruedas tánden.

Para carga de rueda sola, NR distancia radial y NZ distancia vertical debe ser especificada así la solución de puntos en NR x NZ pueden ser obtenidos. Kenlayer calcula todos los puntos al mismo tiempo, no importa cuantas coordenadas radiales y verticales son usadas para ahorrar el tiempo de computadora para la integración numérica, cada punto es examinado en busca de la convergencia. Si los resultados en cualquier punto en particular han convergido a la tolerancia deseada, no se realiza más integración en ese punto.

En ruedas múltiples en lugar de la distancia radial, las coordenadas X y Y de cada punto deben ser especificadas. En la figura 4.14, se muestra la vista de ruedas múltiples, en donde se observa la posición del origen de las coordenadas X y Y, el espaciado YW y XW en eje solo, ejes tánden y ejes triden y los puntos especificados para la solución del programa. Sobre la base de estas coordenadas las distancias verticales de cada punto para ruedas múltiples son determinadas y la solución debido a cargas de rueda sola es calculada al mismo tiempo. Estas soluciones son entonces superpuestas para obtener éstas, causada por ruedas múltiples.

#### Parámetros de entrada

Por facilidad de referencia, los parámetros de entrada son puestos en una lista en orden alfabético. Cualquier unidad puede ser usada mientras sea congruente; las unidades típicas en U. S. son: longitud en pulgadas; presión, esfuerzos y módulos en psi y la unidad de peso volumétrico en pci. En el Sistema Internacional (SI), la longitud en m, presión  $kN/m^2$  y la unidad de peso volumétrico en  $kN/m^3$ . Los valores de algunas constantes empíricas, tales coeficientes como  $n$  lineal y de fatiga, dependen de las unidades usadas y debe tenerse cuidado en su selección. La

dimensión máxima de cada selección es indicada y el parámetro que determina la dimensión real es indicado inmediatamente después de la definición:

BETA (19)	Use 0.113, es el coeficiente de cambio de temperatura para asfalto en caliente o pendiente de tiempo temperatura de la gráfica factor de rigidez contra de temperatura.
CP (24)	Presión del contacto sobre el área cargada circular (NLG).
CR (24)	Radio de contacto del área cargada circular (NLG)
CREEP (19,15,1)	Factores de fluencia de materiales visco elásticos a la temperatura de referencia (NL, NTYME, 1).
DEL	Tolerancia para integración, sugerido 0.001
DELNOL	Tolerancia para análisis no lineal, sugerido 0.01
DUR	Duración de cargas móviles, asigne 0 para carga estática, 0.1 para 40 mph y crece proporcionalmente con velocidad decreciente.
E (19, 24)	Módulo elástico de cada capa (NL, NPY), use como supuesto el módulo cuando la capa no es lineal, asigne 0 o cualquier valor para capa visco elástica.
EMIN (19, 24)	Módulo elástico mínimo de capa no lineal arcillosa o granular (NL, NPY) cuando la capa granular es subdividida en dos o más capas, EMIN debe ser especificado como 0, así ninguna tensión será admitida.
FT (5, 19)	Coefficientes de daño (5, NL) subíndice 1, 2 y 3 son los coeficientes de fatiga para tensión inferior y subíndice 4 y 5 son los coeficientes de deformación permanente para parte superior de compresión, valores sugeridos por el Instituto del Asfalto son 0.0796, 3.291, 0.854, $1.365 \times 10^{-9}$ y 4.477
GAM (19)	Peso volumétrico de cada capa (NL), sugeridos son 0.084 pci ( $22.8 \text{ kN/m}^3$ ) para HMA, 0.078 pci ( $21.2 \text{ kN/m}^3$ ) para material granular y 0.72 pci ( $19.6 \text{ kN/m}^3$ ) para suelo
ICL	Número máximo de integración de ciclos, sugerida 80
INT (18)	Condición de cada interfase (NL – 1), asigne 1 para interfase enlazada y 0 para interfase sin fricción.
ITENOL	Número máximo de iteración para análisis no lineal, sugerido 10
KO (19)	Coefficiente de presión de tierra en reposo (NL), sugerido 0.6 para material granular y 0.80 para material fino.
K <sub>1</sub> (19, 24)	Coefficiente no lineal de capa granular o módulo de punto quiebre para capa arcillosa.
K <sub>2</sub> (19)	Exponente no lineal para capa granular o esfuerzo desviador en punto de quiebre para capa arcillosa (NL).
K <sub>3</sub> (19)	Es la pendiente de la línea de la gráfica en donde relaciona el módulo resiliente y esfuerzo desviador para capa arcillosa cuando el fuerza desviador es más pequeño que K <sub>2</sub> (NL).

K <sub>4</sub> (19)	Es la pendiente de la línea de la gráfica en donde relaciona el módulo resiliente y esfuerzo desviador para capa arcillosa cuando el esfuerzo desviador es más grande que K <sub>2</sub> (NL).
LAYNO (19)	Número de capa no lineal en que el módulo elástico es dependiente de esfuerzo (NL).
LNBT (19)	Número de capas para análisis de daño de tensión inferior (NL).
LNTC (19)	Número de capas para análisis de daño de compresión (superior) (NL).
LNV (19)	Número de capa que es visco elástica (NL).
LOAD (24)	Tipos de cargas, 0 para eje solo con rueda sola, 1 para eje solo con rueda dual, 2 para ejes tándem y 3 para ejes triden (NLG).
MATL	Propiedades de materiales, 1 para lineal elástico, 2 para no lineal elástico, 3 para lineal visco elástico y 4 para combinación no lineal elástico y lineal visco elástico.
NCLAY (19)	Tipo de capa no lineal (NL), asigne 1 para capa arcillosa y 0 para capa granular.
NDAMA	Indice para análisis de daño, 1 con análisis de daño y 0 sin análisis de daño.
NBOND	Tipo de interfase entre dos capas, 1 cuando todas las capas son enlazadas y 0 cuando algunas interfaces son no enlazadas o sin fricción.
NL	Número total de capas, máximo 19.
NL BT	Número de capas para tensión inferior.
NL G	Número de grupos de capas, máximo 24
NLTC	Número de capas para compresión máxima.
NOLAY	Número de capas no lineales.
NPROB	Número de problemas para ser resueltos.
NPT (24)	Número de puntos en las coordenadas X y Y para ser analizadas bajo ruedas múltiples, máximo 25 (NLG).
NPY	Número de períodos por año, máximo 24
NR (24)	Número de distancia radial para ser análisis bajo rueda sola, máximo 10 (NLG).
NSTD	Clave de cálculo, 1 para desplazamiento vertical, 5 para desplazamiento vertical y cuatro esfuerzos y 9 para desplazamiento vertical, cuatro esfuerzos y cuatro deformaciones.
NTYME	Número de veces en el cual el efecto de fluencia puede ser suministrado, máximo 15, sugerido 11
NVL	Número de capas visco elásticas.
NZ	Número de distancia vertical para ser analizada, máximo 19. Asigne 0 cuando NDAMA = 1
PR (19)	Relación de Poisson de cada capa (NL) valores sugeridos son 0.35 para HMA y material granular y 0.45 para suelo fino.

RC (10, 25, 24)	Distancia radial o coordenada r, de cada punto para ser analizada (NR, NPT, NLG).
RCNOL	Coordenada radial en la superficie del pavimento, asigne 0 ó algún valor si no hay rueda sola. La misma RCNOL es usada para todos los grupos de carga con rueda sola.
RELAX (24)	Factor de relajación para análisis no lineal, sugerido 0.5 (NPY). El uso del factor de relajación es para asegurar la convergencia del módulo elástico. Si el resultado diverge, puede usarse un factor de relajación menor.
SLD	Es la pendiente de distribución de carga.
TEMP (19)	Temperatura del pavimento para cada capa visco elástica durante cada período (NL).
TEMREF (19)	Temperatura de referencia de cada capa visco elástica en la cual se determina el efecto de fluencia (NL).
TH (18)	Espesor de cada capa (NL – 1), el espesor de la última capa es infinita y no necesita ser ingresada.
TITLE	Cualquier título o comentario escrito dentro de las columnas de 1 a 80
TNLR (24, 24)	Número pronosticado total de repetición de cargas para cada grupo de carga en cada período (NPY, NLG).
TYME (15)	Tiempos en los que el efecto de fluencia son introducidos (NT Y ME), sugeridos los valores 0.001, 0.003, 0.01, 0.03, 1, 3, 10, 30 y 100
XPT (25)	Coordenadas x de los puntos para ser analizadas (NPT).
XPTNOL	Coordenada x del punto en la superficie del pavimento para calcular el módulo elástico de capa no lineal bajo ruedas múltiples, asigne 0 ó algún valor si no hay rueda múltiple. El mismo XPTNOL es usado para todos los grupos de carga con ruedas múltiples.
XW (24)	Espacio de centro a centro entre dos ejes a lo largo del eje x (NLG), asigne 0 si solamente existe un eje.
YPT (25)	Coordenadas y de los puntos para ser analizadas (NPT).
YPTNOL	Coordenada y del punto en la superficie del pavimento para calcular el módulo elástico de capa no lineal bajo rueda múltiple, asigne 0 ó algún valor si no hay rueda múltiple. El mismo YPTNOL es usado para todos los grupos de carga con ruedas múltiples.
YW (24)	Espacio de centro a centro entre dos ruedas duales a lo largo del eje y (NLG), asigne 0 si hay solamente rueda sola.
ZC (19)	Distancia vertical o coordenada z, de cada punto (NZ). Cuando el punto es localizado exactamente en la interfase entre dos capas, los resultados se tienen en la parte inferior de la capa superior. Si los resultados de la parte superior de la capa inferior baja son deseados, una coordenada z ligeramente más grande que 0.001 debe ser usada.

ZCNOL (19)      Coordenada z de los puntos para calcular el módulo elástico de la capa no lineal (NL), si la base o sub-base es subdividida en varias capas, los puntos son localizados en la mitad de cada capa con  $E_{MIN} = 0$ . Si la base o sub-base no es subdividida, el punto a un cuarto superior de la capa es usualmente usado con  $E_{MIN} > 0$ .

#### Archivo de datos

Tres tipos de formatos son empleados para la introducción de datos. Todos los enteros están en formatos I5 ocupando cada uno 5 columnas de un total de 80 columnas por cada línea, ya que todos los números reales están en formatos F10.5 o E10.3, ocupando cada uno 10 columnas; puede usarse el formato F o E para el caso de los números reales a los cuales se les asigna 10 columnas que incluyen el punto decimal. La razón es que F10.5 y E10.3 son especificados, esto es para organizar el archivo de datos de una manera ordenada para facilitar la verificación.

Para facilitar el ingreso y editar los datos, un programa fácil para el usuario es el llamado Layerinp que es usado, el programa emplea menús y formas para la entrada de datos para crear y editar un archivo.

El archivo de datos es puesto en lista y el archivo puede ser operado por Layerinp automáticamente o manualmente de acuerdo al formato dado. Emplear Layerinp, no es realmente necesario conocer el arreglo de datos y el formato requerido. La lista es útil a los usuarios con experiencia, quienes pueden editar los datos más oportunamente por otro tipo de editor, en vez de Layerinp. Cuando el archivo de datos es operado por Layerinp, cada línea es identificada al final por un número entre paréntesis, que indica el número de línea en la lista; comparando estos números, los datos que vayan a ser cambiados pueden ser fácilmente localizados. La lista también puede ser usada para verificar que estén correctos los datos del archivo sin emplear Layerinp.

El número de líneas indicadas en la lista es correcta, solamente cuando los datos dados pueden ser acomodados en una línea de 80 columnas, debe de continuar sobre la próxima línea hasta que los datos dados son agotados; si un asterisco aparece antes del número de paso, el paso puede ser omitido bajo la condición especificada.

#### Lista del archivo de datos.

- (1) 1 línea (I5) NPROB
- (2) 1 línea (80 columnas) título
- (3) 1 línea (4I5) MATL, NDAMA, NPY, NLG
- (4) 1 línea (F10.5) DEL; DEL = 0.001 sugerido
- (5) 1 línea (4I5) NL, NZ, ICL, NCTD, NZ = 0 cuando NDAMA = 1. ICL = 80 sugerido
- (6) 1 línea (8F10.5) [TH (I), I = 1, NL -1]
- (7) 1 línea (8F10.5), [PR (I), I = 1, NL]
- (8) 1 línea (F810.5) [ZC (I), 1 = 1, NZ], salte si NDANA = 1

- (9) 1 línea (I5) NBOND
- (10) 1 línea ( 16I5) [INT (I), I=1, NL -1], salte si NBOND = 1
- (11) NPY líneas (8E10.3) [E (I, J), I= 1, NL]. Cada período, como se indica con el subíndice J de 1 a NPY, debe de empezar con una nueva línea. Si E = 0 ó cualquier valor si la capa es visco elástica
- (12) Deben hacerse ciclos de carga de los pasos 13 a 21. El número de carga es indicado por el subíndice J el cual empieza de 1 a NLG. Note que XPT (I) y YPT (I) también varía con J; inmediatamente después de su entrada las distancias radiales RC (NR, NPT, J) y la dirección de cósenos son calculados, así no son necesarios de salvar XPT y YPT agregando el índice J.
- (13) 1 línea (I5) carga (J)
- (14) 1 línea (F10.5) CR (J), CP (J)
- (15) Si la carga (J) > 0, valla a (19)
- (16) 1 línea (I5) NR (J)
- (17) 1 línea (8F10.5) [RC (I, 1, J), I = 1, NR]
- (18) Vaya a (21)
- (19) 1 línea (I5) NPT (J)
- (20) 1 línea (8F10.5) XW(J), YW(J), [XPT (I), YPT (I), I = 1, NPT]
- (21) Vaya a (13) NLG veces, uno por cada carga
- (22) Si MATL = 1, vaya a (45)
- (23) Si MATL =2 ó 4, vaya a (25)
- (24) Si MATL =3, vaya a (36)
- (25) 1 línea (2I5) NOLAY, ITENOL, sugerido 10
- (26) 1 línea (16I5) [LAYNO(I), NCLAY(LAYNO(I)), I = 1, NOLAY]
- (27) 1 línea (8F10.5) [ZCNOL(I), I = 1, NOLAY]
- (28) 1 línea (5F10.5) RCNOL, XCNOL, YCNOL, SLD, DELNOL; DELNOL = 0.01 sugerido.
- (29) 1 línea (8F10.5) [RELAX(I), I=1, NPY], RELAX = 0.5 sugerido
- (30) 1 línea (8F10.5) [GAM(I), I = 1, NL], en el sistema inglés use libras por pulgada cúbica
- (31) Líneas NOLAY. Verifique si cada capa no lineal es de arcilla o material granular. Cada capa no lineal es indicada por el subíndice I de 1 a NOLAY, puede empezar con una nueva línea.  
Si NCLAY [LAYNO (I)] =0, o la capa es granular, cuando la línea 1 (2F10.5) K2 [LAYNO (I)], K0[LAYNO(I)]  
Si NCLAY [LAYNO (I)]=1 o la capa es arcillosa, cuando la línea 1 (4F10.5) K2 [LAYNO (I)], K3[LAYNO(I)], K4[LAYNO(I)], K0[LAYNO(I)].
- (32) Deben hacerse ciclos para períodos de los pasos 33 a 34, el número de período es indicado por el subíndice J de 1 a NPY

- (33) Líneas NOLAY. Verifique si cada capa no lineal es de arcilla o material granular. Cada capa no lineal es indicada por el subíndice I de 1 a NOLAY, puede empezar con una nueva línea.  
Si NCLAY [LAYNO(I)] = 0, o la capa es granular, cuando 1 línea (2E10.3) EMIN [LAYNO(I, J), K1(LAYNO(I, J))] si NCLAY[LAYNO(I)] = 1 o la capa es arcillosa. cuando la línea 1 (3E10.3) EMIN[LAYNO(I, J)], EMAX[LAYNO(I, J)], K1[LAYNO(I, J)]
- (34) Vaya a (33) NPY de veces, 1 para cada período
- (35) Si MATL = 2, vaya a (45)
- (36) 1 línea (F10.5) DUR, DUR = 0 para carga estacionaria.
- (37) 1 línea (16I5) NVL, [LNV(I), I = 1, NVL]
- (38) 1 línea (I5) NTYME
- (39) 1 línea (8F10.5) [TYME(J), J = 1, NTYME]
- (40) Deben hacerse ciclos para la capa visco elástica de los pasos 41 a 43. El número de capa visco elástica es indicada por el subíndice I de 1 a NVL
- (41) 1 línea (2F10.5) BETA[LNV(I), TEMPREF(LNV(I))]
- (42) 1 línea (8E10.3) CREEP[LNV(I), J ,1), J = 1, NTYME]
- (43) Vaya a (41) NVL veces, uno para capa visco elástica
- (44) NPY líneas (8F10.3) {TEMP[LNV(I)], I = 1, NVL}
- (45) Sí NDAMA = 0, vaya a (52)
- (46) 1 línea (2I5) NLBT, NLTC
- (47) 1 línea (16I5) [LNBT(I), I = 1, NLBT], salte si NLBT = 0
- (48) 1 línea (16I5) [LNTC(I), I = 1, NLTC], salte si NLTC = 0
- (49) NPY líneas (8F10.5) [TNLR (I, J), J = 1, NLG]. Cada período es indicado por el subíndice I de 1 a NPY, debe de empezar con una nueva línea. Si los valores son también grandes y no pueden ser acomodados por el formato F10.5, use otro formato con un punto decimal al final.
- (50) NLBT (3F10.5) (FT (1, I), FT(2,I), FT(3,I). cada capa es indicada por el subíndice I de 1 a LBT, debe de empezar con una nueva línea. Salte si NLBT = 0
- (51) NLTC líneas (E10.3, F10.5) FT(4, I), FT(5, I). cada capa es indicada por el subíndice I de 1 a NLTC, debe de empezar con una nueva línea. Salte si NLTC es = 0.
- (52) Vaya a (2) NPROB veces.

#### Salida impresa

Cada parámetro de entrada, después de ser leído, será impreso en una salida para su verificación. En la mayoría de los casos, la definición del parámetro en adición al nombre de la variable, es impresa para el fácil entendimiento; la salida es guardada automáticamente en un archivo llamado layer.TXT. Este archivo será destruido y reemplazado por un nuevo archivo, siempre que Kenlayer es operado otra vez; si se quiere guardar el archivo se debe cambiar el nombre.

## Rueda sola contra rueda múltiple

La forma de la salida depende de si las cargas solas o múltiples son especificadas. Los esfuerzos, deformaciones y los desplazamientos, son guardados en STD (10, 19, 9) para la carga sola y en STD (1, 19, 9) para cargas múltiples. El primer subíndice indica el número de coordenadas radiales, el segundo indica el número de coordenadas verticales y el tercero indica el tipo de esfuerzo, deformación y desplazamiento.

Los puntos bajo cargas múltiples no son identificados por coordenadas radiales, así que el primer subíndice es siempre 1. Estos puntos son identificados por números de puntos definidos por las coordenadas X y Y. El cálculo es llevado a cabo de punto a punto. Tan pronto como los valores de STD (1, 19, 9) son determinados en un punto dado, serán impresos y comparados con los resultados previos para determinar el máximo para el análisis de daño. El programa irá al próximo paso hasta que todos los puntos sean completados; en contraste, para el caso de una rueda sola en la que todos los puntos de varias coordenadas radiales son calculados e impresos al mismo tiempo.

El tercer subíndice de STD es definido de manera diferente para ruedas solas y múltiples, para una rueda sola, 1 subíndice significa el desplazamiento vertical, 2 el esfuerzo vertical, 3 el esfuerzo radial, 4 el esfuerzo tangencial, 5 el esfuerzo cortante, 6 la deformación vertical, 7 la deformación radial, 8 la deformación tangencial y 9 la deformación por cortante. Para ruedas múltiples, 1 subíndice significa el desplazamiento vertical, 2 el esfuerzo vertical, 3 el esfuerzo principal mayor, 4 el esfuerzo principal medio, 5 el esfuerzo principal menor, 6 la deformación vertical, 7 la deformación principal mayor, 8 la deformación principal menor y 9 la deformación principal horizontal. Si NSTD=1, solamente los desplazamientos serán calculados; si NSTD=5, solamente un desplazamiento y cuatro esfuerzos serán calculados en cada punto y si NSTD=9, todos los términos serán calculados. En la mecánica de suelos es empleado como positivo la compresión y la tensión como negativo.

## Tipos de análisis

Durante la ejecución del programa, alguna información será impresa sobre la pantalla para mostrar que el programa está corriendo. Cada vez que Layers de subrutina es ejecutado, el número real de los ciclos IC, para la integración numérica es impresa sobre la pantalla; esta cantidad debe ser más pequeña que el ICL máximo especificado; de lo contrario los resultados no han convergido. Si el problema no es lineal, el módulo elástico previo y nuevo de cada capa no lineal será impreso sobre la pantalla durante cada interacción. Este módulo debe ser cuidadosamente buscado para la convergencia. Si el módulo diverge, el programa debe ser parado y un factor de relajación más pequeño es empleado. Cuando una corrida es terminada, pero el módulo no ha convergido a una precisión deseada, una nueva corrida con el módulo elástico de la última corrida como el módulo elástico supuesto. Las salidas para sistemas elásticos no lineales son las mismas para sistemas elásticos lineales, excepto que el esfuerzo geostático en cada punto de esfuerzo el módulo elástico de todas las capas no lineales de cada iteración y los tres esfuerzos normales para evaluar el módulo de la capa granular son impresos.

En el caso de sistemas visco elásticos sometidos a cargas móviles, la salida es la misma que para el caso del sistema elástico. Sin embargo, si la carga es estacionaria, la solución en cada duración de tiempo será impresa. Si se requiere de un análisis de daño la deformación crítica de cada capa

especificada junto con el número permisible de repeticiones y relaciones de daño, es impreso para cada grupo de cargas en cada período; las relaciones de daño al final de un año, la relación de daño máxima y la vida de diseño en años también son impresas. Información tomada de la referencia 25.

### **Aplicación del método en el subtramo de la autopista México- Querétaro**

Información del subtramo:

Autopista conformada de dos cuerpos A y B, en cada cuerpo se tienen tres carriles de circulación.

Tipo de carretera: de altas especificaciones

Coefficiente direccional: 0.50

Coefficiente de distribución en el carril de proyecto: 0.70

Período de diseño (n): 20 años

Tasa de crecimiento (r): 5.00 %

Tránsito promedio diario anual (TPDA): 30 784 vehículos en ambos sentidos

Composición vehicular: A2=56.50%, B2=5.00%, B3=1.00%, B4=0.40%, C2=7.30%, C3=8.10%, T2-S2=0.30%, T3-S2=15.40%, T3-S3=2.40%, T3-S2-R2=1.10% y T3-S2-R4=2.50%

Tránsito promedio diario anual en el carril de diseño: 10 774

Grupos de carga: C2, C3 y T3-S2

Porcentaje de vehículos pesados del grupo de carga: 30.80%

Número de grupos de carga: 2

Grupo de carga número 1: 4 áreas de contacto

Radio de contacto: 4.97 pulgadas

Presión de contacto: 85.5 psi

Espaciamiento de las ruedas (XW): 48 pulgadas

Espaciamiento de las ruedas (YW): 13.5 pulgadas

Grupo de carga número 2: 2 áreas de contacto

Radio de contacto: 6 pulgadas

Presión de contacto: 85.5 psi

Espaciamiento de las ruedas (XW): 0.00

Espaciamiento de las ruedas (YW): 13.5 pulgadas

Temperaturas de la capa visco elástica: 50, 60, 70 y 81 °F

### **DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO**

Con la información del tránsito del subtramo de la autopista, parte de los datos de la estructura actual, los avances tecnológicos referentes a materiales naturales y estabilizados, así como los requisitos que deben cumplir los materiales de acuerdo a la normativa SCT y de acuerdo con los resultados obtenidos en el diseño de la estructura del pavimento, se presentan las siguientes alternativas de solución I, II, III, IV y V.

## Resultados del diseño estructural del pavimento:

### ALTERNATIVA I.

Número pronosticado de repetición de carga: 48 000

Relación de daño: 0.2717E-01, repetición de carga admisible: 0.1061E + 08 parte inferior de la capa 1

Relación de daño: 0.4623E-01, repetición de carga admisible: 0.5822E + 07 parte superior de la capa 4

Relación de daño máxima: 0.4623E-01

Vida de diseño: 21.63 años

Capa	E psi	$\epsilon_t$	$\epsilon_c$	$D_r$	Espesor cm
Carpeta	426 682	-0.1175E-03		0.4525E-02	25.00
Base hidráulica	54 046				20.00
Sub-base	42 668				20.00
Subrasante	12 516		0.3227E-03	0.8245E-02	40.00

### ALTERNATIVA II.

Número pronosticado de repetición de carga: 48 000

Relación de daño: 0.5492E-04, repetición de carga admisible: 0.8740E + 09 parte inferior de la capa 1

Relación de daño: 0.9345E-02, repetición de carga admisible: 0.5136E + 07 parte superior de la capa 4

Relación de daño máxima: 0.4693E-01

Vida de diseño: 21.31 años

Capa	E psi	$\epsilon_t$	$\epsilon_c$	$D_r$	Espesor cm
Carpeta	426 682	-0.2951E-04		0.5492E-04	10.00
Base estabilizada con emulsión asfáltica	284 500				27.00
Sub-base	42 668				20.00
Subrasante	12 516		0.3319E-03	0.9345E-02	40.00

### ALTERNATIVA III.

Número pronosticado de repetición de carga: 48 000

Relación de daño: 0.3851E-05, repetición de carga admisible: 0.1246E + 11 parte inferior de la capa 1

Relación de daño: 0.9955E-02, repetición de carga admisible: 0.4822E + 07 parte superior de la capa 4

Relación de daño máxima: 0.4850E-01

Vida de diseño: 20.62 años

Capa	E psi	$\epsilon_t$	$\epsilon_c$	$D_r$	Espesor cm
Carpeta	497 795	-0.1161E-04		0.3851E-05	10.00
Base estabilizada con cemento asfáltico	426 682				21.00
Sub-base	42 668				20.00
Subrasante	12 516		0.3366E-03	0.9955E-02	40.00

### ALTERNATIVA IV.

Número pronosticado de repetición de carga: 48 000

Relación de daño: 0.4962E-04, repetición de carga admisible: 0.9191E + 13 parte inferior de la capa 1

Relación de daño: 0.4891E-01, repetición de carga admisible: 0.4815E + 07 parte superior de la capa 4

Relación de daño máxima: 0.4891E-01

Vida de diseño: 20.44 años

Capa	E psi	$\epsilon_t$	$\epsilon_c$	$D_r$	Espesor cm
Carpeta con polímero	568 909	-0.1118E-05		0.5222E-08	10.00
Base estabilizada con cemento asfáltico y polímero	497 795				20.00
Sub-base	42 668				20.00
Subrasante	12 516		0.3367E-03	0.9968E-02	40.00

ALTERNATIVA V.

Número pronosticado de repetición de carga: 48 000

Relación de daño: 0.4913E-04, repetición de carga admisible: 0.4754E + 07 parte inferior de la capa 1

Relación de daño: 0.4658E-01, repetición de carga admisible: 0.5198E + 07 parte superior de la capa 4

Relación de daño máxima: 0.4913E-01

Vida de diseño: 20.35 años

Capa	E psi	$\epsilon_t$	$\epsilon_c$	$D_r$	Espesor cm
Carpeta de riegos o carpeta delgada de 3 cm.					
Base estabilizada con cemento Pórtland	853 400	-0.1253E-03		0.1000E-01	26.00
Sub-base	42 668				16.00
Subrasante	12 516		0.3310E-03	0.9234E-02	40.00

En las figuras D.3 a D.7 del anexo D, se presentan los diagramas de flujo de los sistemas: elástico lineal, lineal visco elástico, no lineal elástico, la combinación no lineal elástico y lineal visco elástico, así como el análisis de daño.

## 4.3 Pavimento por catálogo

### 4.3.1 Secciones de firmes del catálogo de España

En mayo de 1989 se publicó en España la orden en donde se aprobó la instrucción 6.1 y 2.1 C de la Dirección General de Carreteras, dependiente del Ministerio de Obras Públicas (MOPU), por catálogo de Secciones para pavimentos flexibles y rígidos y que se utilice en los proyectos de construcción de carreteras o reconstrucción de los mismos; en noviembre del 2003, se aprueba la norma 6.1.1.C (secciones de firme) de la instrucción de carreteras para su aplicación en los proyectos y en las obras de firmes de nueva construcción, de acondicionamiento o reconstrucción de firmes existentes.

El catálogo de secciones de firme considera el tránsito pesado, el estado físico de las carreteras de España, la evolución tecnológica de los materiales y sistemas constructivos de pavimentos flexibles o rígidos; en este trabajo se hará mención únicamente de pavimentos de tipo flexible. El catálogo presenta una amplia gama de soluciones para las diferentes categorías de tránsito pesado y explanadas.

El objeto del catálogo es el establecimiento de criterios básicos que deben de considerarse en el proyecto y construcción de carreteras, presentándose una metodología de proyecto que facilita y simplifica el trabajo del ingeniero proyectista. En la selección de la sección estructural del firme (pavimento) debe ser la más adecuada tomando, en cuenta los procedimientos constructivos, material disponible de la zona y seguridad vial en la circulación; además realizar un estudio de costos de construcción y conservación de la obra vial.

Para la aplicación del catálogo de secciones en carreteras, se consideran los siguientes factores para su diseño.

#### 1. Categorías de tránsito pesado

Para el diseño de secciones estructurales de pavimentos flexibles, el método toma en cuenta los vehículos pesados, aquéllos que tiene una carga útil mayor de 3 toneladas. Las categorías de tránsito pesado contempladas son desde T00 a T42, con intensidades de medias diarias de vehículos pesados entre 25 y mayores de 4 000 sobre el carril de diseño.

La sección estructural del firme depende de la intensidad media diaria de vehículos pesados (IMDp), que se prevé en el carril de proyecto en el año de puesta en servicio la carretera; la evaluación de IMDp será a partir de aforos vehiculares de la proporción de vehículos pesados, especialmente de tránsito inducido. Cuando no se dispone de datos confiables del aforo, se asigna lo siguiente:

En superficies de rodadura (rodamiento) de los carriles y doble sentido de circulación, incide sobre cada carril la mitad de los vehículos pesados.

En superficie de rodadura de dos carriles de sentido de circulación, incide sobre el exterior todos los vehículos pesados que circulan en el sentido considerado.

En superficie de rodadura de tres o más carriles por sentido de circulación, incide sobre el exterior el 85% de los vehículos pesados que circulan en el sentido considerado.

Para los efectos de aplicación de este método, se definen ocho categorías de tránsito pesado, en función de la intensidad media diaria de vehículos pesados (IMDp), en el carril de proyecto y en el año de la puesta en servicio la carretera, como se presenta a continuación.

Categorías de tráfico pesado T00 a T2

Categoría de tráfico pesado	T00	T0	T1	T2
IMDp (vehículos pesados/día)	$\geq 4\ 000$	$< 4\ 000$ $\geq 2\ 000$	$< 2\ 000$ $\geq 800$	$< 800$ $\geq 200$

Categorías de tráfico pesado T3 a T4

Categoría de tráfico pesado	T31	T32	T41	T42
IMDp (vehículos pesados/día)	$< 200$ $\geq 100$	$< 100$ $\geq 50$	$< 50$ $\geq 25$	$< 25$

2. Explanada (Subrasante)

El catálogo establece tres categorías de explanada, denominadas E1, E2 y E3 respectivamente. Estas categorías se determinan según el módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga ( $E_{v2}$ ), cuyos valores son:

Categoría de explanada	E1	E2	E3
$E_{v2}$ (MPa)	$\geq 60$	$\geq 120$	$\geq 300$

La formación de la explanada de las diferentes categorías se presenta en la figura 4.15, dependiendo del tipo de suelo de la explanación o de la obra del material subyacente y de las características y espesores de los materiales disponibles. En las explanadas se consideran los siguientes tipos de suelos: inadecuados y marginales (IN), tolerables (0), adecuados (1), seleccionados (2), seleccionados con  $CBR \geq 20$  en condiciones y puestas en obra (3) y roca (R); salvo justificación se acepta proyecto una capa estabilizada con cal de 15 cm de espesor, geotextil, membrana plástica, etc., entre los suelos inadecuados o marginales con finos plásticos y las capas de suelo adecuado o seleccionado para la formación de explanadas tipo E2 y E3 en las categorías de tránsito pesado T00 a T2.

Los materiales para la formación de la explanada se presentan a continuación.

Símbolo	Definición de material	Artículo del PG-3	Prescripciones complementarias
IN	Suelo inadecuado o marginal	330	Su empleo sólo será posible si se estabiliza con cal o con cemento para conseguir S-EST1 o S-EST2.
0	Suelo tolerable	330	CBR $\geq$ 3* Contenido en material orgánico <1%. Contenido de sulfatos solubles (SO <sub>3</sub> ) <1%. Hinchamiento libre <1%.
1	Suelo adecuado	330	CBR $\geq$ 5* **
2	Suelo seleccionado	330	CBR $\geq$ 10* **
3 S-EST1 S-EST2 S-EST3	Suelo seleccionado Suelo estabilizado in situ con cemento o con cal.	330 512	CBR $\geq$ 20* Espesor mínimo: 25 cm. Espesor máximo: 30 cm.

\* El CBR se determinara de acuerdo con las condiciones especificadas de puesta en obra y su valor se empleará exclusivamente para la aceptación o rechazo de los materiales utilizables en las diferentes capas, de acuerdo con la figura 4.16

\*\* En la capa superior empleadas para la formación de la explanada, el suelo adecuado definido como tipo 1 deberá tener, en las condiciones de puesta de obra, un CBR  $\geq$  6 y el suelo seleccionado definido como tipo 2 un CBR  $\geq$  12. Asimismo, se exigirán esos valores mínimos de CBR cuando, respectivamente, se forme una explanada de categoría E1 sobre suelos tipo 1, o una explanada de categoría E2 sobre suelos tipo 2.

### 3. Secciones de firme

Para el diseño de las secciones de firme, por el procedimiento más generalizado, se basa fundamentalmente en las relaciones en cada tipo de sección estructural entre las intensidades del tránsito pesado y los niveles de deterioro admisibles al final de la vida útil.

En la figura 4.16 y 4.17, se presentan las secciones de firme según la categoría de tránsito pesado y la categoría de la explanada. Entre las posibles soluciones se seleccionará en cada caso específico la técnica más adecuada y económica. Los espesores de cada capa se consideran mínimos en cualquier punto de la sección transversal del carril de proyecto. Los materiales probables a utilizar en la selección de la sección del firme, se muestra en la tabla 4.5 las características de los materiales del firme.

Características de las mezclas bituminosas (asfálticas) en caliente.

Para la elección del tipo de lígate bituminoso, así como la relación entre su dosificación en masa y la del polvo del mineral, se tendrá en cuenta la zona térmica y además los siguientes apartados 6.2.1.1, 6.2.1.2 y 6.2.1.3 que se describen.

6.2.1.1. Espesor de las capas de mezcla bituminosa. Los espesores de capa serán determinados por los valores de la siguiente tabla.

Tipo de capa	Tipo de mezcla	Categoría de tráfico pesado		
		T00 a T1	T2 y T31	T32 y T4 (T41 y T42)
Rodadura.	PA	4		
	M	3	2-3	
	F			
	D y S		6-5	5
Intermedia.	D y S	5-10**		
Base.	S y G	7-15		
	MAM	7-13		

\* Ver definiciones en tabla 5 o artículos 542 y 543 del PG-3

\*\* Salvo en arcenes, para los que se seguirá lo indicado en el apartado 7

### 6.2.1.2 capas de rodadura de mezcla bituminosa.

Las capas de rodadura estarán constituidas por una mezcla bituminosa drenante (PA), mezcla bituminosa discontinua tipo M o F, tipo denso (D) y semi denso (S). Para las categorías de tránsito pesado T00 y T1 se emplearán las mezclas bituminosas descontinuas en caliente tipo M o bien las drenantes que no tengan problemas de condiciones pluviométricas y de la intensidad de la circulación vehicular. Se recomiendan las mezclas drenantes en zonas sin problemas de nieve o de formación de hielo,  $IMD_p \geq 5000$  vehículos/día y con un régimen de lluvias constantes que facilite la limpieza, altitudes menores de 1200 m y ni cuando el tramo a proyectar esté comprendido en zonas pluviométricas poco lluviosas.

### 6.2.1.3 mezclas bituminosas de alto módulo (MAM).

En las secciones cuyo espesor total de mezcla bituminosa en caliente según el catálogo, sea  $\geq$  a 25 cm y cuya explanada sea de categoría E3 y E2, se puede emplear mezcla bituminosa de alto módulo (MAM), pudiéndose reducir hasta un 20% el espesor de la capa de base; el empleo se puede contemplar en las secciones 0032, 031, 121, 131 y 221 de acuerdo a las figuras 4.16 y 4.17

En general, el catálogo de secciones de firme recomienda: para tránsito pesado T00, T0 y T1 con  $IMD_p \geq 800$  vehículos pesados en el carril de diseño, se utilicen mezclas asfálticas en caliente o concreto hidráulico para la superficie de rodamiento en los casos de tránsito pesados T2, T31 y T32 ( $IMD_p$  entre 50 y 800) permite el empleo de mezclas asfálticas en frío o en caliente y para el tránsito pesado T41 y T42 ( $IMD_p < 50$ ) se permite mezcla bituminosa de 5 cm de espesor o un tratamiento superficial de un riego con gravilla bicapa.

## Aplicación del método en el subtramo de la autopista México-Querétaro

Autopista conformada de dos cuerpos A y B, en cada cuerpo se tienen 3 carriles de circulación tipo de carretera: de altas especificaciones

Período de diseño (n): 20 años

Tasa de crecimiento: (r) 5%

Tránsito promedio diario anual (TPDA): 30784 en ambos sentidos

Tránsito pesado vehículos en ambos sentidos: 43. 50%; 5 691 vehículos en el carril de proyecto

Características de la capa de sub-rasante (Explanada) VRS = CBR = 26% y E = 880 kg/cm<sup>2</sup>

### DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

Se obtiene:

La intensidad de tránsito pesado por día (IMDP), donde:

$IMDp = (TPDA/2 \times \% \text{ de tránsito pesado} \times \% \text{ de vehículos de incidencia en el carril de diseño})$

$IMDp = (30\ 784/2 \times 0.435 \times 0.85) = 5\ 691$  vehículos IMDp=5 691 vehículos en el carril de diseño, de acuerdo con este dato, se trata de un tránsito pesado T00.

Se determina el tipo de explanada, como E= 880 kg/cm<sup>2</sup>; haciendo la conversión en MPa, E=86.29 MPa, se trata de una explanada E1; para el tipo de tránsito pesado la E1 no es adecuada, utilizando la sub-base existente como explanada, se tiene que: E=3 000 kg/cm<sup>2</sup>, haciendo la conversión, E=300 MPa, por tanto se trata de la explanada E3.

Se selecciona el tipo de sección del firme de la figura 4.16 con los datos de T00 y E3 y se obtiene el siguiente resultado.

capa	Alternativas	
	Sección 0032	Sección 0033
Mezcla bituminosa	25	20
Grava cemento	-	22
Suelo cemento	30	25

Usando la terminología de México y acondicionando las capas del pavimento se tiene:

capa	Alternativas	
	I (espesor cm)	II (espesor cm)
Carpeta asfáltica	25	20
Base estabilizada con cemento Pórtland	-	22
Sub-base estabilizada con cemento Pórtland	30	25

## RESUMEN

En la siguiente tabla, se muestra el resumen de los espesores de capas del pavimento, alternativas analizadas y métodos aplicados.

ALTERNATIVA	CAPA	ESPESTORES, EN CM.				
		DISPAV-5 UNAM	AASHTO	KENLAYER	CATÁLOGO ESPAÑOL	
I	Carpeta	25	21	25		
	Base hidráulica	18	18	20		
	Sub-base	15	20	20		
II	Carpeta	10	10	10		
	Base estabilizada con asfalto	25	33	27		
	Sub-base	15	20	20		
III	Carpeta	10	10	10		
	Base estabilizada con asfalto	20	30	21		
	Sub-base	15	19	20		
IV	Carpeta y polímero	10		10		
	Base estabilizada con asfalto y polímero	18		20		
	Sub-base	15		20		
V	Carpeta		15	*	25	20
	Base estabilizada con cemento Pórtland		30	26	-	22
	Sub-base		20	16	30**	25**

\* Microcarpeta (carpeta delgada), sin valor estructural

\*\* Capa estabilizada con cemento Pórtland

Los métodos analizados y aplicados en este capítulo fueron:

DISPAV-5, versión 2 del Instituto de Ingeniería de la UNAM y AASHTO versión 1993. Son métodos que de acuerdo con su clasificación se consideran de regresión, dado que el diseño es función de los resultados obtenidos en tramos de pruebas y sus limitaciones son aplicables para esas condiciones de pruebas.

El método KENLAYER de acuerdo con su clasificación se considera mecanicista, el diseño es función de la mecánica de los materiales que conforman la estructura del pavimento y sus limitaciones requieren de una calibración del comportamiento real observado. Asume las hipótesis de teorías de la elasticidad lineal, no lineal y visco elasticidad.

Las secciones de firmes del catálogo de España, es basado en la experiencia local de la configuración de la estructura de los firmes construidos y cálculos analíticos, considerando las categorías del tránsito pesado y el tipo de explanada.

En la siguiente tabla se presenta en forma general las ventajas y desventajas que se observaron en la aplicación de los métodos en el subtramo de la autopista México Querétaro.

<b>MÉTODO</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
DISPAV-5 versión 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Considera modelos elasto-plástico y elásticos para deformación permanente y de fatiga.</li> <li>-Es un programa de computación iterativo de fácil aplicación.</li> <li>- En el diseño acepta módulos de resiliencia mayores de 450 000 psi.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Considera únicamente 5 capas.</li> <li>-No toma en cuenta capas rigidizadas con cemento Pórtland.</li> <li>-Se debe aplicar un control de calidad riguroso de los materiales en el proceso constructivo.</li> <li>-Generalmente para la capa de sub-base y subrasante requiere en el diseño el mínimo espesor especificado.</li> <li>-En el programa no se puede obtener directamente la vida previsible, cuando ésta es &gt; de 150.</li> </ul>
AASHTO (1993)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Es aplicable a pavimentos flexibles para capas estabilizadas con asfalto o cemento Pórtland.</li> <li>-Es un programa de computación iterativo de fácil aplicación.</li> <li>-Presenta períodos de diseño hasta 50 años.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Requiere mayor cantidad de pruebas de laboratorio para la obtención del módulo de resiliencia de la capa de subrasante en el año.</li> <li>-En el diseño no admite módulos de resiliencia mayores 450 000 psi.</li> <li>-Al diseñar las capas superiores con módulos de resiliencia cercanas 450 000 psi, se requiere estabilizar la capa de subrasante o de cimentación, para aumentar su módulo resiliente.</li> </ul>
KENLAYER	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Es aplicable a pavimentos flexibles para capas: lineal elásticos, no lineal elástico, lineal visco elástico y la combinación lineal elástico y visco elástico.</li> <li>- En el diseño acepta módulos de resiliencia mayores de 450 000 psi.</li> <li>-Considera número de períodos por año y diferentes temperaturas en la obtención del módulo resiliente de la capa visco elástica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-No existe la opción en el diseño de carpeta asfáltica y capa rigidizada con cemento Pórtland.</li> <li>- Se debe seleccionar en forma adecuada el número de grupos de carga y el número de repeticiones de carga pronosticado, dado que se puede sub-diseñar o sobre diseñar la estructura del pavimento.</li> <li>- El programa de computadora no es de fácil aplicación, se requiere de mayor experiencia.</li> <li>-No es común su aplicación en el diseño de pavimentos, ya que el modelo implica la aceptación de las hipótesis de la teoría de la elasticidad y visco elasticidad.</li> <li>-Para carpetas asfálticas menores delgadas, los esfuerzos de tensión y la predicción por agrietamiento por fatiga pueden ser no reales.</li> </ul>
CATÁLOGO ESPAÑOL	<ul style="list-style-type: none"> <li>-La selección de la sección del firme, se obtiene conociendo el tránsito de diseño en el carril de diseño y el tipo de explanada.</li> <li>-No se requiere de experiencia y de análisis teóricos para aplicar el catálogo de firmes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-En las alternativas de solución, se presenta la capa de sub-base estabilizada con cemento Pórtland, la cual no se requiere.</li> <li>-Para el tipo de tránsito pesado T00, se requiere utilizar una explanada E1 con calidad de sub-base; se utilizó la existente.</li> <li>-El tránsito en ejes sencillos es de 12 toneladas.</li> </ul>

**ELIMINACIÓN DE ALTERNATIVAS.** Con la finalidad de obtener las alternativas viables de los métodos aplicados de acuerdo con sus resultados, estructura existente del pavimento y aplicación de la normativa SCT se tiene:

En la alternativa I, la base hidráulica existente **no cumple normas de calidad** como se mencionó en el capítulo 3, su espesor promedio es de 20 cm. Para que cumpla las normas de calidad se requiere hacer estudio de mezclas, agregando material de banco La Cruz, ubicado en la autopista México Querétaro, km 113+200, L/I producto de trituración total en proporción adecuada de un 50 a 60%. Para ello, es necesario abrir caja hasta la profundidad de la sub-base existente y desechar el material recuperado de la carpeta asfáltica, dado lo anterior el costo de la construcción de la base hidráulica se elevaría por la trituración total del material, acarreos, sobre acarreos y retiros de la carpeta asfáltica, la cual varía en espesor de 21 a 25 cm, por tanto, se estima que esta alternativa no es adecuada.

En la alternativa II y III, se observa que son viables, ya que la base hidráulica existente se puede estabilizar con asfalto, sus finos son del orden del 12% en promedio, al aumentar el porcentaje de cemento asfáltico en la alternativa III los espesores de la base estabilizada disminuyen en 9 a 23% con respecto a la alternativa II; en el capítulo 5 se hará su evaluación económica respectiva.

En la alternativa IV, al utilizar polímeros en la carpeta asfáltica y base estabilizada con asfalto, la reducción de espesores es del orden del 5%, la cual no es significativa; para obtener módulos resilientes de 35 000 y 40 000 kg/cm<sup>2</sup>, se necesita material de banco de trituración total de mejor calidad del banco La Cruz, el cual no se encuentra en la zona de estudio, además el porcentaje de polímeros aumentaría, por tanto, esta alternativa se considera no adecuada ya que elevaría sus costos considerablemente.

En la alternativa V, los resultados del catálogo de firmes de España, presenta que se debe tener una sub-base y base estabilizada con cemento Pórtland y carpeta asfáltica, además se utiliza la sub-base existente como explanada, por lo que la estructura del pavimento es de mayor espesor y sería de más costo; por lo que se analizaran los resultados obtenidos por los métodos de AASHTO y KENLAYER.

En base con lo anterior y para fines de la evaluación económica, la alternativa II se denominará alternativa A, la alternativa III se denominará alternativa B y la alternativa V se denominará alternativa C. En la siguiente tabla se presentan las alternativas y propuesta.

Alternativa	Capa	Espesores, en cm.			
		DISPAV-5 UNAM	AASHTO	KENLAYER	PROPUESTA
A	Carpeta	10	10	10	10
	Base estabilizada con emulsión asfáltica	25	33	27	28
	Sub-base	15	20	20	20
B	Carpeta	10	10	10	10
	Base estabilizada con cemento asfáltico	20	30	21	24
	Sub-base	15	19	20	20
C	Carpeta		15	*	10
	Base estabilizada con cemento Pórtland		30	26	28
	Sub-base		20	16	20

\* Microcarpeta (carpeta delgada), sin valor estructural

La propuesta de las alternativas A, B y C, se tomaron con base a las teorías, ventajas, desventajas, resultados y en función de su número estructural equivalente (SN) que se presenta a continuación de los métodos aplicados.

Alternativa	Espesor total, en cm.	Número estructural equivalente SN			
		DISPAV-5 UNAM	AASHTO	KENLAYER	PROPUESTA
A	50, 63, 57 y 58	5.33	6.72	6.08	6.19
B	45, 59, 51 y 54	5.10	6.69	5.78	6.12
C	- 65, 45 y 58		6.72	4.65	6.00

**AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

**T A B L A S**

**Y**

**F I G U R A S**

**AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

**TABLA 4.1 Pesos bruto vehiculares legales, promedio sobrecargados y máximo registrados en la red federal de carreteras mexicanas (IMT, 1995)**

VEHÍCULOS TIPO	PESO BRUTO VEHICULAR (PBV, t)					
	LEGAL		PROMEDIO SOBRECARGADO		MÁXIMO REGISTRADO	
	1980	1994	W	%	W	%
Camión C-2	15,5	17,5	24,0	37%	24,0	37%
Camión C-3	23,5	26,0	28,0	8%	36,0	38%
Tractocamión T3-S2	41,5	44,0	49,0	11%	60,0	36%
Tractocamión T3-S3	46,0	48,5	59,0	22%	72,0	48%
Tractocamión T-3-S2-R4	77,5	65,5	79,0	21%	84,0	28%

**TABLA 4.2 Composición porcentual estimada de diversos tipos de vehículos carreteros, por sentido, en el carril de diseño (%DSLN)**

VEHÍCULOS TIPO	NÚMERO DE CARRILES POR SENTIDO		
	1	2	3 ó más
Automóviles y camionetas de pasajeros (Ap)	100%	0%	0%
Camionetas de carga (Ac)	100%	50%	40%
Autobuses (B2 y B3)	100%	60%	40%
Camiones (C2 y C3)	100%	80%	70%
Tractocamiones con semiremolque (T-S)	100%	80%	70%
Vehículos con semiremolque y remolque	100%	100%	90%

**AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO**

**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**

**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

**TABLA 4.3 FACTORES DE EQUIVALENCIA DE CARGA (FEC), PARA VEHÍCULOS MÁS FRECUENTES EN CARRETERAS MEXICANAS (MÉTODO AASHTO 1993)**

DECRETO DEL DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN DEL 17 DE ENERO DE 1997

Vehículo Tipo	Eje		Pesos (t)			FEC Pavimentos asfálticos		
	Núm	Tipo	Vacío	Legal	Máximo	Vacío	Legal	Máximo
Ap	1	1	0.8	1.0	1.1	0.00001	0.00066	0.00098
	2	1	0.8	1.0	1.1	0.00001	0.00066	0.00098
		Σ	1.6	2.0	2.2	0.00002	0.00132	0.00196
Ac	1	1	1.3	1.7	1.7	0.00160	0.00331	0.00331
	2	1	1.2	3.8	4.1	0.00128	0.06072	0.08088
		Σ	2.5	5.5	5.8	0.00288	0.06403	0.08419
B2	1	1	3.5	6.5	6.5	0.04437	0.44175	0.44175
	2	1	7.0	11.0	12.0	0.56507	3.85434	5.74916
		Σ	10.5	17.5	18.5	0.60944	4.29609	6.19091
B3	2	1	4.0	6.5	6.5	0.07369	0.44175	0.44175
	2	2	8.0	19.5	21.5	0.10045	3.05593	4.77559
		Σ	12.0	26.0	28.0	0.17414	3.49768	5.21734
C2	1	1	3.5	6.5	6.5	0.04437	0.44175	0.44175
	2	1	3.0	11.0	17.5	0.02457	3.85434	32.9976
		Σ	6.5	17.5	24.0	0.06894	4.29609	33.4393
C3	1	1	4.0	6.5	6.5	0.07369	0.44175	0.44175
	2	2	4.5	19.5	21.5	0.01282	3.05593	4.77559
		Σ	8.5	26.0	28.0	0.08651	3.49768	5.21734
T2-S1	1	1	3.2	6.5	6.5	0.03144	0.44175	0.44175
	2	1	3.4	11.0	13.0	0.03970	3.85434	8.30363
	3	1	3.4	10.0	13.0	0.03970	2.49358	8.30363
		Σ	10.0	27.5	32.5	0.11084	6.78967	17.0490
T2-S2	1	1	4.0	6.5	6.5	0.07369	0.44175	0.44175
	2	1	3.5	11.0	13.0	0.04437	3.85434	8.30363
	3	2	4.0	18.0	24.0	0.00843	2.12254	7.90788
		Σ	11.5	35.5	43.5	0.12649	6.41863	16.6533
T3-S2	1	1	4.0	6.5	6.5	0.07369	0.44175	0.44175
	2	2	4.0	19.5	23.5	0.00843	3.05593	7.17592
	3	2	4.0	18.0	24.0	0.00843	2.12254	7.90788
		Σ	12.0	44.0	54.0	0.09055	5.62022	15.5256
T3-S3	1	1	4.0	6.5	6.5	0.07369	0.44175	0.44175
	2	2	4.0	19.5	23.5	0.00843	3.05593	7.17592
	3	3	5.0	22.5	30.0	0.00818	2.99201	10.4755
		Σ	13.0	48.5	60.0	0.0903	6.48969	18.0932
C3-R2	1	1	4.0	6.5	6.5	0.07369	0.44175	0.44175
	2	2	4.5	19.5	21.5	0.01282	3.05593	4.77559
	3	1	3.5	10.0	13.0	0.04437	2.49358	8.30363
	4	1	3.5	10.0	13.0	0.04437	2.49358	3.30363
		Σ	15.5	46.0	54.0	0.17525	8.48484	21.8246
T3-S2-R4	1	1	3.2	6.5	6.5	0.03144	0.44175	0.44175
	2	2	3.4	19.5	23.5	0.03970	3.05508	7.17592
	3	2	3.4	18.0	24.0	0.03970	2.12254	7.9888
	4	2	3.3	8.8	11.4	0.04437	0.14427	0.37080
	5	2	3.2	15.7	20.4	0.04437	1.17793	3.75382
		Σ	16.5	68.5	85.8	0.19958	6.94242	19.6502

**AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

**MÉTODO AASHTO (1993)**  
 Factores de Equivalencia de Carga (FEC) para  $ISR = 2.5$

**TABLA 4.4**  
**Pavimentos Asfálticos**

W/eje (t)	EJES TIPO		
	Simple	Tándem	Trídem
1	0,00066		
2	0,00551		
3	0,02457		
4	0,07369	0,00843	
5	0,16786	0,01799	0,00523
6	0,32423	0,03387	0,00982
7	0,56507	0,06073	0,01672
8	0,91583	0,10045	0,02695
9	1,54486	0,15680	0,04068
10	2,49358	0,23003	0,06029
11	3,85434	0,32599	0,08710
12	5,74916	0,44555	0,12138
13	8,30363	0,59364	0,16423
14	11,7035	0,77707	0,21573
15	16,1211	0,99886	0,27752
16		1,26508	0,35071
17		1,63805	0,43719
18		2,12254	0,53672
19		2,71566	0,65261
20		3,42874	0,78439
21		4,28772	0,93517
22		5,30511	1,11157
23		6,49966	1,31118
24		7,90788	1,52470
25		9,53711	1,80737
26			2,16073
27			5,56695
28			3,01774
29			3,53856
30			4,13255

**AUTOPISTA: MÉXICO - QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

**TABLA 4.5 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES DE FIRME**

MATERIAL	COEFICIENTE DE EQUIVALENCIA	LEY DE FATIGA	PRESCRIPCIONES COMPLEMENTARIAS
Mezclas bituminosas en caliente (D, S Y G)	1	$\epsilon_r=6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	- Ver apartados 6.2.1.1 y 6.2.1.2.
Mezclas bituminosas discontinuas en caliente (F y M)	1	-	- Ver apartados 6.2.1.1 y 6.2.1.2.
Mezclas bituminosas drenantes (PA)	1	-	- Ver apartados 6.2.1.1 y 6.2.1.2.
Mezclas bituminosas abiertas en frío (AF)	1 (*)	-	Sólo se podrán emplear para T4 (T41 y T42). En capa de rodadura se recomienda sellar con un tratamiento superficial.
Mezclas bituminosas de alto módulo (MAM)	1,25	$\epsilon_r=6,617 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	- Ver apartados 6.2.1.1 y 6.2.1.3.
Pavimentos de hormigón	-	-	- Ver apartado 6.2.3.
Materiales tratados con cemento	-	Gravacemento $\sigma_r/R_F=1-0,065 \cdot \log N$	- Espesor mínimo: 20 cm.
		Suelocemento $\sigma_r/R_F=1-0,080 \cdot \log N$	- Espesor máximo: · 25 cm para gravacemento. · 30 cm para suelocemento. - Ver apartado 6.2.2.
Grava-emulsión	0,75	Ley específica	- Espesor de capa: · Para T00 a T1: No admisible. · Para T2 a T4: 6 a 12 cm.
Grava-escoria	Material equivalente a la gravacemento, a la que podrá sustituir en algún tipo de soluciones		- Espesor mínimo: 15 cm. - Espesor máximo: 30 cm.
Zahorra artificial	0,25	$\epsilon_z=2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$	- Espesor mínimo: 20 cm (15 cm en arcnos y en secciones 3221 y 4211) - Espesor máximo: 30 cm.
Macadam	Material equivalente a la zahorra artificial, que se aplicará en algún tipo de soluciones.		- Espesor mínimo: 20 cm (15 cm en arcnos) - Espesor máximo: 30 cm.

N: Número de ejes equivalentes de 128 kN ( 13 t).

$\epsilon$ : Deformación unitaria ( $\epsilon_r$ = radial de tracción y  $\epsilon_z$ = vertical de compresión).

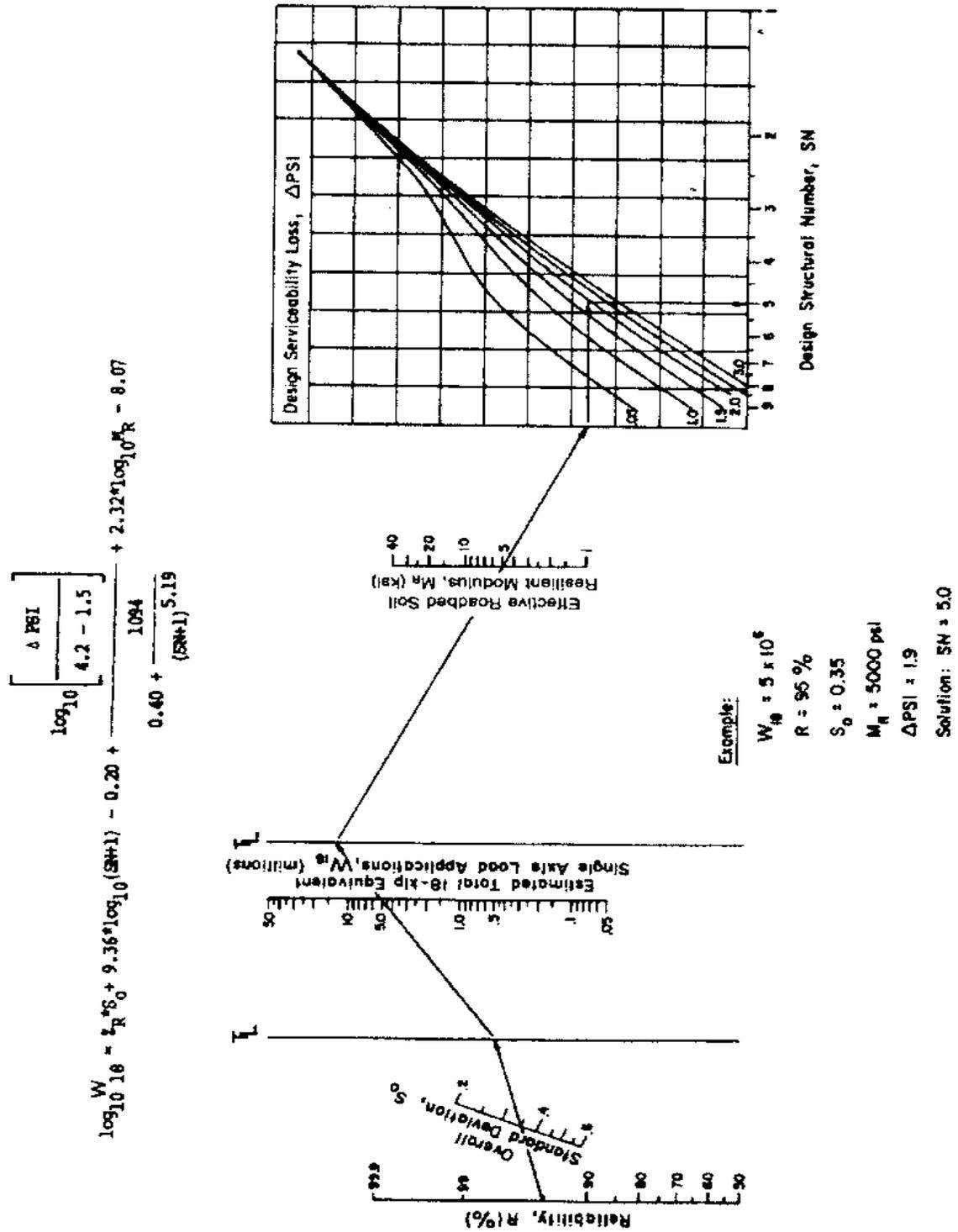
$\sigma_r$ : tención de tracción en MPa.

$R_F$ : Resistencia a frexotracción de material en MPa.

\* Coeficiente aplicable exclusivamente en la categoría de tráfico pesado T42

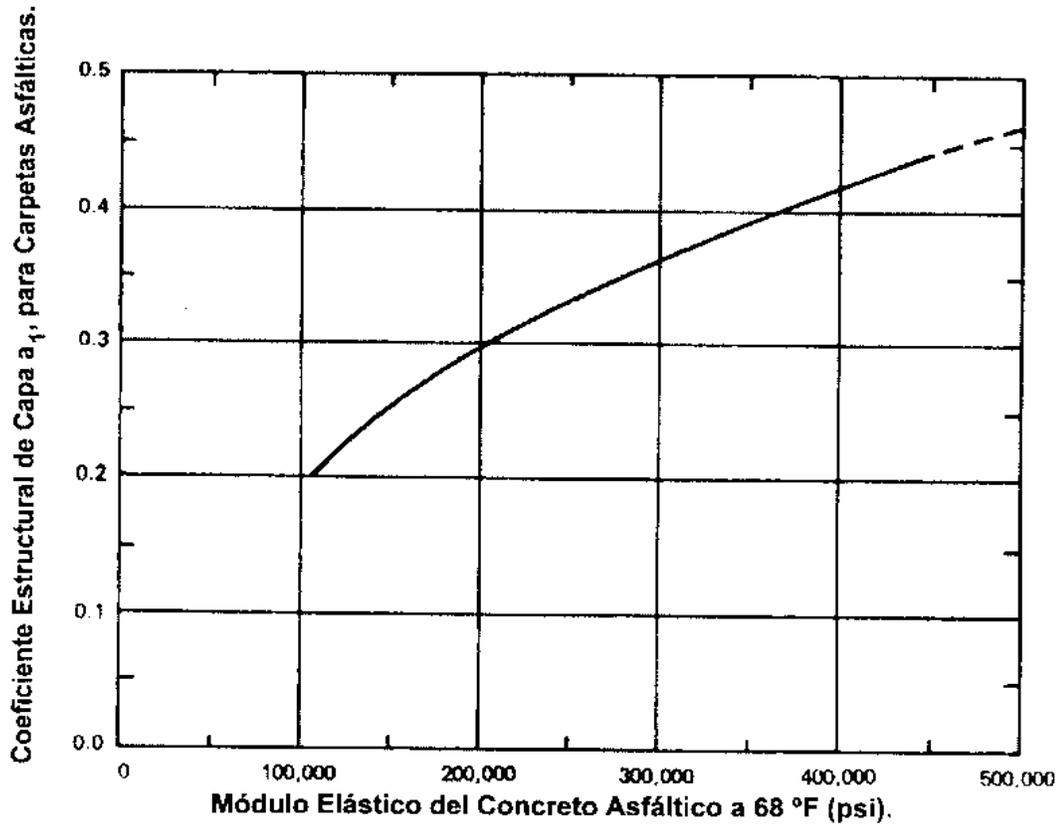
AUTOPISTA: MÉXICO - QUERÉTARO  
 TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000  
 SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000

Figura 4.1 Gráfica de diseño para estructura de pavimento flexible. (referencia 1)



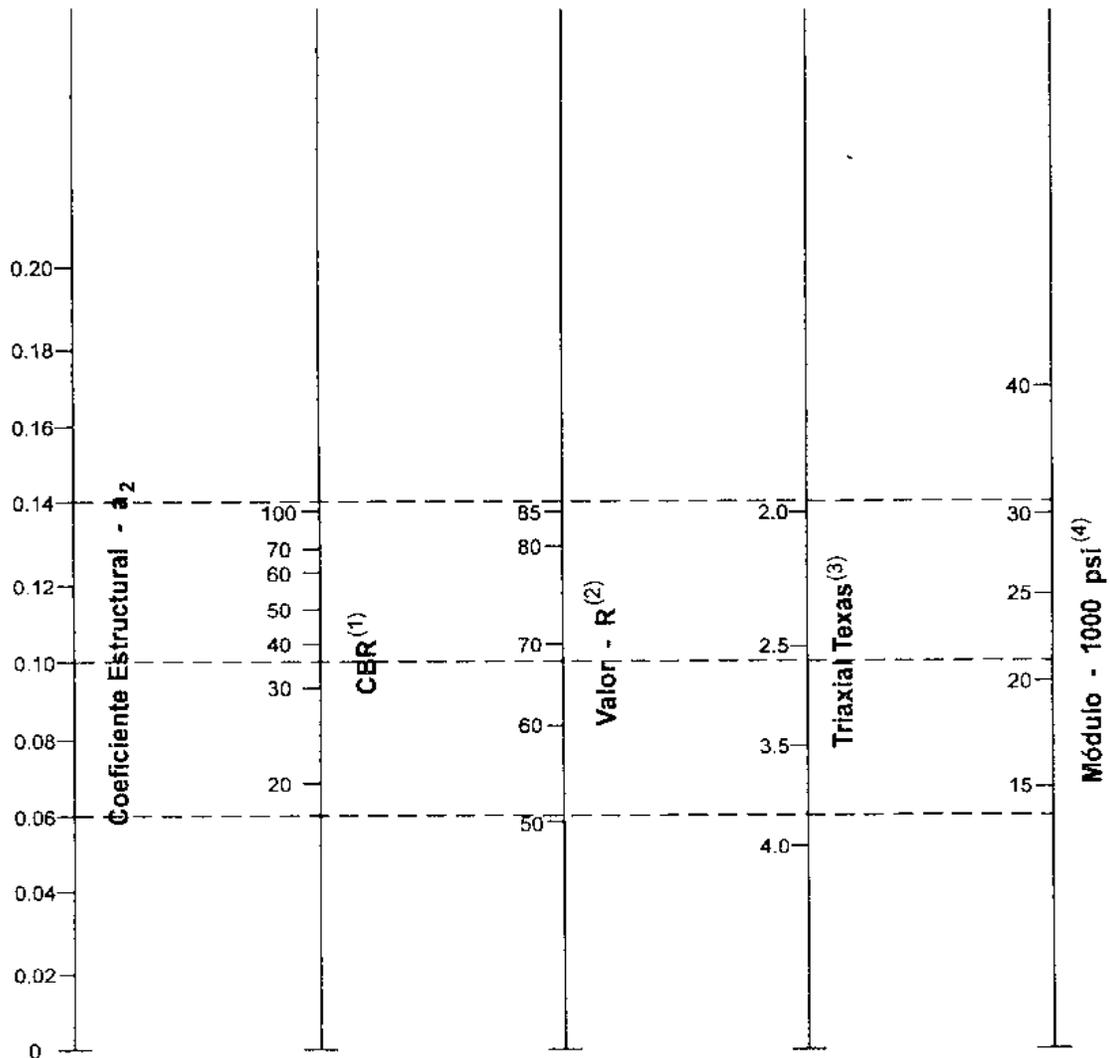
AUTOPISTA: MÉXICO - QUERÉTARO  
TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000  
SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000

Figura 4.2 Gráfica para determinar el coeficiente estructural de capa "a<sub>1</sub>", en función del módulo elástico del concreto asfáltico. (Referencia 1)



**AUTOPISTA: MÉXICO - QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

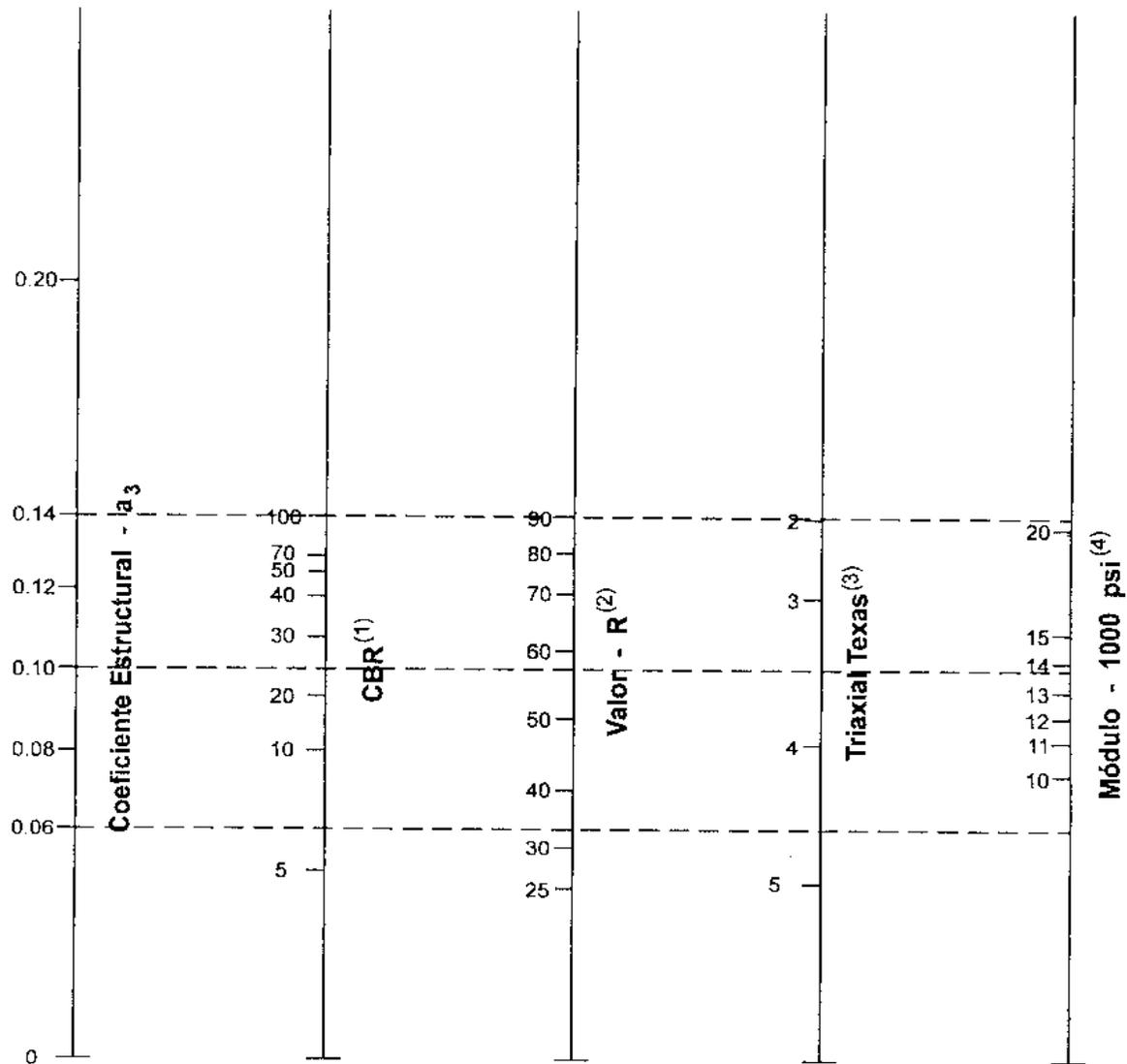
Figura 4.3 Variación de los coeficientes de capa “a<sub>2</sub>”, en bases granulares. (Referencia 1)



- (1) Escala derivada por correlaciones promedio obtenidas de Illinois.
- (2) Escala derivada por correlaciones promedio obtenidas de California, Nuevo México y Wyoming.
- (3) Escala derivada por correlaciones promedio obtenidas de Texas.
- (4) Escala derivada del proyecto (3) del NCHRP.

**AUTOPISTA: MÉXICO - QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

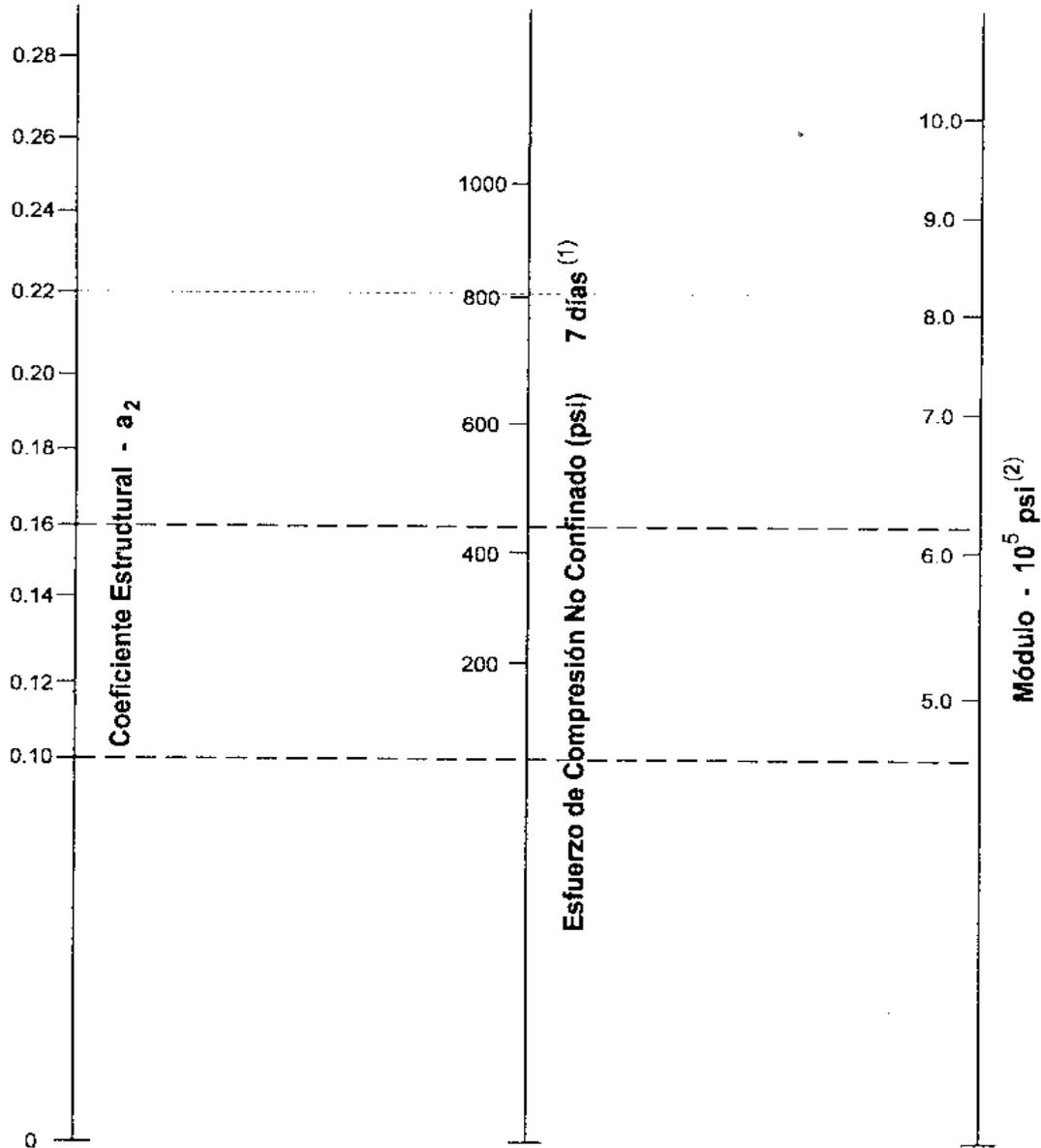
Figura 4.4 Variación de los coeficientes de capa “a<sub>3</sub>”, en sub – bases granulares. (Referencia 1)



- (1) Escala derivada por correlaciones de Illinois.
- (2) Escala derivada por correlaciones obtenidas del Instituto del Asfalto, California, Nuevo México y Wyoming.
- (3) Escala derivada de correlaciones obtenidas de Texas.
- (4) Escala derivada del proyecto (3) del NCHRP.

**AUTOPISTA: MÉXICO - QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

Figura 4.5 Variación de los coeficientes de capa “a<sub>2</sub>”, en bases estabilizadas con cemento Pórtland. (Referencia 1)

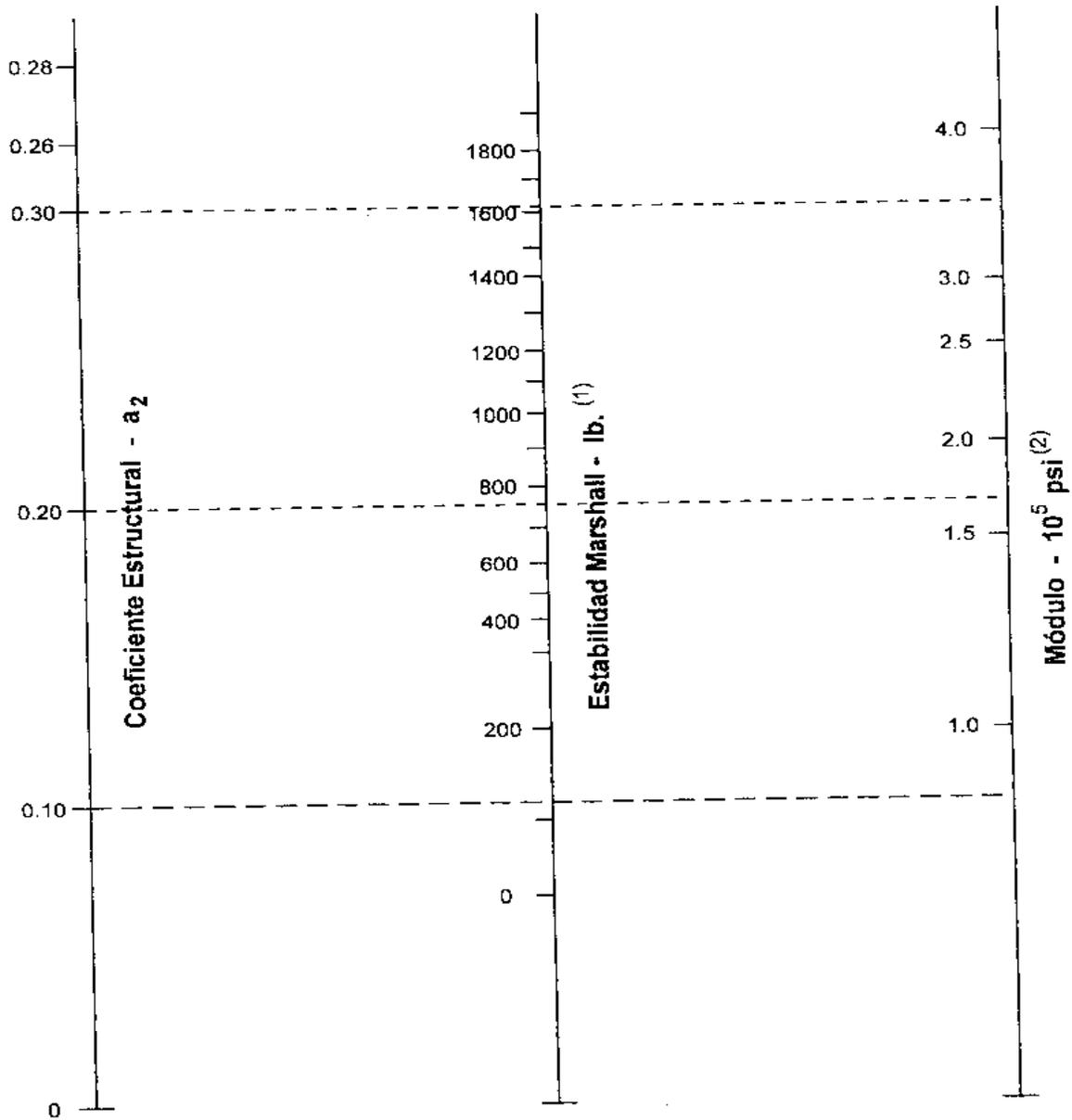


(1) Escala derivada por correlaciones promedio obtenidas de Illinois, Louisiana y Texas.

(2) Escala derivada del proyecto (3) del NCHRP

AUTOPISTA: MÉXICO - QUERÉTARO  
TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000  
SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000

Figura 4.6 Variación de los coeficientes de capa "a<sub>2</sub>" en bases estabilizadas con asfalto.  
(Referencia 1)



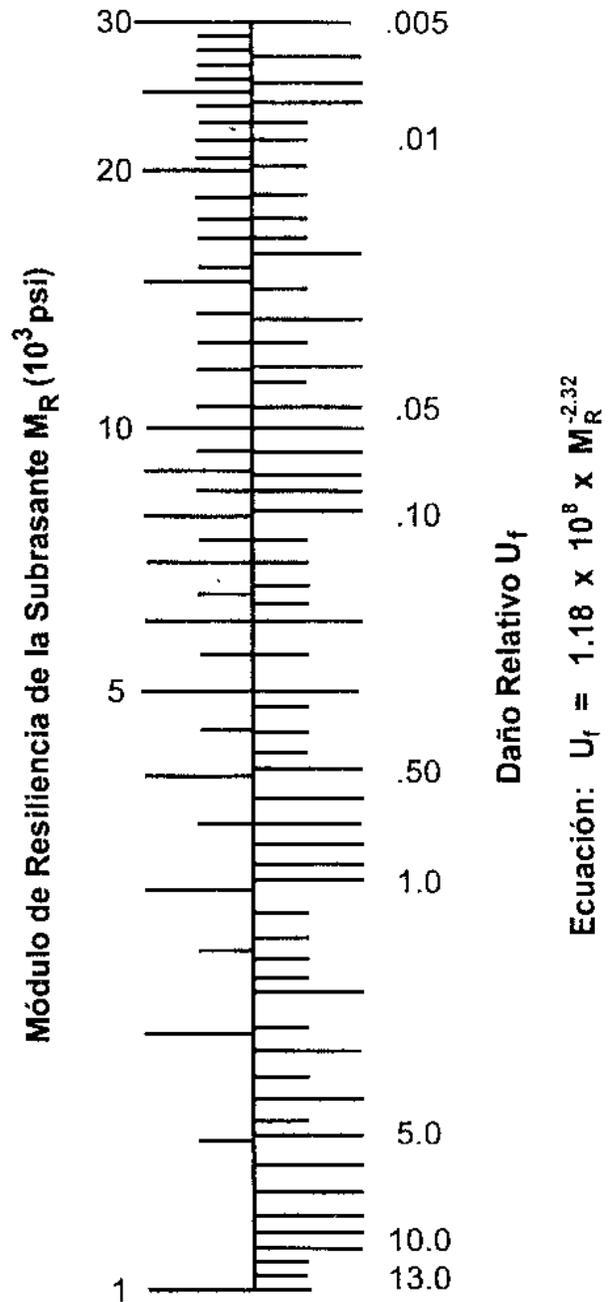
(1) Escala derivada por correlación obtenida de Illinois

(2) Escala derivada del proyecto (3) del NCHRP

**AUTOPISTA: MÉXICO - QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

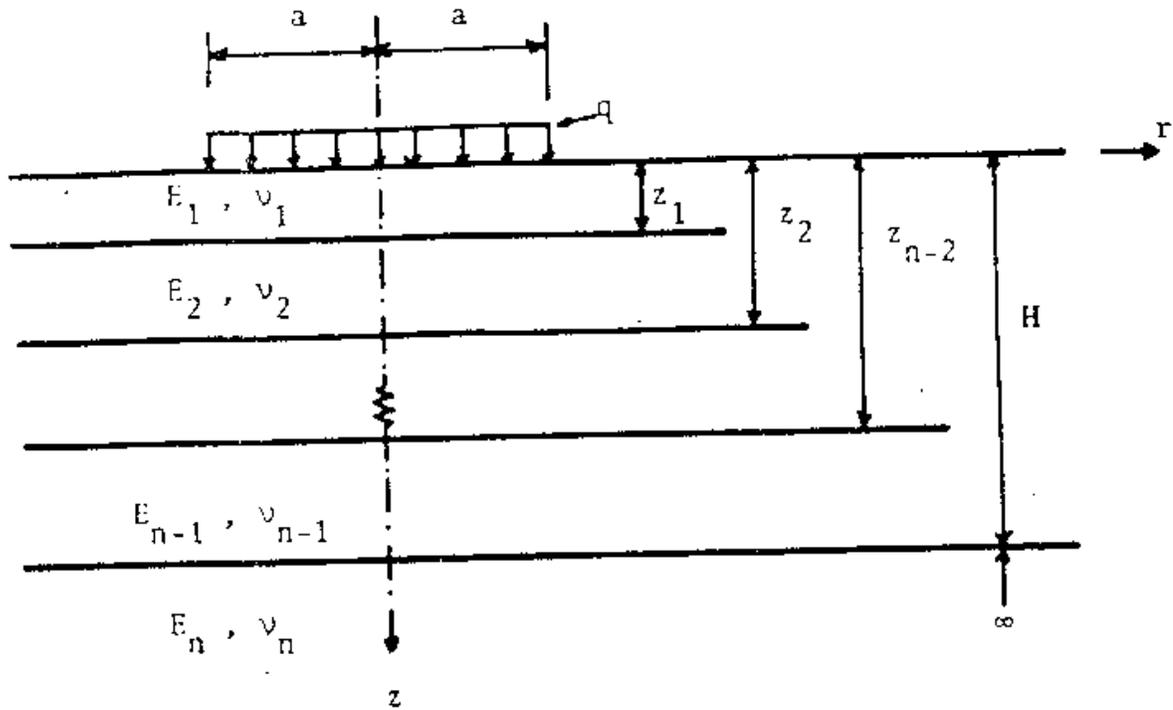
Figura 4.7 Formato para calcular el módulo de resiliencia efectiva de la subrasante en pavimentos flexibles. (Referencia 1)

Mes	Módulo de Resiliencia de la Subrasante $M_R(\text{psi})$	Daño Relativo $U_f$
Ene.		
Feb.		
Mar.		
Abr.		
May.		
Jun.		
Jul.		
Ago.		
Sep.		
Oct.		
Nov.		
Dic.		
<b>Sumatoria:</b>	$\Sigma U_f =$	



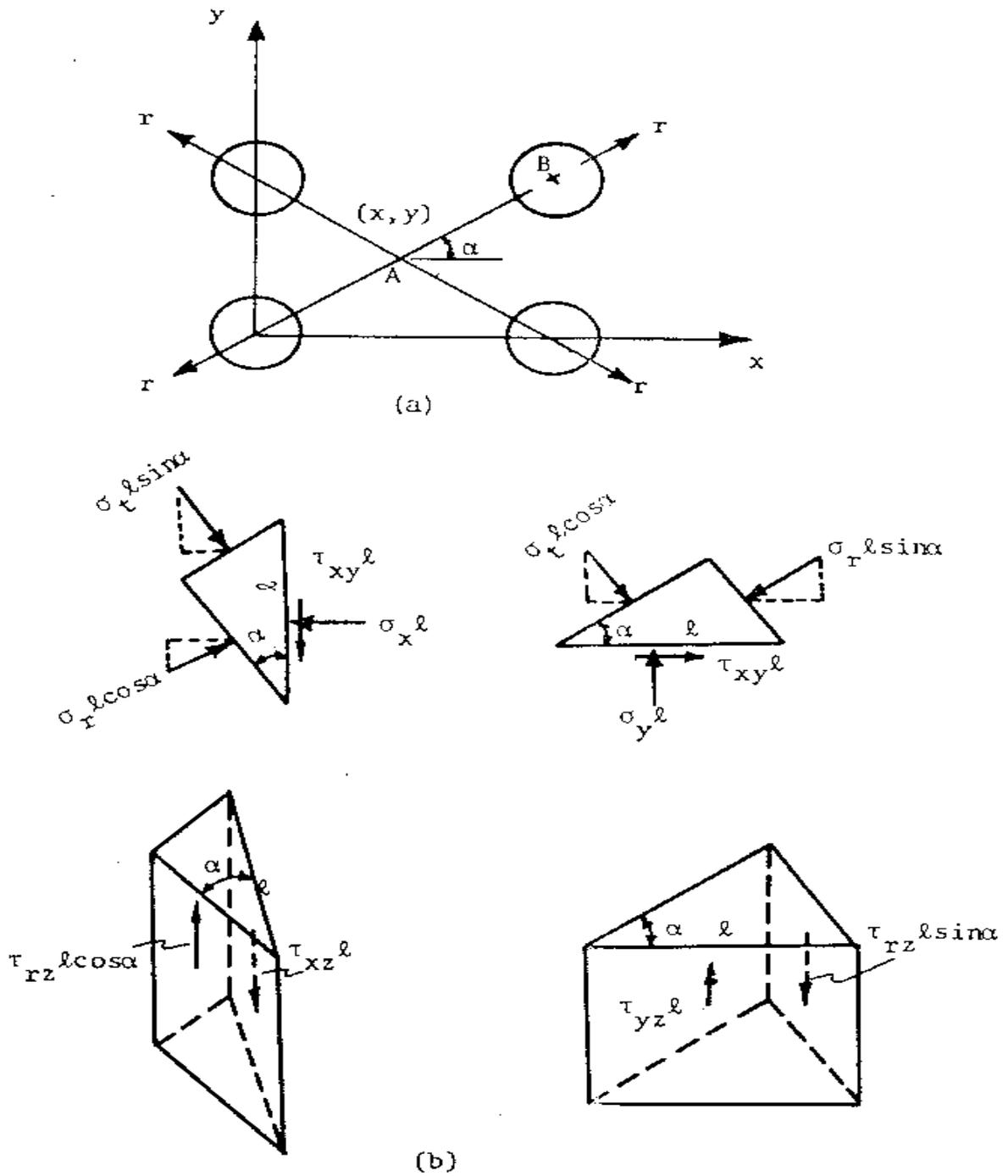
AUTOPISTA: MÉXICO - QUERÉTARO  
TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000  
SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000

Figura 4.8 Sistema de “n” capas en coordenadas cilíndricas. (Referencia 25)



**AUTOPISTA: MÉXICO - QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

Figura 4.9 Superposición de esfuerzos para ruedas múltiples. (Referencia 25)



**AUTOPISTA: MÉXICO - QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

Figura 4.10 Análisis de daño de cargas en eje tándem. (Referencia 25)

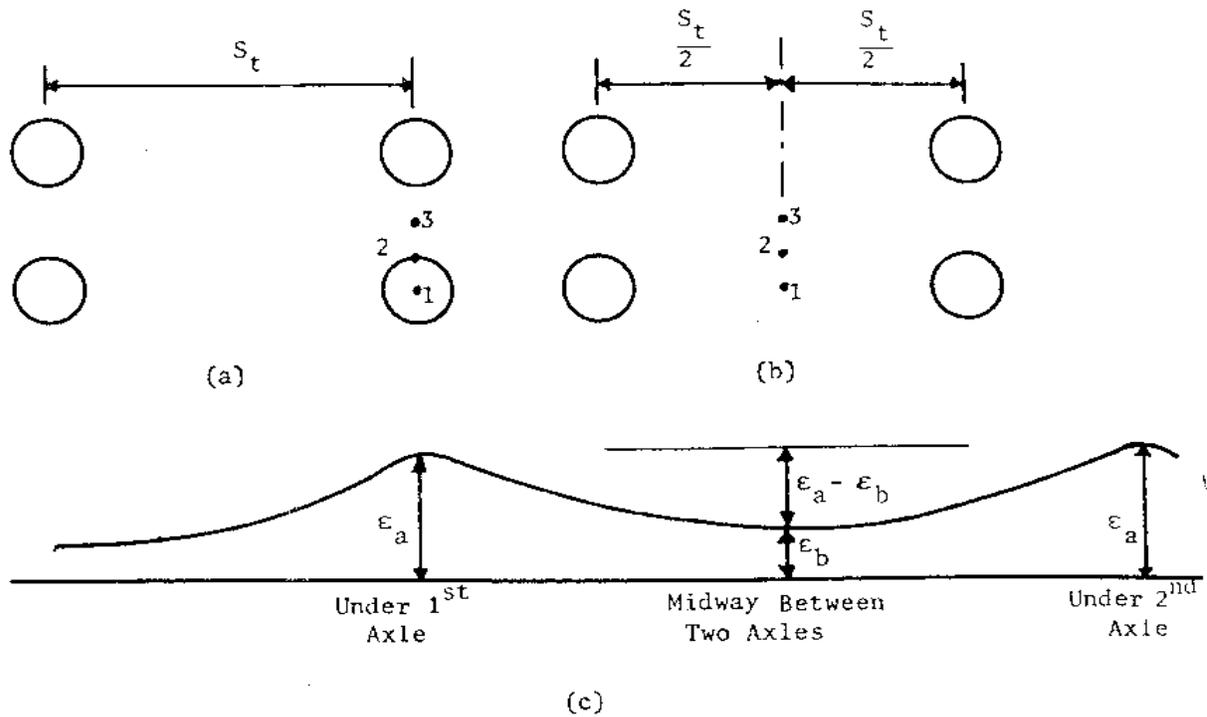
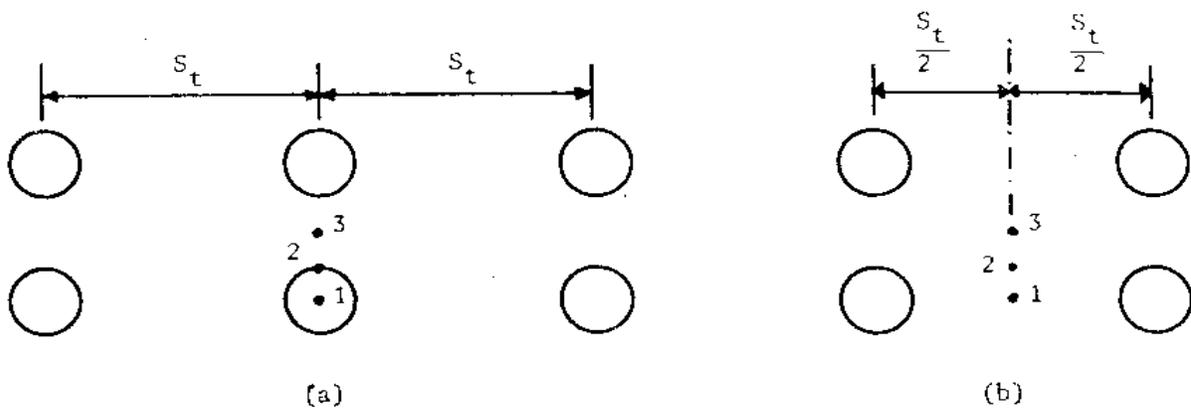


Figura 4.11 Análisis de daño de cargas en eje tridem. (Referencia 25)



**AUTOPISTA: MÉXICO - QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

Figura 4.12 Relación general entre el módulo resiliente y esfuerzo desviador para suelo fino.  
 (Referencia 25)

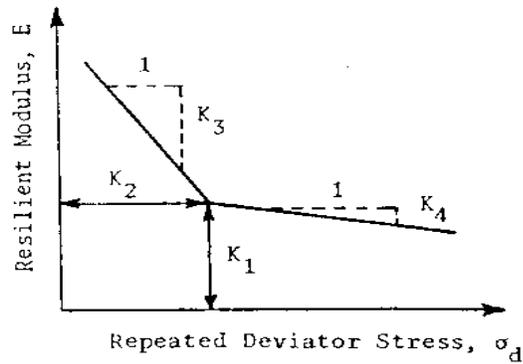
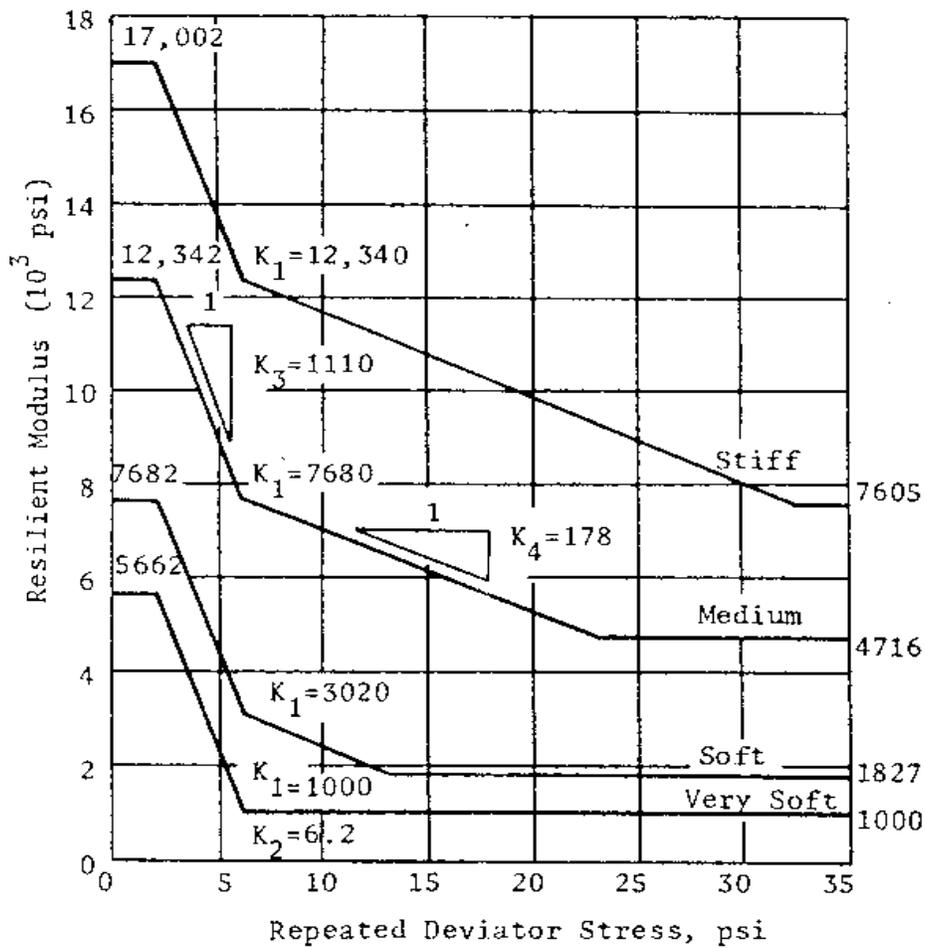
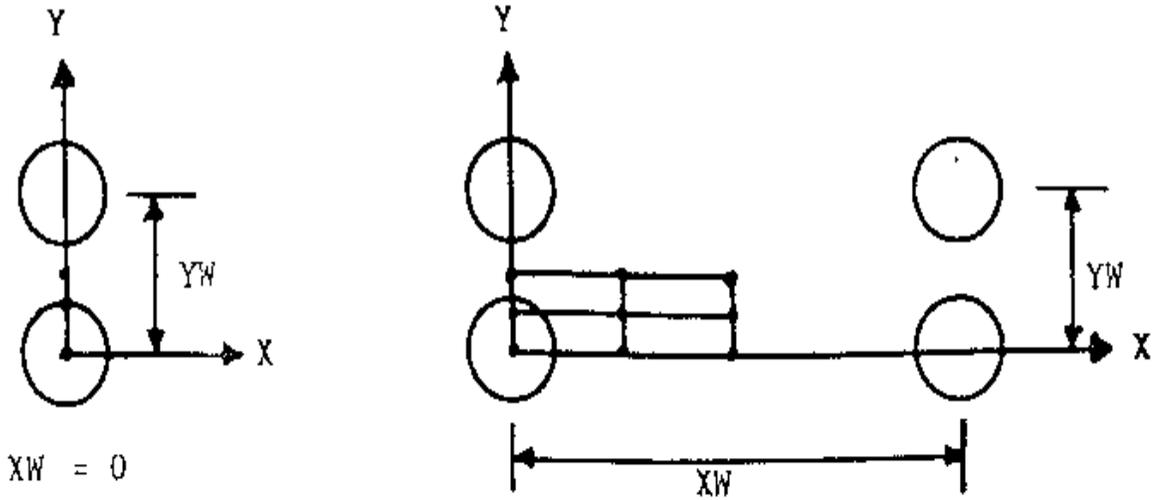


Figura 4.13 Relación de módulo resiliente – esfuerzo desviador para cuatro tipos de subrasantes.  
 (Referencia 25)



AUTOPISTA: MÉXICO - QUERÉTARO  
TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000  
SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000

Figura 4.14 Vista de ruedas múltiples. (Referencia 25)

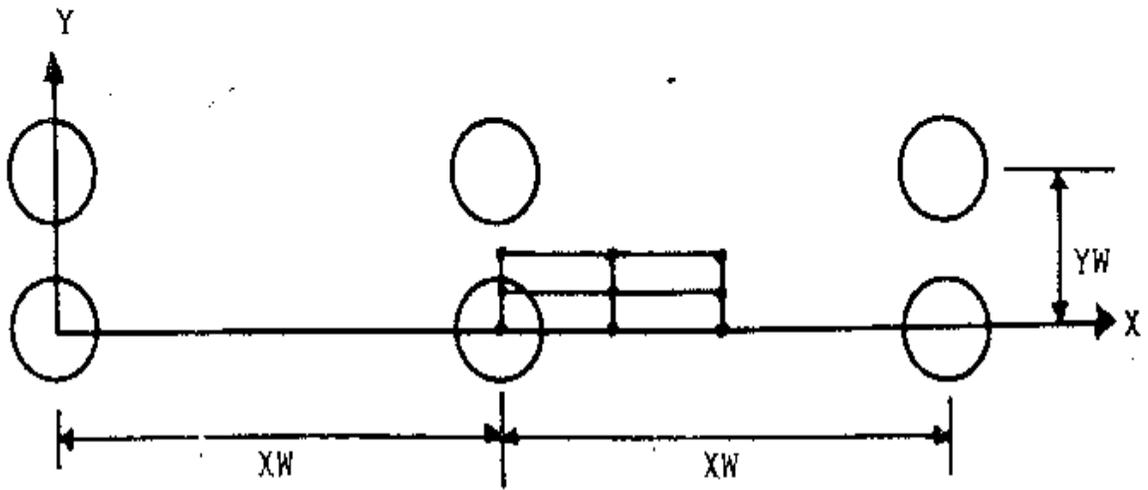


Single Axle

Tandem Axles

( Always Dual Tires )

( Single Tire if  $YW = 0$  )



Tridem Axle

( Single Tire if  $YW = 0$  )

**AUTOPISTA: MÉXICO - QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

Figura 4.15 Formación de la explanada. (Referencia 26)

CATEGORÍA DE EXPLANADA		TIPOS DE SUELOS DE LA EXPLANACIÓN (DESMONTES) O DE LA OBRA DE TIERRA SUBYACENTE (TERRAPLENES, PEDRAPLENES O RELLENOS TODO-UNO)				
		SUELOS INADECUADOS Y MARGINALES (IN)	SUELOS TOLERABLES (0)	SUELOS ADECUADOS (1)	SUELOS SELECCIONADOS (2) y (3)	ROCA (R)
E1	$E_{v2} \geq 60\text{MPa}$					

IN Suelo inadecuado o marginal (Art. 330 del PG-3)	0 Suelo tolerable (Art. 330 del PG-3)	1 Suelo adecuado (Art. 330 del PG-3)	2 Suelo seleccionado (Art. 330 del PG-3)	3 Suelo seleccionado (Art. 330 del PG-3)
S-EST 1 Suelo estabilizado in situ (Art. 512 del PG-3)	S-EST 2 Suelo estabilizado in situ (Art. 512 del PG-3)	S-EST 3 Suelo estabilizado in situ (Art. 512 del PG-3)	HM-20 Hormigón (Art. 610 del PG-3)	

tipo de material

espesor mínimo en cm

S-EST3 30

2

suelo de explanación o de la obra de tierra subyacente

**AUTOPISTA: MÉXICO - QUERÉTARO**

**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**

**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

Figura 4.16 Catálogo de secciones de firme para las categorías de tráfico pesado T00 a T2, en función de la categoría de explanada.  
(Referencia 26)

		CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO			
		T00	T0	T1	T2
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1				211: MB 28, ZA 40 212: MB 18, SC 30 <sup>(2)</sup> 214: HF 23, HM 15, ZA 20
	E2			121: MB 30, ZA 25 122 <sup>(3)</sup> : MB 20, SC 25 <sup>(2)</sup> 123: MB 15, GC 22 <sup>(2)</sup> , SC 22 124 <sup>(3)</sup> : HF 25, HM 15	221: MB 25, ZA 25 222 <sup>(3)</sup> : MB 18, SC 22 <sup>(2)</sup> 223: MB 15, GC 20 <sup>(2)</sup> , SC 20 224 <sup>(3)</sup> : HF 23, HM 15
	E3	0031: MB 35, ZA 25 0032: MB 25, SC 30 0033: MB 20, GC 22 <sup>(2)</sup> , SC 25 0034: HF 25 <sup>(1)</sup> , HM 15	031: MB 30, ZA 25 032: MB 20, SC 25 <sup>(2)</sup> 033: MB 18, GC 22 <sup>(2)</sup> , SC 20 034: HF 24 <sup>(1)</sup> , HM 15	131: MB 25, ZA 25 132: MB 20, SC 20 <sup>(2)</sup> 134: HF 25, HM 15	231: MB 20, ZA 25 232: MB 15, SC 20 <sup>(2)</sup> 234: HF 23, HM 15

MB Mezclas bituminosas  
 HF Hormigón de firme  
 HM Hormigón magro vibrado  
 GC Gravacemento  
 SC Suelocemento  
 ZA Zahorra artificial

Esesores mínimos en cm

- (1) Para las categorías de tráfico pesado T00 y T0 se emplearán únicamente pavimentos continuos de hormigón armado con los esesores indicados.
- (2) Capas tratadas con cemento que deberán prefisurarse con espaciamientos de 3 a 4 m, de acuerdo con el artículo 513 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales (PG-3).
- (3) Para poder proyectar esta solución será preceptivo que la capa superior de la explanada E2 esté estabilizada con cemento.

AUTOPISTA: MÉXICO - QUERÉTARO  
 TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000  
 SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000

Figura 4.17 Catálogo de secciones de firme para las categorías de tráfico pesado T3 y T4, en función de la categoría de la explanada. (Referencia 26)

CATEGORÍA DE EXPLANADA		CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO											
		T31			T32			T41			T42		
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1	3111 MB 20 ZA 40	3112 MB 15 SC 30	3114 HF 21 ZA 30	3211 MB 18 ZA 40	3212 MB 12 SC 30	3214 HF 21 ZA 20	4111 MB 10 <sup>11)</sup> ZA 40	4112 MB 8 SC 30	4114 HF 20 ZA 20	4211 MB 5 <sup>11)</sup> ZA 35	4212 MB 5 SC 25	4214 HF 18 ZA 20
	E2	3121 MB 16 ZA 40	3122 MB 12 SC 30	3124 HF 21 ZA 25	3221 MB 15 ZA 35	3222 MB 10 SC 30	3224 HF 21 ZA 20	4121 MB 10 <sup>11)</sup> ZA 30	4122 MB 8 SC 25	4124 HF 20	4221 MB 5 <sup>11)</sup> ZA 25	4222 MB 5 SC 22	4224 HF 18
	E3	3131 MB 16 ZA 25	3132 MB 12 SC 22	3134 HF 21 ZA 20	3231 MB 15 ZA 20	3232 MB 10 SC 22	3234 HF 21	4131 MB 10 <sup>11)</sup> ZA 20	4132 MB 8 SC 20	4134 HF 20	4231 MB 5 <sup>11)</sup> ZA 20	4232 MB 5 SC 20	4234 HF 18

MB Mezclas bituminosas   
 HF Hormigón de firme   
 SC Suelocemento   
 ZA Zahorra artificial

Esesores mínimos en cm

(1) Estas capas bituminosas podrán ser proyectadas con mezclas bituminosas en caliente muy flexibles, gravaemulsión sellada con un tratamiento superficial o mezcla bituminosa abierta en frío sellada con un tratamiento superficial.

**Nota 1:** Para las categorías de tráfico pesado T3 (T31 y T32) las capas tratadas con cemento deberán prefisurarse con espaciamientos de 3 a 4 m, de acuerdo con el artículo 513 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales (PG-3).

**Nota 2:** En la categoría de tráfico pesado T42 con tráficos de intensidad reducida (menor que 100 vehículos/carril/día) podrá disponerse un riego con gravilla bicapa como sustitución de los 5 cm de mezcla bituminosa.



## CAPÍTULO 5 EVALUACIÓN ECONÓMICA

En este capítulo se evalúan económicamente las alternativas A, B y C del pavimento flexible, de su costo inicial de construcción, conservación y operación del transporte en el subtramo de la autopista México - Querétaro. Las alternativas de solución son:

### Alternativa A

CAPA	ESPEJOR, EN CM.
Carpeta asfáltica	10
Base estabilizada con emulsión asfáltica	28
Sub-base	20
Subrasante	40

### Alternativa B

CAPA	ESPEJOR, EN CM.
Carpeta asfáltica y polímero	10
Base estabilizada con cemento asfáltico AC-10	24
Sub-base	20
Subrasante	40

### Alternativa C

CAPA	ESPEJOR, EN CM.
Carpeta asfáltica	10
Base estabilizada con cemento Pórtland	28
Sub-base	20
Subrasante	40

## 5.1 Construcción

El costo inicial de construcción de las alternativas de solución del subtramo km 133+000 al 148+000 de la autopista México - Querétaro, se obtienen con la siguiente información.

### Alternativa A

En el subtramo del cuerpo A y B tienen un ancho de corona de 13.85 m por cuerpo. En ambos cuerpos fresar la carpeta asfáltica y base hidráulica de espesor de 30 y 33 cm, respectivamente. El fresado se realizará con una recuperadora RS500 o similar, el material recuperado de la carpeta se retirará y el de base hidráulica se acamellonará lateralmente.

Posteriormente, compactar la superficie descubierta de la sub-base existente mediante la prueba Aashto modificada al 100 % de su P.V.S.M.; enseguida se colocará un riego de liga a razón de  $0.5 \text{ L/m}^2$ . Después con material recuperado de la base hidráulica y material de banco de tamaño máximo de  $1 \frac{1}{2}$ " construir la base estabilizada de 28 cm de espesor compactos, con emulsión asfáltica (EAM-60) de rompimiento medio a razón de  $95 \text{ L/m}^3$ ; en seguida se aplicará un riego de liga a razón de  $0.5 \text{ L/m}^2$ ; posteriormente construir una carpeta de concreto asfáltico de 10 cm de espesor compactos elaborada en caliente, material de banco de tamaño máximo de agregados de 19 mm y cemento asfáltico AC-10, además se agregará aditivo modificador SBS dosificado en un 2.5% con respecto al peso del cemento asfáltico y por último, construir una micro carpeta de 2 cm de espesor compactos con cemento asfáltico AC-10 y aditivo modificador SBS, con la finalidad de proporcionar una superficie de rodamiento confortable y segura.

### **Alternativa B**

En el subtramo del cuerpo A y B tienen un ancho de corona de 13.85 m por cuerpo. En ambos cuerpos fresar la carpeta asfáltica y base hidráulica de espesor de 30 y 33 cm, respectivamente. El fresado se realizará con una recuperadora RS500 o similar, el material recuperado de la carpeta se retirará y el de base hidráulica se acamellonará lateralmente.

Posteriormente, compactar la superficie descubierta de la sub-base existente mediante la prueba Aashto modificada al 100 % de su P.V.S.M.; enseguida se colocará un riego de liga a razón de  $0.5 \text{ L/m}^2$ . Después con material recuperado de la base hidráulica y material de banco de tamaño máximo de  $1 \frac{1}{2}$ " construir la base estabilizada de 24 cm de espesor compactos, con cemento asfáltico AC-10; en seguida se aplicará un riego de liga a razón de  $0.5 \text{ L/m}^2$ ; posteriormente construir una carpeta de concreto asfáltico de 10 cm de espesor compactos elaborada en caliente, material de banco de tamaño máximo de agregados de 19 mm y cemento asfáltico AC-10, además se agregará aditivo modificador SBS en porcentaje adecuado que alcance un módulo de elasticidad de  $35\ 000 \text{ kg/cm}^2$  y por último, construir una micro carpeta de 2 cm de espesor compactos con cemento asfáltico AC-10 y aditivo modificador SBS, con la finalidad de proporcionar una superficie de rodamiento confortable y segura.

### **Alternativa C**

En el subtramo del cuerpo A y B tienen un ancho de corona de 13.85 m por cuerpo. En ambos cuerpos fresar la carpeta asfáltica y base hidráulica de espesor de 30 y 33 cm, respectivamente. El fresado se realizará con una recuperadora RS500 o similar, el material recuperado de la carpeta se retirará y el de base hidráulica se acamellonará lateralmente.

Posteriormente, compactar la superficie descubierta de la sub-base existente mediante la prueba Aashto modificada al 100 % de su P.V.S.M.; enseguida se colocará un riego de liga a razón de  $0.5 \text{ L/m}^2$ . Después con material recuperado de la base hidráulica y material de banco de tamaño máximo de  $1 \frac{1}{2}$ " construir la base estabilizada de 28 cm de espesor compactos, con cemento Pórtland a razón de 18% con respecto al P.V.S.M de la mezcla de material recuperado y de banco; en seguida se aplicará un riego de impregnación a razón de  $1.0 \text{ L/m}^2$  dejando el tiempo necesario para adquirir la consistencia par recibir la carpeta asfáltica, después aplicar un riego de liga a razón de  $0.5 \text{ L/m}^2$ ; posteriormente construir una carpeta de concreto asfáltico de 10 cm de espesor compactos elaborada en caliente, material de banco de tamaño máximo de agregados de 19 mm y cemento asfáltico AC-10, además se agregará aditivo modificador SBS dosificado en un 2.5 % con respecto al peso del cemento asfáltico y por último, construir una micro carpeta de

2 cm de espesor compactos con cemento asfáltico AC-10 y aditivo modificador SBS, con la finalidad de proporcionar una superficie de rodamiento confortable y segura.

En las siguientes tablas se presentan en resumen los costos de construcción de las alternativas de solución.

**Alternativa A**

<b>Concepto</b>	<b>Espesor cm.</b>	<b>Importe en (\$)</b>
- Fresado y retiro de material de carpeta.	30 – 33	13 906 265.63
- Compactación de la sub-base existente al 100%.	20	7 129 980.00
- Base estabilizada con emulsión asfáltica de rompimiento medio, riegos de liga y material de banco.	28	56 210 604.52
- Suministro de cemento asfáltico AC-10 y aditivo modificador SBS en un 2.5% respecto al peso del cemento asfáltico.	-	55 277 524.74
- Carpeta de concreto asfáltico elaborada en caliente con AC-10 y aditivo modificador SBS.	10	27 007 500.00
- Micro carpeta con cemento asfáltico AC-10 en caliente y aditivo modificador SBS.	2	4 759 469.40
<b>TOTAL</b>		<b>164 291 344.30</b>
<b>COSTO POR KILÓMETRO</b>		<b>10 952 756.29</b>

### Alternativa B

Concepto	Espesor cm.	Importe en (\$)
- Fresado y retiro de material de carpeta parte de base hidráulica.	30 – 33	13 906 265.63
- Compactación de la sub-base existente al 100%.	20	7 129 980.00
- Base estabilizada con cemento asfáltico AC-10, riegos de liga y material de banco	24	68 736 433.72
- Suministro de cemento asfáltico AC-10 y polímero tipo I	-	161 511 333.25
- Carpeta de concreto asfáltico elaborada en caliente con AC-10 y polímero	10	37 872 825.00
- Micro carpeta con cemento asfáltico AC-10 en caliente y aditivo modificador SBS.	2	4 759 469.40
<b>TOTAL</b>		<b>293 916 306.90</b>
<b>COSTO POR KILÓMETRO</b>		<b>19 594 420.46</b>

### Alternativa C

Concepto	Espesor cm.	Importe en (\$)
- Fresado y retiro de material de carpeta.	30 – 33	13 906 265.63
- Compactación de la sub-base existente al 100%.	20	7 129 980.00
- Base estabilizada con cemento Pórtland a razón del 18% con respecto al P.V.S.M. de material recuperado, riegos de liga y material de banco	28	28 202 040.37
- Suministro de cemento asfáltico AC-10, aditivo modificador SBS en un 2.5% respecto al peso del cemento asfáltico y cemento Pórtland.	-	111 899 574.70
- Carpeta de concreto asfáltico elaborada en caliente con AC-10 y aditivo modificador SBS.	10	27 007 500.00
- Micro carpeta con cemento asfáltico AC-10 en caliente y aditivo modificador SBS.	2	4 759 469.40
<b>TOTAL</b>		<b>192 904 830.10</b>
<b>COSTO POR KILÓMETRO</b>		<b>12 860 322.01</b>

En las tablas E.1 a E.7 del anexo E, se presentan los volúmenes de obra, costos y datos de los precios básicos.

## 5.2 Costos de conservación

Los costos de conservación toman en cuenta el índice de servicio y el nivel de rechazo en la vida útil de diseño de 20 años, considerando que la superficie de rodamiento en el subtramo de la autopista México - Querétaro sea confortable y segura.

En la siguiente tabla se presentan las estrategias de conservación del subtramo de las alternativas por cuerpo.

A	B	C
-Cada dos años realizar bacheo de carpeta y base asfáltica 200 m <sup>2</sup> /km.  -Aplicar renivelaciones en forma aislada con mezcla asfáltica 3.5 m <sup>3</sup> /km y micro carpeta con polímero de 2cm de espesor cada 5 años.  -A los 10 años realizar fresado y recuperación de 28 cm y construir base estabilizada con emulsión asfáltica de rompimiento medio de 28 cm de espesor, carpeta de 5 cm de espesor con cemento asfáltico AC-10 y micro carpeta con polímero de 2 cm de espesor.	-Cada dos años realizar bacheo de carpeta y base asfáltica 200 m <sup>2</sup> /km.  -Aplicar renivelaciones en forma aislada con mezcla asfáltica 3.5 m <sup>3</sup> /km y micro carpeta con polímero de 2 cm de espesor cada 5 años.  -A los 10 años realizar renivelaciones en forma aislada con mezcla asfáltica 3.5 m <sup>3</sup> /km, construir carpeta de 5 cm de espesor con cemento asfáltico AC-10 y micro carpeta con polímero de 2 cm de espesor.	-Cada dos años realizar bacheo de carpeta y base estabilizada con cemento Pórtland 100 m <sup>2</sup> /km.  -Aplicar renivelaciones en forma aislada con mezcla asfáltica 3.5 m <sup>3</sup> /km y construir micro carpeta con polímero de 2 cm de espesor cada 7 años.

En las siguientes tablas se presentan en resumen los costos de conservación

### Alternativa A

Concepto	Espesor en cm.	Precio unitario \$/m <sup>3</sup>	Importe \$ km.
Bacheo de carpeta y base asfáltica	30	33.00	3 960.00
Renivelaciones con mezcla asfáltica	10	189.15	1 324.05
Construcción de micro carpeta con polímero	2	512.07	283 686.78
Recuperación y construcción de base asfáltica	28	189.15	1 467 047.40
Construcción de carpeta asfáltica	5	322.24	446 302.40
Construcción de micro carpeta con polímero	2	389.34	215 694.36
<b>TOTAL</b>			<b>2 418 014.99</b>

### Alternativa B

Concepto	Espesor en cm.	Precio unitario \$/m <sup>3</sup>	Importe \$ km.
Bacheo de carpeta y base asfáltica	30	33.00	3 960.00
Renivelaciones con mezcla asfáltica	10	189.15	1 324.05
Construcción de micro carpeta con polímero	2	512.07	283 686.78
Construcción de carpeta asfáltica	5	322.24	446 302.40
Construcción de micro carpeta y polímero	2	389.34	215 694.36
<b>TOTAL</b>			<b>950 968.22</b>

### Alternativa C

Concepto	Espesor en cm.	Precio unitario \$/m <sup>3</sup>	Importe \$ km.
Bacheo de carpeta y base asfáltica	30	33.00	3 960.00
Renivelaciones con mezcla asfáltica	10	189.15	1 324.05
Construcción de micro carpeta con polímero	2	1 183.14	655 459.56
<b>TOTAL</b>			<b>660 861.21</b>

En las tablas E.8 a E.11 del anexo E, se presentan los precios básicos de conservación y costos. Los precios básicos de construcción y conservación fueron tomados de la referencia 3.

### 5.3 Costos de operación

Para realizar el análisis de costos de operación se aplicó el método desarrollado por el Banco Mundial y que el Instituto Mexicano del Transporte adaptó para condiciones del país denominado VOCMEX.

Con la información de las características del tipo de terreno plano de: pendiente media ascendente 1.5%, pendiente media descendente 1.5%, curvatura horizontal promedio 200 grados/km, sobre elevación promedio 0.02 fracción, altitud del terreno 2 000 m, superficie pavimentada y rigurosidad de 2 a 20 m/km, así las características de los vehículos como: peso del vehículo vacío en kg, edad del vehículo en km, precio del vehículo nuevo en \$, costos por llanta nueva en \$, etc., se obtuvieron los siguientes costos

Alternativa	Costo de operación \$/km
A	1 340 247.00
B	1 364 719.00
C	1 391 648.00

En las tablas E.12 a E. 17 del anexo E, se presentan los costos de operación y las características para los diferentes tipos de vehículos que transitan por el subtramo de la autopista.

**COSTO TOTAL DE LAS ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN (\$/km.)**

<b>Concepto</b>	<b>Alternativas</b>		
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
Costo de construcción	10 952 756.29	19 594 420.46	12 860 322.02
Costo de conservación	2 418 014.99	950 968.22	660 861.21
Costo de operación	1 340 247.00	1 364 719.00	1 391 648.00
<b>Total (\$)</b>	<b>14 711 018 .20</b>	<b>21 910 107.68</b>	<b>14 912 831.23</b>

Finalmente, la alternativa A es la más viable óptima, la cual presenta un costo total de \$ 14 711 018.20 por kilómetro y consta de: carpeta asfáltica de 10 cm de espesor compactos, base estabilizada con emulsión asfáltica de 28 cm de espesor compactos, sub-base (existente) de 20 cm de espesor compactos y subrasante (existente) de 40 cm de espesor compactos.



## COMENTARIOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como se mencionó en el principio de este trabajo, la aplicación metodológica en el diseño de pavimentos flexibles en carreteras de altas especificaciones y avances tecnológicos, contribuye como una aportación más en la selección viable óptima de un tramo o subtramo de la red básica de carreteras. Se presentan a continuación los comentarios, conclusiones y recomendaciones de la autopista México – Querétaro, tramo km 90+000 al 148+000, subtramo km 133+000 al 148+000.

### Comentarios:

1. En el tramo y subtramo de la autopista, no se tiene un historial cronológico de la conservación periódica y de rehabilitación desde su construcción; la información data de 1997 al 2002 en la que se construyó el tercer carril denominado de alta en los cuerpos A y B, con una sub-base estabilizada con cemento Pórtland con un 6% de 15 cm de espesor compactos, base hidráulica de 20 cm de espesor compactos y una carpeta de concreto asfáltico de 10 cm; en forma aislada en todo el tramo se han realizado bacheos, renivelaciones y tratamientos superficiales.
2. La Secretaría de Comunicaciones y Transportes en el año de 1998 rescató el 65% de autopistas que fueron concesionadas. Un alto porcentaje de estas autopistas se encuentran en proceso de rehabilitación y otras requieren estudios y proyectos para su rehabilitación o reconstrucción, ya que presentan fallas de capacidad estructural y deterioros a los previstos a su diseño.
3. Para fines de aplicación de la metodología del diseño del pavimento, se tomó el subtramo como crítico el km 133+000 al 148+000 que tiene un tránsito promedio diario anual (TPDA) de 30 784 vehículos en ambos sentidos; en los subtramos km 90+000 al 115+000 y 115+000 al 133+000 se diseñarán con el mismo procedimiento de la metodología presentada, ya que se tienen aforos de TPDA de 16 143 y 21 536 vehículos en ambos sentidos respectivamente.
4. Con la información geotécnica e historial de conservación en los cuerpos A y B, la estructura del pavimento cuenta con una base estabilizada con 6% de cemento Pórtland de 21 y 17 cm de espesor compactos en los carriles de baja y alta respectivamente.
5. En la aplicación de los métodos de diseño, se utilizó como datos los módulos elásticos de la estructura del pavimento y terracerías existente, obtenidos por medio de equipo de medición de deflexiones de los carriles de los cuerpos A y B.
6. En la normatividad SCT, se hace énfasis a los requisitos de calidad que deben cumplir los materiales existentes que conforman la estructura del pavimento y terracerías, también se da como guía la normativa de los materiales que deben de usarse al ser reconstruido el subtramo de la autopista.
7. En el análisis de costos, el banco La Cruz (único), para agregar material de grava de 1 ½” a la malla número 4 de base hidráulica producto de trituración total, se encuentra ubicado en el km 113+200 L/I de la autopista, el centro de gravedad del subtramo es de 27.20 km por lo que se tienen acarreo y sobre acarreo con un costo de consideración.

8. En la aplicación de los métodos de diseño, se partió de la hipótesis de recuperar parte de la estructura del pavimento y utilizarla de acuerdo a la calidad que tengan los materiales de las capas, así como de agregar el mínimo volumen de material de banco a las capas por rehabilitar.

9. Se realizaron varias tentativas de diseños en los diferentes métodos de aplicación, utilizando los siguientes materiales en las capas del pavimento.

Capa de base: material recuperado y de banco naturales, material recuperado y de banco estabilizado con emulsión asfáltica de rompimiento medio (EAM-60), material recuperado y de banco estabilizado con cemento asfáltico AC-10 en caliente, material recuperado y de banco estabilizado con cemento asfáltico AC-10 en caliente y aditivo modificador SBS para obtener módulos elásticos de 30 000 y 35 000 kg/cm<sup>2</sup> y material recuperado y de banco estabilizado con cemento Pórtland a razón de 9 y 18% con respecto a su peso volumétrico seco máximo del material recuperado y de banco. Capa de carpeta asfáltica: mezcla de material de banco, cemento asfáltico AC-10 en caliente y aditivo modificador SBS en diferentes porcentajes para obtener módulos de elasticidad de 30 000, 35 000 y 40 000 kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente.

### Conclusiones y recomendaciones

1. De acuerdo con los resultados de los métodos de evaluación del subtramo requiere de:

Estudios y proyecto para su rehabilitación, debido que la superficie de rodamiento presenta deterioros de baches con severidad de graves a muy graves en el cuerpo A y pulido de la superficie de los cuerpos A y B; el índice internacional de rugosidad (IRI) promedio ponderado es de 3.79 m/km, contra 2.81m/km que indica el organismo descentralizado Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos; la calificación estructural a partir del índice estructural ( $I_e$  en mm<sup>2</sup>) en los cuerpos y carriles siguientes.

Cuerpo A carril de baja				Cuerpo B carril de baja			
Calificación			( $I_e$ en mm <sup>2</sup> )	Calificación			( $I_e$ en mm <sup>2</sup> )
10	Excelente	4.05%	< 100	10	Excelente	2.03%	< 100
9	Muy buena	12.84%	100 a 200	9	Muy buena	5.41	100 a 200
8	Buena	62.84%	200 a 400	8	Buena	56.76%	200 a 400
7	Regular	20.27%	400 a 800	7	Regular	34.46%	400 a 800

2. Con la finalidad de absorber los azolves de sólidos y sedimentos en los escurrimientos de agua de las alcantarillas de tubos de concreto armado de diámetros de 0.75 y 0.80 m existentes en el subtramo, así como dar mayor facilidad de manteniendo de limpieza de las mismas alcantarillas, se recomienda sustituirlas por tubos de concreto armado de 1.2 m de diámetro en los siguientes kilómetros: 133+450, 133+850, 134+020, 134+300, 135+590, 136+150, 137+050, 140+400, 140+500, 140+707, 140+950, 141+750, 142+050 y 146+100

3. Las capas de subrasante y subyacente existentes, con respecto a su grado de compactación y espesor son menores que los especificados en la norma SCT, por tanto, estas capas generalmente cumplen con la normatividad vigente. Las capas de sub-base y base hidráulica de acuerdo con los resultados de laboratorio y de campo, éstas no cumplen con la normativa SCT,

porque los suelos que las conforman son gravas y arenas arcillosas con 12% promedio de finos plásticos.

4. En la revisión estructural del pavimento existente se obtuvo: método DISPAV-5 en el cuerpo A carril de baja, el pavimento por fatiga tiene una vida útil de  $3.9 \times 10^6$  por un año y por deformación tiene una vida útil de  $8.2 \times 10^6$  por un año, en el cuerpo B carril de baja por fatiga se tiene una vida útil  $7.7 \times 10^6$  por 2 años y por deformación tiene una vida útil de  $38.00 \times 10^6$  por 5 años; método AASHTO en los cuerpos A y B del carril de baja el pavimento tiene una vida útil de  $35.15 \times 10^6$  para 4.8 años y una vida útil de  $55.10 \times 10^6$  para 7.15 años, respectivamente.

5. Al utilizar módulos elásticos de 35 000 y 40 000  $\text{kg/cm}^2$  en las capas de base estabilizada y carpeta asfáltica con cemento asfáltico en caliente y aditivo modificador SBS, la reducción de espesores en los métodos aplicados es del orden del 5%, la cual no es significativa, ya que su costo total es mayor o igual al 70% con respecto a la base estabilizada con emulsión asfáltica y carpeta de concreto asfáltico con módulos elásticos de 20 000 y 30 000  $\text{kg/cm}^2$ .

6. Los resultados del catálogo de firmes de España, señala que se debe tener una sub-base y base estabilizada con cemento Pórtland de 25 y 22 cm de espesor compactos, carpeta asfáltica de 20 cm compactos y además utilizar la sub-base existente como explanada, por lo que la estructura del pavimento es de mayor espesor y sería de más costo, por lo que no se tomó como alternativa viable. En el catálogo se utiliza un tránsito en ejes sencillos de 12 toneladas.

7. Tomando en cuenta la estructura del pavimento existente, normas SCT vigentes y los métodos de diseño aplicados, los resultados son los siguientes:

a). Alternativas viables y aplicabilidad.

Alternativa	Capa	Espesores, en cm.		
		DISPAV-5	AASHTO	KENLAYER
A	Carpeta	10	10	10
	Base estabilizada con asfalto	25	33	27
	Sub-base	15	20	20
B	Carpeta	10	10	10
	Base estabilizada con asfalto	20	30	21
	Sub-base	15	19	20
C	Carpeta		15	*
	Base estabilizada con cemento Pórtland		30	26
	Sub-base		20	16
Características y Parámetros de diseño		Tipo de carretera, tránsito, nivel de confianza, $VRS_z$ , E y $v$ .	Tránsito, R, E, $S_o$ , $M_R$ , $\Delta PSI$ , $a$ , $a_2$ , $a_3$ , $M_2$ y $M_3$ .	Tránsito, grupos de carga, geometría del vehículo, presión, temperaturas, tipos de carga, E, $M_R$ y $v$ .

\* Microcarpeta (carpeta delgada), sin valor estructural

En el método de DISPAV-5, con respecto a los métodos AASHTO y KENLAYER, los espesores son menores del orden del 21 y 12% respectivamente. Las ventajas que se tienen son: el programa de computadora es iterativo de fácil aplicación, en el diseño acepta módulos de resiliencia mayores de 450 000 psi, los módulos elásticos de las capas no estabilizadas se pueden estimar a partir del valor relativo de soporte crítico, el módulo de rigidez de la carpeta asfáltica se puede estimar por medio de un programa de computadora, además los módulos elásticos y de rigidez se pueden obtener con equipo de medición de deflexiones sobre carreteras en servicio. Las desventajas son: considera únicamente 5 capas del pavimento, no toma en cuenta capas estabilizadas con cemento Pórtland y generalmente los espesores calculados de la capa de sub-base y subrasante son menores de los mínimos especificados.

En el Método AASHTO, con respecto a los métodos DISPAV-5 y KENLAYER, los espesores son mayores del orden del 21 y 9% respectivamente. Las ventajas que se tienen son: es aplicable para capas estabilizadas con asfalto o cemento Pórtland, el programa de computadora es iterativo de fácil aplicación, presenta períodos de diseño hasta 50 años y los módulos elásticos se pueden obtener con equipo de medición de deflexiones sobre carreteras en servicio. Las desventajas son: para la obtención del módulo de resiliencia de la capa de subrasante requiere mayor cantidad de pruebas de laboratorio de tipo de compresión triaxial cíclica durante el año, en el diseño no admite módulos de resiliencia mayores de 450 000 psi y al calcular las capas superiores del pavimento cercanas a 450 000 psi, se requiere estabilizar la capa de subrasante o de cimentación para aumentar su módulo resiliente.

En el método KENLAYER, con respecto a los métodos DISPAV-5 y AASHTO, el espesor es mayor del orden del 12% y menor del orden del 9% respectivamente. Las ventajas que se tienen son: es aplicable para capas estabilizadas con asfalto, en el diseño acepta módulos de resiliencia mayores de 450 000 psi, considera diferentes temperaturas en la obtención del módulo resiliente en la carpeta asfáltica, toma en cuenta uno o varios números de grupos de carga y presenta períodos de diseño hasta 50 años. Las desventajas son: no existe la opción en el diseño de carpeta asfáltica y base estabilizada con cemento Pórtland, el programa de computadora no es de fácil aplicación; no es común la aplicación en el diseño en pavimentos flexibles, ya que el modelo implica la aceptación de las hipótesis de la teoría de la elasticidad y visco elasticidad; para carpetas delgadas los esfuerzos de tensión y la preedición por agrietamiento por fatiga pueden ser no reales y los módulos resilientes son obtenidos por medio de pruebas de compresión triaxiales cíclicas.

b). Espesores totales y el número estructural equivalente (SN) en el diseño de los métodos son:

Alternativa	Espesor total (cm)	Número estructural (SN)		
		DISPAV-5	AASHTO	KENLAYER
A	50, 63 y 57	5.33	6.72	6.08
B	45, 59 y 51	5.10	6.69	5.78
C	- 65 y 45	-	6.72	4.65

Los resultados de los espesores son variables, por lo que se confirma que no se tiene una metodología de diseño en pavimentos adecuada; el número estructural es un término utilizado por AASHTO para hacer una comparativa en forma cuantitativa, por lo que se tomó esta

consideración para la propuesta de selección de las alternativas viables de construcción entre los métodos AASHTO y KENLAYER que presentan menos diferencia en porcentaje, en número estructural, haciendo su correlación respectiva.

8. De las alternativas viables de construcción, se analizaron sus costos de construcción inicial, conservación y operación; en los costos de construcción se tienen costos adicionales de conservación del 22, 5 y 5% y costos de operación del 12, 7 y 11% respectivamente.

9. En la aplicación de la metodología de diseño, se tomó en cuenta las condiciones imperantes que se tienen en el subtramo de la autopista, como: el clima al proponer el tipo de ligante en la carpeta asfáltica, procedimiento constructivo en que es común la recuperación de pavimentos que evita la explotación a menor escala de bancos de materiales y por consecuencia daños del medio ambiente, el drenaje que nos permita el desalojo del agua de la superficie de la corona, el encauzamiento y conducción del agua con azolve a través de las alcantarillas con capacidad suficiente, evitando con ello la saturación de los materiales de las terracerías y cambios de humedad de la estructura del pavimento.

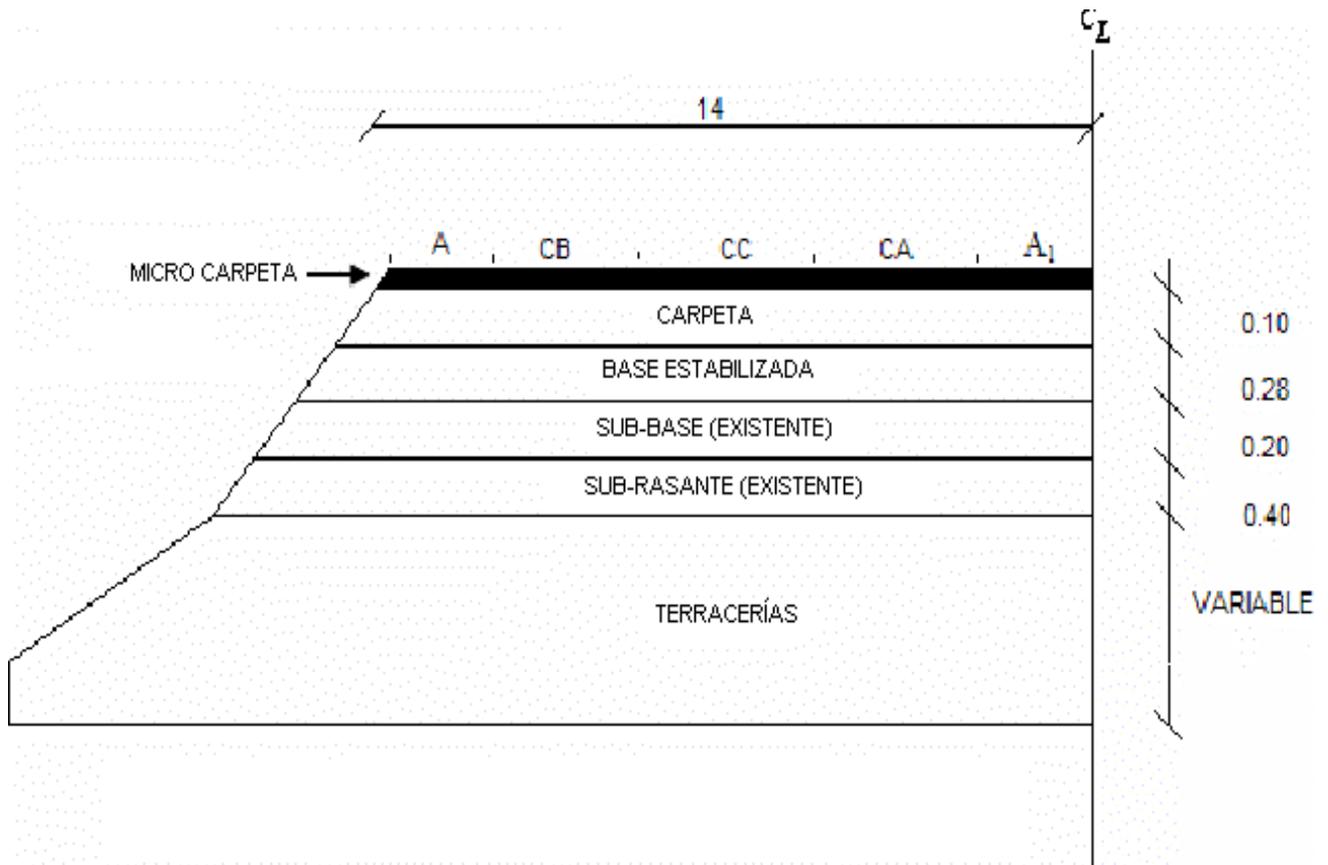
10. Con los resultados obtenidos de las capas superiores, se observó que éstas son de mayor espesor y calidad, minimizándose las inferiores, por tanto, los programas de conservación, reconstrucción y refuerzo, serán de mayor importancia al crecer el flujo vehicular aumentando la estructura del pavimento hacia arriba.

11. Con base en la metodología presentada, la solución viable óptima para la rehabilitación del pavimento del subtramo de la autopista es: recuperar, agregar material de banco con calidad de base hidráulica y construir una base estabilizada de 28 cm de espesor compactos con emulsión asfáltica de rompimiento medio a razón de 95 L/m<sup>3</sup>, con respecto a su peso volumétrico seco máximo de la mezcla de material recuperado y de banco, construir una carpeta de concreto asfáltico de 10 cm de espesor compactos con material pétreo y cemento asfáltico AC-10, agregando aditivo modificador SBS en un 2.5% con respecto al peso del cemento asfáltico y construir una micro carpeta de 2 cm de espesor compactos con material pétreo y cemento asfáltico AC-10 agregando aditivo modificador SBS en un 2.5% con respecto al peso del cemento asfáltico; su costo total es de \$ 14 711 018.20 por kilómetro. En la figura 5.1, se presenta la sección del pavimento flexible.

12. En autopistas rehabilitadas que presenten las características de TPDA mayores o iguales de 25 000 vehículos en ambos sentidos y tránsito pesado mayores del 25%, se recomienda instrumentar tramos de prueba con la finalidad de que los métodos de regresión, sean ajustados para una mayor confiabilidad de resultados.

13. Se sugiere aplicar mayor número de metodologías de diseño de pavimentos flexibles de tipo mecanicista para evaluar con los métodos de regresión y tener mayor objetividad en los resultados que nos permitan seleccionar con mayor aproximación aquellos que sean congruentes e imperantes en las condiciones que se tienen en el país.

AUTOPISTA: MÉXICO- QUERÉTARO  
TRAMO: TEPOZOTLÁN – PALMILLAS, KM 90+000-148+000  
SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000- 148+000



- A acotamiento 2.00 m.
- CB carril de baja 3.50 m.
- CC carril central 3.50 m.
- CA carril de alta 3.50 m.
- A<sub>1</sub> acotamiento interior 1.35 m.

Figura 5.1 Sección del pavimento flexible viable óptimo.

**AUTOPISTA: MÉXICO- QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN- PALMILLAS, KM 90+000-148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN- PALMILLAS**

**TABLA A.1 TIPOS DE FALLAS GRAVES Y MUY GRAVES**

Cuerpo	Km al Km	Deterioro	Carril
A	143 + 100 - 143 + 200	baches	Central
A	134 + 000 - 134 + 300	“	Baja
A	135 + 700 - 135 + 800	“	Baja
A	137 + 100 - 137 + 200	“	Baja
A	137 + 400 - 137 + 800	“	Baja
B	138 + 000 - 138 + 800	“	Baja
B	138 + 000 - 139 + 900	“	Baja
B	138 + 00 - 139 + 900	grietas longitudinales	Baja
B	135 + 000 - 135 + 100	“	Central
B	135 + 000 - 135 + 100	“	Alta
B	135 + 800 - 135 + 900	desprendimiento	Baja
B	137 + 100 - 137 + 200	“	Baja
B	137 + 100 - 137 + 500	“	Baja
A	138 + 000 - 139 + 900	“	Baja
B	143 + 200 - 143 + 300	grietas piel de cocodrilo	Central
B	138 + 000 - 139 + 900	“	Baja
B	136 + 000 - 137 + 900	“	Central
A	138 + 000 - 138 + 500	“	Central
A	137 + 000 - 138 + 000	pulido de superficie	Central
A	139 + 000 - 140 + 700	“	Central
A	141 + 000 - 147 + 600	“	Central
B	136 + 000 - 137 + 900	“	Central
B	143 + 000 - 147 + 900	“	Central

AUTOPISTA: MÉXICO-QUERÉTARO  
 TRAMO: KM 90+000 – 148+000  
 SUBTRAMO: KM 133+000 – 148+000

TABLA A.2 RESUMEN PROMEDIO PONDERADOS DE IRI (M/KM) Y PR (MM)  
 POR CARRIL Y SECCIÓN

SENTIDO 1  
 CARRIL 1

DEL KM	AL KM	IRI (M/KM)			PR (MM)		
		IZQ.	DER.	PROMEDIO.	IZQ.	DER.	PROMEDIO.
90.00	100.00	1.82	1.80	1.81	1.05	1.36	1.21
100.00	110.00	2.23	1.95	2.09	0.07	0.29	0.18
110.00	120.00	1.66	1.79	1.73	0.33	1.37	0.85
120.00	130.00	1.59	1.43	1.51	0.35	0.31	0.33
130.00	140.00	1.99	1.67	1.83	2.60	1.42	2.01
140.00	147.80	1.87	1.59	1.73	2.03	0.73	1.38
PROMEDIO PONDERADO		1.86	1.70	1.78	1.07	0.91	1.05

SENTIDO 1  
 CARRIL 2

DEL KM	AL KM	IRI (M/KM)			PR (MM)		
		IZQ.	DER.	PROMEDIO.	IZQ.	DER.	PROMEDIO.
90.00	100.00	1.98	1.61	1.80	1.90	3.03	2.49
100.00	110.00	2.02	1.92	1.97	0.36	0.47	0.41
110.00	120.00	1.89	1.83	1.86	0.48	0.92	0.70
120.00	130.00	1.63	1.63	1.63	0.50	0.92	0.71
130.00	140.00	2.00	1.85	1.92	1.74	2.54	2.14
140.00	147.80	1.79	1.60	1.69	0.85	1.96	1.41
PROMEDIO PONDERADO		1.88	1.74	1.81	0.97	1.65	1.31

SENTIDO 1  
 CARRIL 3

DEL KM	AL KM	IRI (M/KM)			PR (MM)		
		IZQ.	DER.	PROMEDIO.	IZQ.	DER.	PROMEDIO.
90.00	100.00	2.55	2.36	2.46	4.63	3.84	4.24
100.00	110.00	2.45	2.43	2.44	3.10	3.89	3.49
110.00	120.00	3.56	3.06	3.31	9.23	1.65	5.44
120.00	130.00	2.95	2.54	2.75	11.43	0.96	6.19
130.00	140.00	2.44	2.46	2.45	2.00	2.23	2.11
140.00	147.80	2.93	2.56	2.75	6.22	3.04	4.63
PROMEDIO PONDERADO		2.81	2.56	2.69	6.10	2.60	4.35

AUTOPISTA: MÉXICO - QUERÉTARO.

TRAMO: TEPOZOTLÁN - PALMILLAS, KM 90+000 – 148+000

SUBTRAMO: POLOTITLÁN – PALMILLAS, KM133+000-148+000

TABLA A.3 RESUMEN PROMEDIO PONDERADOS DE IRI (M/KM) Y PR (MM)  
 POR CARRIL Y SECCIÓN

SENTIDO 2

CARRIL 1

DEL KM	AL KM	IRI (M/KM)			PR (MM)		
		IZQ.	DER.	PROMEDIO.	IZQ.	DER.	PROMEDIO.
90.00	100.00	2.47	2.20	2.33	1.48	0.72	1.1°
100.00	110.00	2.7	1.86	1.96	1.36	0.31	0.84
110.00	120.00	1.88	1.73	1.80	2.02	0.86	1.44
120.00	130.00	1.86	1.61	1.74	1.55	1.09	1.32
130.00	140.00	2.35	2.35	2.35	0.33	0.21	0.27
140.00	147.80	2.12	2.17	2.15	0.17	0.45	0.31
PROMEDIO PONDERADO		2.13	1.99	2.05	1.15	0.60	0.88

SENTIDO 2

CARRIL 2

DEL KM	AL KM	IRI (M/KM)			PR (MM)		
		IZQ.	DER.	PROMEDIO.	IZQ.	DER.	PROMEDIO.
90.00	100.00	2.27	2.02	2.14	3.73	4.66	4.20
100.00	110.00	2.03	1.91	1.97	1.69	2.78	2.24
110.00	120.00	1.92	1.79	1.86	4.61	5.19	4.90
120.00	130.00	2.00	1.86	1.93	2.78	3.62	3.20
130.00	140.00	2.43	2.42	2.42	0.39	0.72	0.56
140.00	147.80	1.66	1.68	1.67	0.19	1.25	0.72
PROMEDIO PONDERADO		2.05	1.95	2.00	2.23	3.03	2.63

SENTIDO 2

CARRIL 3

DEL KM	AL KM	IRI (M/KM)			PR (MM)		
		IZQ.	DER.	PROMEDIO.	IZQ.	DER.	PROMEDIO.
90.00	100.00	3.21	2.78	2.99	4.01	1.19	2.60
100.00	110.00	5.99	4.31	5.15	11.97	3.96	7.96
110.00	120.00	3.97	3.22	3.59	9.32	4.23	6.77
120.00	130.00	5.21	4.26	4.74	10.14	2.55	6.35
130.00	140.00	3.96	3.24	3.60	6.76	3.96	5.36
140.00	147.80	3.06	2.55	2.80	4.69	3.29	3.99
PROMEDIO PONDERADO		4.23	3.39	3.79	7.82	3.19	5.50

AUTOPISTA: MÉXICO- QUERÉTARO, TRAMO: TEPOZOTLÁN – PALMILLAS, KM 90+000-148+000, SUBTRAMO: POLOTITLÁN- PALMILLAS, KM 133+000- 148+000

TABLA A. 4 DE DESPLAZAMIENTO  
 DESPLAZAMIENTO (mm) Y CARGA (kgf)

CUERPO A BAJA	CARGA	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
132+200	6172	0.61	0.37	0.26	0.20	0.13	0.10	0.06
132+600	6143	0.39	0.21	0.18	0.16	0.12	0.09	0.05
133+000	6028	1.20	0.55	0.30	0.21	0.14	0.10	0.07
133+400	6547	0.61	0.34	0.23	0.17	0.11	0.08	0.05
133+800	5999	0.75	0.40	0.26	0.19	0.13	0.09	0.06
134+200	5977	1.25	0.45	0.25	0.18	0.12	0.09	0.05
134+600	5855	0.56	0.28	0.20	0.17	0.13	0.10	0.06
135+000	7174	0.63	0.27	0.15	0.10	0.07	0.06	0.06
135+400	6265	0.33	0.22	0.17	0.13	0.08	0.05	0.04
135+800	6388	0.49	0.31	0.24	0.20	0.15	0.11	0.07
136+200	6633	0.52	0.25	0.16	0.12	0.08	0.07	0.06
136+600	6222	0.56	0.20	0.14	0.13	0.11	0.09	0.06
136+600	6165	0.54	0.20	0.14	0.13	0.11	0.09	0.06
137+000	5970	0.62	0.39	0.28	0.22	0.15	0.11	0.07
137+400	5739	0.60	0.33	0.23	0.20	0.14	0.10	0.06
137+810	6431	0.68	0.31	0.23	0.20	0.14	0.10	0.06
138+200	6172	0.56	0.20	0.13	0.11	0.09	0.07	0.05
138+600	6554	0.56	0.21	0.15	0.14	0.12	0.10	0.07
139+000	6316	0.72	0.37	0.28	0.23	0.16	0.11	0.07
139+400	6503	0.28	0.15	0.13	0.12	0.10	0.08	0.06
139+800	6078	0.52	0.37	0.28	0.22	0.14	0.10	0.05
140+200	5977	0.81	0.38	0.27	0.22	0.15	0.10	0.06
140+600	6136	0.66	0.30	0.22	0.18	0.13	0.10	0.06
141+000	6028	0.57	0.36	0.27	0.22	0.15	0.11	0.07
141+400	6648	0.61	0.41	0.31	0.24	0.16	0.12	0.07
141+800	6907	0.85	0.46	0.32	0.25	0.17	0.12	0.07
142+200	6258	0.81	0.27	0.19	0.18	0.15	0.10	0.06
142+600	6294	0.71	0.37	0.27	0.23	0.16	0.12	0.07
143+000	5999	1.00	0.59	0.40	0.29	0.17	0.12	0.07
143+400	6172	0.63	0.44	0.33	0.26	0.16	0.11	0.07
143+800	6049	0.84	0.52	0.36	0.27	0.17	0.13	0.08
144+200	6323	0.51	0.38	0.30	0.23	0.15	0.10	0.07
144+600	6799	0.52	0.29	0.21	0.17	0.13	0.10	0.06
145+000	6229	0.67	0.39	0.30	0.23	0.16	0.11	0.07
145+400	6676	0.50	0.31	0.22	0.18	0.13	0.09	0.06
145+800	6265	0.65	0.41	0.31	0.25	0.18	0.14	0.10
146+200	6359	0.47	0.27	0.20	0.15	0.11	0.08	0.05
146+60	5660	1.25	0.62	0.43	0.31	0.21	0.14	0.08
147+00	6323	0.58	0.35	0.27	0.23	0.18	0.14	0.09
147.400	5761	0.28	0.17	0.13	0.10	0.06	0.05	0.03
147+800	6114	1.09	0.70	0.49	0.36	0.20	0.12	0.07
147+92	5977	0.61	0.39	0.28	0.21	0.14	0.10	0.06

**AUTOPISTA: MÉXICO- QUERÉTARO, TRAMO: TEPOZOTLÁN – PALMILLAS, KM 90+000-148+000, SUBTRAMO: POLOTITLÁN- PALMILLAS, KM 133+000- 148+000**

**TABLA A. 5 DE DESPLAZAMIENTO  
 DESPLAZAMIENTO (mm) Y CARGA (kgf)**

CUERPO A MEDIA	CARGA	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
133+200	6129	0.20	0.14	0.12	0.11	0.10	0.08	0.06
133+600	6172	0.20	0.14	0.13	0.12	0.10	0.08	0.05
134+000	5314	0.23	0.17	0.15	0.14	0.11	0.09	0.05
134+400	5350	0.23	0.16	0.13	0.12	0.09	0.07	0.04
134+800	5523	0.21	0.15	0.13	0.12	0.10	0.08	0.05
135+200	6193	0.18	0.14	0.13	0.12	0.10	0.08	0.05
135+600	6107	0.24	0.17	0.14	0.12	0.08	0.06	0.04
136+000	5681	0.32	0.25	0.22	0.19	0.15	0.11	0.07
136+400	6035	0.18	0.13	0.11	0.09	0.07	0.07	0.04
136+800	5559	0.13	0.10	0.09	0.09	0.08	0.07	0.05
137+200	5768	0.21	0.17	0.15	0.14	0.12	0.10	0.07
137+600	5198	0.28	0.20	0.17	0.16	0.12	0.09	0.06
138+000	5465	0.24	0.19	0.18	0.17	0.14	0.11	0.07
138+400	5581	0.23	0.19	0.17	0.15	0.12	0.10	0.06
138+800	5689	0.17	0.12	0.11	0.10	0.08	0.07	0.06
139+200	5581	0.14	0.11	0.11	0.09	0.09	0.07	0.05
139+600	5242	0.22	0.17	0.14	0.13	0.10	0.07	0.05
140+000	5321	0.17	0.12	0.10	0.10	0.08	0.06	0.03
140+400	5458	0.23	0.18	0.17	0.15	0.12	0.10	0.06
140+800	4939	0.30	0.26	0.24	0.22	0.18	0.14	0.09
141+200	5227	0.32	0.26	0.23	0.21	0.16	0.13	0.08
141+600	5335	0.29	0.24	0.21	0.20	0.16	0.13	0.08
142+000	5033	0.38	0.31	0.27	0.25	0.19	0.14	0.08
142+400	5573	0.26	0.22	0.19	0.18	0.14	0.10	0.06
142+800	5047	0.27	0.23	0.21	0.20	0.16	0.13	0.07
143+200	5097	0.29	0.24	0.21	0.19	0.14	0.11	0.07
143+600	5025	0.28	0.23	0.21	0.19	0.15	0.11	0.06
144+000	5040	0.31	0.25	0.22	0.20	0.16	0.12	0.07
144+400	5184	0.25	0.20	0.18	0.17	0.14	0.11	0.07
144+800	5278	0.22	0.18	0.16	0.15	0.12	0.10	0.07
145+200	5588	0.27	0.22	0.20	0.18	0.15	0.13	0.08
145+600	5422	0.23	0.17	0.15	0.14	0.11	0.08	0.05
146+000	5141	0.25	0.20	0.18	0.16	0.13	0.11	0.07
146+400	5134	0.22	0.18	0.16	0.15	0.12	0.09	0.05
146+800	5307	0.26	0.21	0.19	0.18	0.15	0.12	0.08
147+200	5134	0.18	0.13	0.11	0.10	0.08	0.06	0.04
147+600	5544	0.14	0.10	0.09	0.08	0.07	0.05	0.04

**AUTOPISTA: MÉXICO- QUERÉTARO, TRAMO: TEPOZOTLÁN – PALMILLAS, KM 90+000-148+000, SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000- 148+000**

**TABLA A. 6 DE DESPLAZAMIENTO  
 DESPLAZAMIENTO (mm) Y CARGA (kgf)**

<b>CUERPO B MEDIA</b>	<b>CARGA</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S7</b>
132+000	5141	0.18	0.14	0.12	0.11	0.09	0.07	0.04
132+400	5234	0.36	0.30	0.26	0.24	0.19	0.14	0.09
132+800	5278	0.28	0.22	0.19	0.16	0.12	0.09	0.05
133+200	5422	0.31	0.23	0.19	0.17	0.13	0.09	.06
133+600	5256	0.24	0.20	0.18	0.17	0.13	0.11	0.06
134+000	5292	0.24	0.18	0.16	0.14	0.11	0.09	0.05
134+400	5343	0.25	0.19	0.17	0.15	0.12	0.09	0.05
134+800	5148	0.29	0.22	0.19	0.16	0.12	0.10	0.06
135+600	5198	0.25	0.19	0.17	0.15	0.11	0.09	0.05
136+000	5076	0.63	0.46	0.37	0.31	0.21	0.15	0.08
136+400	5004	0.45	0.36	0.31	0.27	0.20	0.14	0.07
136+800	5119	0.42	0.34	0.29	0.26	0.20	0.14	0.08
137+200	51.12	0.76	0.60	0.51	0.43	0.32	0.23	0.11
137+600	5141	0.31	0.23	0.19	0.16	0.11	0.08	0.04
138+000	5040	0.37	0.28	0.23	0.20	0.14	0.10	0.05
138+400	4968	0.40	0.32	0.27	0.24	0.18	0.14	0.08
138+800	5148	0.16	0.13	0.12	0.11	0.09	0.08	0.05
139+200	5334	0.19	0.17	0.16	0.15	0.13	0.11	0.07
139+600	5134	0.16	0.14	0.13	0.12	0.10	0.08	0.05
140+000	5271	0.17	0.14	0.13	0.12	0.09	0.07	0.05
140+400	5170	0.18	0.16	0.14	0.13	0.11	0.08	0.06
141+200	5170	0.20	0.17	0.16	0.15	0.13	0.10	0.07
141+600	5198	0.17	0.15	0.14	0.13	0.11	0.09	0.06
142+000	5090	0.16	0.14	0.13	0.112	0.10	0.08	0.05
142+400	5105	0.15	0.13	0.12	0.11	0.09	0.08	0.05
142+800	5148	0.15	0.13	0.12	0.11	0.10	0.08	0.06
143+200	5054	0.17	0.15	0.13	0.13	0.10	0.09	0.06
143+600	5170	0.18	0.15	0.13	0.12	0.10	0.08	0.05
144+000	5177	0.17	0.15	0.13	0.13	0.11	0.09	0.06
144+400	5090	0.17	0.15	0.114	0.13	0.11	0.09	0.06
144+800	5444	0.11	0.09	0.08	0.08	0.07	0.06	0.04
145+200	5076	0.11	0.10	0.09	0.09	0.08	0.07	0.05
145+600	5343	0.14	0.12	0.11	0.10	0.09	0.07	0.04
146+000	5501	0.12	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.04
146+400	5919	0.12	0.10	0.10	0.10	0.09	0.08	0.04
146+800	5429	0.15	0.12	0.11	0.11	0.10	0.08	0.06
147+200	5415	0.22	0.17	0.15	0.14	0.11	0.09	0.06
147+600	5249	0.15	0.12	0.11	0.11	0.09	0.07	0.05
147+900	54+000	0.08	0.06	0.05	0.05	0.04	0.03	0.02

**AUTOPISTA: MÉXICO- QUERÉTARO, TRAMO: TEPOZOTLÁN – PALMILLAS, KM 90+000-148+000, SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000- 148+000**

**TABLA A. 7 DE DESPLAZAMIENTO  
 DESPLAZAMIENTO (mm) Y CARGA (kgf)**

<b>CUERPO B BAJA</b>	<b>CARGA</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S7</b>
132+200	5761	0.70	0.52	0.40	0.31	0.20	0.14	0.09
132+600	5583	0.51	0.27	0.19	0.15	0.10	0.06	0.03
133+000	5811	0.55	0.40	0.31	0.25	0.17	0.12	0.07
133+400	5314	0.36	0.28	0.24	0.21	0.15	0.11	0.06
133+800	53.28	0.34	0.27	0.23	0.20	0.16	0.12	0.07
134+200	6539	0.55	0.36	0.28	0.22	0.15	0.11	0.06
134+600	5761	0.40	0.24	0.19	0.16	0.13	0.10	0.07
135+000	6388	0.58	0.37	0.27	0.21	0.14	0.11	0.07
135+400	6539	0.55	0.36	0.27	0.21	0.12	0.08	0.05
136+200	6718	0.48	0.31	0.23	0.19	0.12	0.09	0.06
136+600	5667	0.57	0.38	0.30	0.25	0.18	0.13	0.08
137+000	5955	0.51	0.30	0.23	0.19	0.14	0.11	0.07
137+4000	5645	0.68	0.43	0.31	0.23	0.15	0.11	0.06
137+800	5588	0.64	0.40	0.29	0.22	0.14	0.09	0.06
138+200	5876	0.50	0.36	0.29	0.24	0.17	0.12	0.07
138+600	6532	0.47	0.28	0.21	0.17	0.13	0.09	0.06
139+000	6713	0.67	0.33	0.25	0.20	0.14	0.11	0.08
139+400	6799	0.38	0.21	0.15	0.13	0.10	0.07	0.05
139+800	5855	0.33	0.19	0.14	0.11	0.08	0.06	0.04
140+200	6273	0.48	0.24	0.17	0.14	0.10	0.07	0.04
140+600	4741	0.59	0.39	0.28	0.22	0.14	0.10	0.07
141+000	6330	0.43	0.26	0.19	0.15	0.11	0.09	0.06
141+400	6020	0.64	0.40	0.30	0.24	0.15	0.11	0.08
141+800	7008	0.59	0.36	0.26	0.20	0.14	0.10	0.06
142+200	6244	0.54	0.28	0.21	0.17	0.13	0.09	0.04
142+600	6366	0.56	0.35	0.25	0.18	0.14	0.10	0.06
143+000	6294	0.67	0.43	0.32	0.26	0.17	0.11	0.07
143+400	5955	0.47	0.34	0.26	0.22	0.14	0.10	0.05
143+800	6453	0.58	0.36	0.26	0.21	0.15	0.11	0.07
144+200	5573	0.78	0.51	0.23	0.29	0.17	0.11	0.07
144+400	5919	0.54	0.38	0.30	0.24	0.17	0.12	0.07
145+000	5984	0.51	0.33	0.25	0.20	0.14	0.10	0.07
145+400	6251	0.60	0.43	0.34	0.27	0.18	0.14	0.09
145+800	5811	0.74	0.52	0.39	0.30	0.19	0.13	0.08
146+200	6338	0.77	0.51	0.37	0.27	0.17	0.11	0.06
146+600	6813	0.51	0.30	0.22	0.17	0.12	0.09	0.06
147+000	6157	0.56	0.37	0.26	0.19	0.11	0.07	0.05
147+400	6734	0.49	0.24	0.18	0.15	0.12	0.08	0.05
147+800	6338	0.52	0.35	0.26	0.20	0.13	0.09	0.06
147+900	6352	0.30	0.22	0.18	0.15	0.10	0.07	0.06

**AUTOPISTA: MÉXICO – QUERÉTARO**  
**TRAMO: KM 90 + 000 – 148+ 000**  
**SUB - TRAMO: KM 90+000-107+000**

TPDA = 16 143 Vehículos en ambos sentidos.

Composición vehicular: A = 53.00% B = 30.00% y C = 17.00%

Cuerpo: A carril: de baja

**PROMEDIO DE ESPESORES Y CALIDAD DE LOS MATERIALES**

Carpeta	C. A = 6%			30
C				
Base hidráulica	comp. = 91%	EA = 31%		19
B GP-GC	W = 10%	VRS = 99%		
	LL = 30%			
Sub-base SB estabilizada				14
Subrasante	comp. = 90%	EA = 31%		17
SR SC	W = 18%	VRS = 34%		
	LL = 35%			
Subyacente	comp. = 90%	EA = 19%		24
SY SC	W = 25%	VRS = 26%		
	LL = 40%			
T.N	comp. = 91%	EA = 20%		
Terreno natural	W = 23%	VRS = 33%		
SC	LL = 36%			

Nota. En algunos sondeos se encontró capas de subrasante y terraplén

Figura A.1 Promedio de espesores y calidad de los materiales

**AUTOPISTA: MÉXICO – QUERÉTARO**  
**TRAMO: KM 90 + 000 – 148+ 000**  
**SUB - TRAMO: KM 107+000-122+000**

TPDA = 22 478 Vehículos en ambos sentidos.

Composición vehicular: A = 54.00% B =26.50% y C = 19.50%

Cuerpo: A carril: de baja

**PROMEDIO DE ESPEORES Y CALIDAD DE LOS MATERIALES**

Carpeta	C. A = 6%			16
C				
Base hidráulica	comp. = 90%	EA = 33%		21
B GP-GC	W = 11% LL = 31%	VRS = 112%		
Sub-base				
SB estabilizada				17
Subrasante	comp. = 91%	EA = 21%		
SR SC	W = 21% LL = 37%	VRS = 33%		19
Subyacente	comp. = 90%	EA = 24%		
SY SC	W = 25 % LL = 36%	VRS = 27%		25
T.N	comp. = 90%	EA = 22%		
Terreno natural	W = 22 % SC LL = 36%	VRS = 25%		

Nota. En algunos sondeos se encontró capa de sub-base y terraplén

Figura A.2 Promedio de espesores y calidad de los materiales

**AUTOPISTA: MÉXICO – QUERÉTARO**  
**TRAMO: KM 90 + 000 – 148+ 000**  
**SUB - TRAMO: KM 122+000-133+000**

TPDA = 2I 536 Vehículos en ambos sentidos.

Composición vehicular: A = 45.50%                      B = 31.50% y    C = 23.00%

Cuerpo: A carril: de baja

**PROMEDIO DE ESPESORES Y CALIDAD DE LOS MATERIALES**

Carpeta	C. A = 5.95%			14
C				
Base hidráulica	comp. = 92%	EA = 21%		24
B	GP-GC	W = 11% LL = 41%	VRS = 102%	
Sub-base SB estabilizada				20
Subrasante	comp. = 90%	EA = 27%		26
SR	GC	W = 23% LL = 36%	VRS = 39%	
Subyacente	comp. = 91%	EA = 21%		19
SY	SC	W = 21% LL = 21%	VRS = 31%	
Terraplén	comp. = 90%	EA = 14%		
SC	W = 23% LL = 43%	VRS = 24%		

Nota. En algunos sondeos se encontró la capa de sub-base hidráulica

Figura A.3 Promedio de espesores y calidad de los materiales

**AUTOPISTA: MÉXICO – QUERÉTARO**  
**TRAMO: KM 90 + 000 – 148+ 000**  
**SUB - TRAMO: KM 133+000-148+000**

TPDA = 30 784 Vehículos en ambos sentidos.

Composición vehicular: A = 56.50%      B = 6.40% y    C = 37.10%

Cuerpo: A      carril: de baja

**PROMEDIO DE ESPESORES Y CALIDAD DE LOS MATERIALES**

Carpeta	C. A = 6%		12
C			
Base hidráulica	comp. = 90%	EA = 32%	18
B      GP-GC	W = 13% LL = 36%	VRS = 107%	
Sub-base SB estabilizada			17
Subrasante	comp. = 91%	EA = 22%	23
SR      GC	W = 17% LL = 34%	VRS = 27%	
Subyacente	comp. = 90%	EA = 22%	20
SY      SC	W = 20% LL = 39%	VRS = 35%	
Terraplén SC	comp. = 91% W = 25% LL = 36%	EA = 20% VRS = 20%	

Figura A.4 Promedio de espesores y calidad de los materiales













AUTOPISTA: MÉXICO-QUERÉTARO  
TRAMO: DEL km 90+000 AL km 147+000  
CUERPO: A  
CARRIL: BAJA

### CALIFICACION ESTRUCTURAL

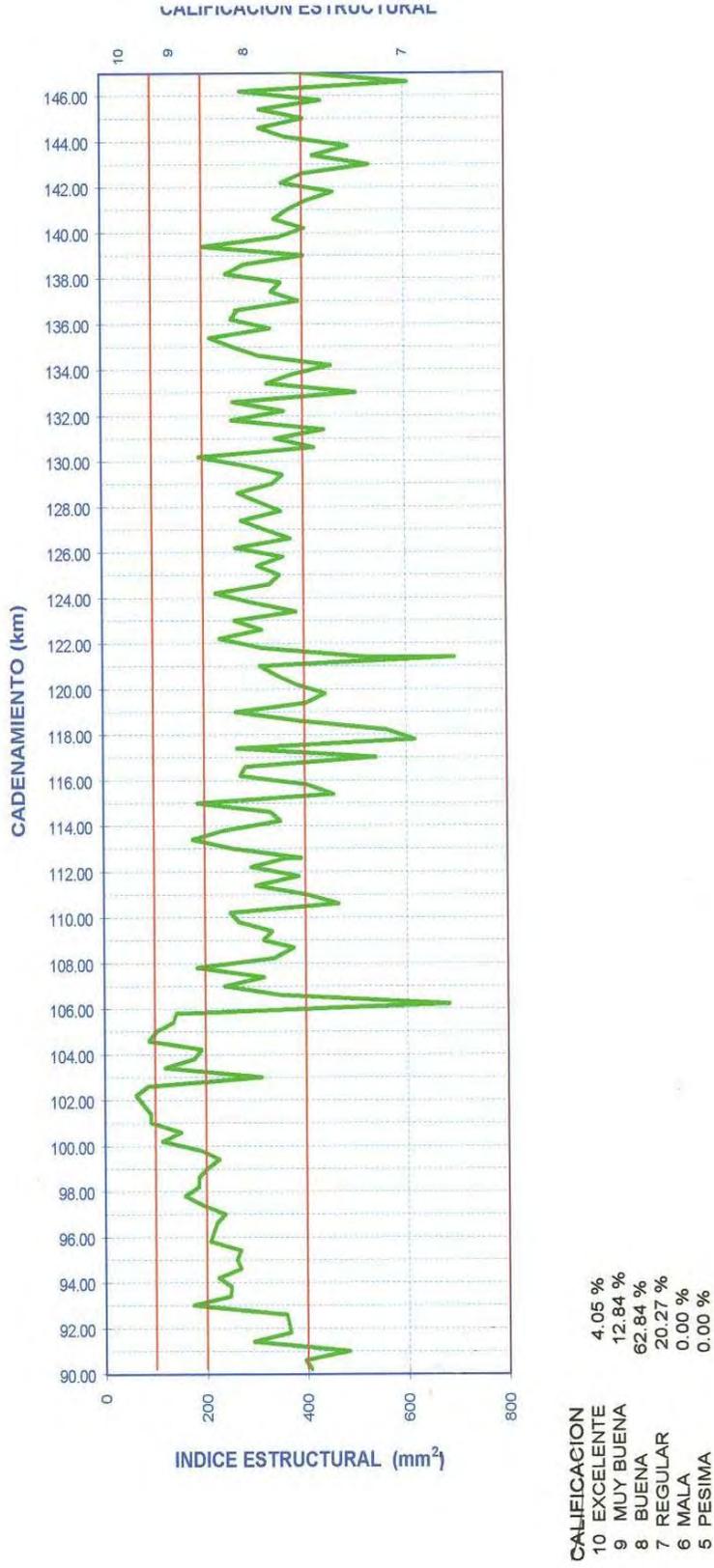
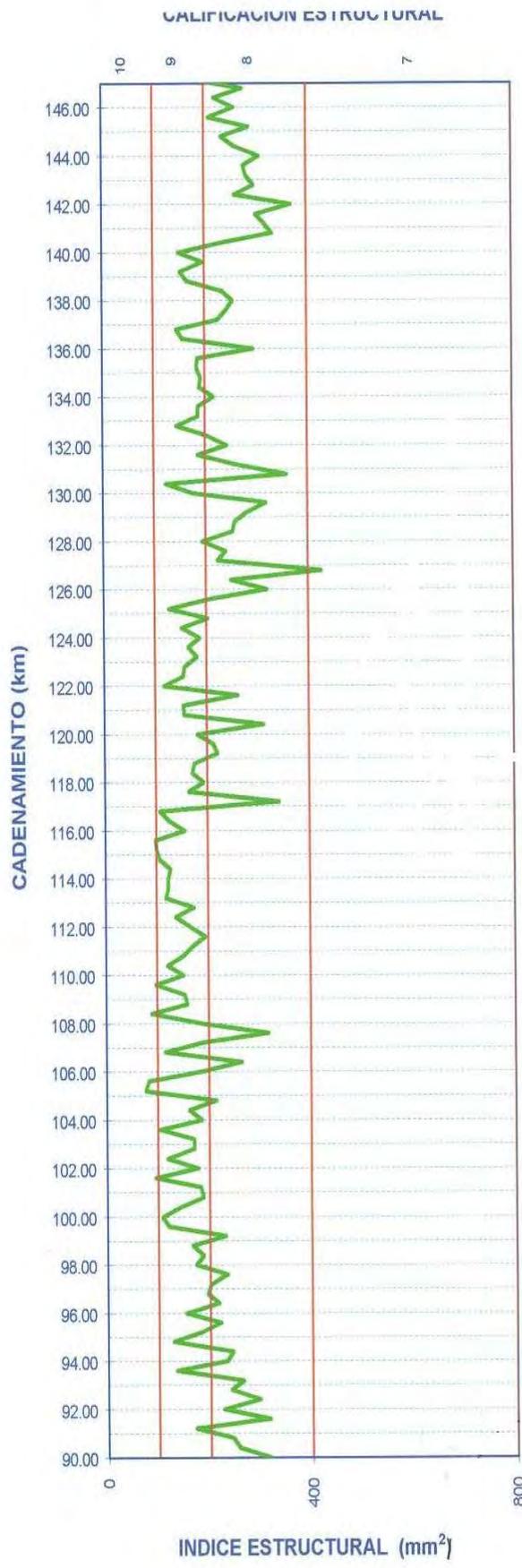


Figura A.11 Calificación estructural  
(Referencia 3)

AUTOPISTA: MÉXICO-QUERÉTARO  
 TRAMO: DEL km 90+000 AL km 147+000  
 CUERPO: A  
 CARRIL: CENTRAL

### CALIFICACION ESTRUCTURAL

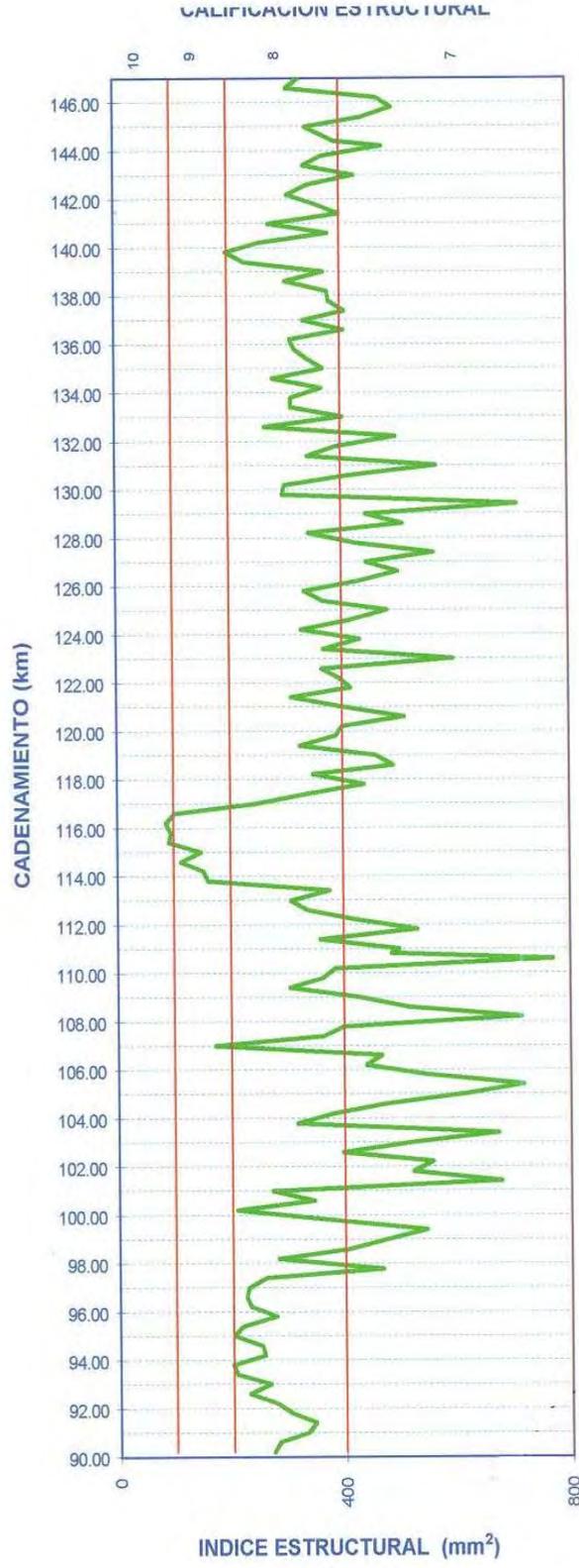


CALIFICACION	Porcentaje
10 EXCELENTE	4.05 %
9 MUY BUENA	52.70 %
8 BUENA	40.54 %
7 REGULAR	0.68 %
6 MALA	0.00 %
5 PESIMA	0.00 %

Figura A.12 Calificación estructural  
 (Referencia 3)

AUTOPISTA: MÉXICO-QUERÉTARO  
 TRAMO: DEL km 90+000 AL km 147+000  
 CUERPO: B  
 CARRIL: BAJA

### CALIFICACION ESTRUCTURAL



CALIFICACION	%
10 EXCELENTE	2.03 %
9 MUY BUENA	5.41 %
8 BUENA	56.76 %
7 REGULAR	34.46 %
6 MALA	0.00 %
5 PESIMA	0.00 %

Figura A.13 Calificación estructural  
 (Referencia 3)

AUTOPISTA: MÉXICO-QUERÉTARO  
 TRAMO: DEL km 90+000 AL km 147+000  
 CUERPO: B  
 CARRIL: CENTRAL

CALIFICACION ESTRUCTURAL

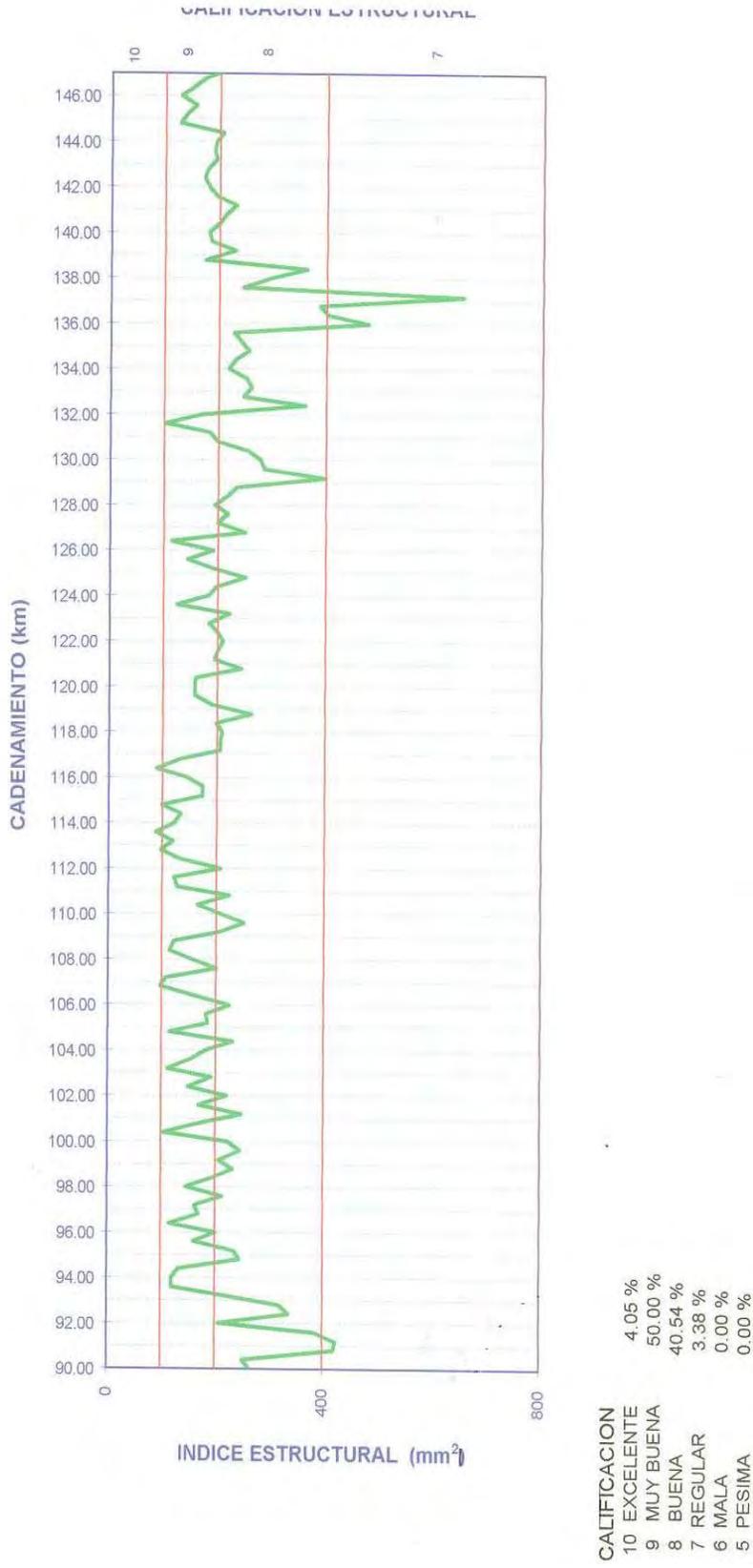


Figura A.14 Calificación estructural  
 (Referencia 3)

**AUTOPISTA: MÉXICO – QUERÉTARO, TRAMO: TEPOZOTLÁN – PALMILLAS, KM 90+000 – 148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN – PALMILLAS, KM 133+000 – 148+000**

**TABLA B.1.- RELACIÓN DE MUESTRAS ENSAYADAS CARRIL DE BAJA**

UBIC. SONDEO	CFO.	CAPA	ESP. cm.	ACUM. cm.	CONT. ASFAL. %	% COMPAC.	PVSS Kg/m <sup>3</sup>	PVSM Kg/m <sup>3</sup>	W OPT. %	W LUGAR %	LL. %	L.P. %	I.P. %	E.A. %	ABS. %	DEN. t/m <sup>3</sup>	VRS LUGAR %	VRS %	EXPAN. %	PORCENTAJES		CLASIF. S.U.C.S.	
																				GRAVA	ARENA		FINOS
133+500	A	CARPETA	10.0	10.0	5.9	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
133+500	A	BASE HCA.	30.0	40.0	---	88	1300	1999	11.4	15.5	39.7	25.3	14.4	21	3.77	2.47	102	113	0.20	75.0	19.0	6.0	GP-GC
133+500	A	SUB BASE ESTABILIZADA	5.0	45.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
133+500	A	SUBRASANTE	35.0	80.0	---	88	1130	1742	17.9	19.5	31.2	23.0	8.2	20	---	---	29	33	0.00	25.0	45.0	30.0	SC
133+500	A	SUBYACENTE	20.0	100.0	---	90	900	1385	30.5	29.1	41.9	25.9	16.0	20	---	---	21	27	0.10	0.0	73.0	27.0	SC
133+500	A	TERRAPLEN	20.0	120.0	---	89	880	1365	33.9	32.1	48.8	27.7	20.9	19	---	---	14	20	0.30	0.0	57.0	43.0	SC
134+000	A	CARPETA	10.0	10.0	5.9	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
134+000	A	BASE HCA	20.0	30.0	---	90	1400	2196	9.4	13.0	35.1	24.1	11.0	21	3.00	2.62	89	93	0.20	58.0	29.0	13.0	GC
134+000	A	BASE ESTABILIZADA	17.0	47.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
134+000	A	CARPETA	5.0	52.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
134+000	A	SUB-BASE	8.0	60.0	---	88	1300	2009	8.0	11.9	33.5	23.6	9.9	25	2.82	2.54	91	99	0.00	64.0	26.0	10.0	GP-GC
134+000	A	SUBRASANTE	20.0	80.0	---	87	964	1507	25.8	24.9	27.6	22.1	5.5	25	---	---	25	30	0.20	0.0	78.0	22.0	SC
134+000	A	SUBYACENTE	25.0	105.0	---	89	910	1520	24.1	25.1	29.0	22.4	6.6	20	---	---	32	29	0.20	0.0	71.0	29.0	SC
136+000	A	CARPETA	10.0	10.0	6.1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
136+000	A	BASE HCA.	25.0	35.0	---	93	1450	2231	7.8	12.5	33.4	23.6	9.8	17	3.86	2.37	87	99	0.00	55.0	29.0	16.0	GC
136+000	A	SUB BASE ESTABILIZADA	13.0	48.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
136+000	A	SUBRASANTE	20.0	68.0	---	90	1230	1895	12.8	12.0	37.3	24.7	12.6	25	---	---	21	26	0.90	46.0	40.0	14.0	GC
136+000	A	SUBYACENTE	15.0	83.0	---	90	960	1487	26.8	22.9	47.4	27.4	20.0	28	---	---	26	20	0.20	0.0	74.0	26.0	SC
136+000	A	TERRAPLEN	20.0	103.0	---	93	1002	1450	28.0	30.5	38.4	25.0	13.4	22	---	---	20	19	0.10	0.0	71.0	29.0	SC
138+000	A	CARPETA	12.0	12.0	6.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
138+000	A	BASE HCA.	15.0	27.0	---	90	1450	2231	7.8	7.8	38.5	25.0	13.5	17	3.86	3.37	95	99	0.00	55.0	29.0	16.0	GC
138+000	A	SUB BASE ESTABILIZADA	15.0	42.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
138+000	A	SUBRASANTE	20.0	62.0	---	89	1230	1895	12.8	12.8	35.1	24.1	11.0	24	---	---	21	26	0.90	46.0	40.0	14.0	GC

138+000	A	SUBYACENTE	20.0	82.0	---	90	960	1487	26.8	26.8	45.1	26.1	18.3	28	---	---	26	20	0.20	0.0	74.0	26.0	SC	
138+000	A	TERRAPLEN	20.0	102.0	---	90	1002	1450	28.0	28.0	38.1	24.9	13.2	22	---	---	20	19	0.10	0.0	71.0	29.0	SC	
139+950	A	CARPETA	15.0	15.0	6.1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
139+950	A	BASE HCA.	15.0	30.0	---	85	13.50	20.89	8.2	12.5	33.2	23.6	9.6	43	3.75	2.42	98	106	0.00	61.0	28.0	11.0	GP-GC	
139+950	A	SUB BASE ESTABILIZADA	15.0	45.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
139+950	A	SUBRASANTE	30.0	75.0	---	95	1150	1783	17.5	16.9	37.4	24.7	12.7	20	---	---	31	33	0.00	21.0	47.0	32.0	SC	
139+950	A	SUBYACENTE	25.0	100.0	---	91	1250	1939	10.6	9.5	41.3	25.8	15.5	21	---	---	43	50	0.40	25.0	45.0	30.0	SC	
139+950	A	TERRENO NATURAL	25.0	125.0	--	90	1190	1900	12.0	11.5	35.3	24.1	11.2	15	---	---	45	52	0.20	19.0	55.0	26.0	SC	
142+000	A	CARPETA	10.0	10.0	5.9	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
142+000	A	BASE HCA.	20.0	30.0	---	91	1360	2103	6.3	9.5	37.5	24.7	12.8	33	3.73	2.53	100	114	0.39	71.0	19.0	10.0	---	
142+000	A	SUB BASE ESTABILIZADA	20.0	50.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
142+000	A	SUBRASANTE	25.0	75.0	---	93	1240	1914	11.6	13.1	34.7	24.0	10.7	16	---	---	51	57	0.00	40.0	38.0	22.0	SC	
142+000	A	SUBYACENTE	20.0	95.0	---	90	1200	1900	13.0	12.1	36.7	24.5	12.2	15	---	---	46	50	0.00	37.0	46.0	17.0	SC	
144+000	A	CARPETA	15.0	15.0	6.1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
144+000	A	BASE HCA.	15.0	30.0	---	92	1345	2067	7.9	10.5	36.9	24.6	12.3	33	3.73	2.41	118	122	0.00	73.0	17.0	10.0	GP-GC	
144+000	A	SUB BASE ESTABILIZADA	20.0	50.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
144+000	A	SUBRASANTE	20.0	70.0	---	92	1150	1769	14.5	13.3	34.1	23.8	10.3	21	---	---	52	24	0.50	47.0	41.0	12.0	GC	
144+000	A	SUBYACENTE	20.0	95.0	---	91	1100	1750	16.0	15.1	35.2	24.1	11.1	18	---	---	48	50	0.00	60.0	30.0	10.0	GC	
144+000	A	TERRAPLEN	25.0	115.0	---	90	1080	1730	17.1	15.0	30.5	22.8	7.7	17	---	---	41	47	0.00	51.0	40.0	9.0	GC	
146+000	A	CARPETA	12.0	12.0	5.8	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
146+000	A	BASE HCA.	18.0	30.0	---	80	1270	1943	10.9	15.3	36.7	24.5	12.2	28	3.80	2.50	80	85	0.40	51.0	34.0	15.0	GC	
146+000	A	SUB BASE ESTABILIZADA	16.0	46.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
146+000	A	CARPETA	6.0	52.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
146+000	A	BASE HCA	10.0	62.0	---	93	1240	1980	9.0	9.1	30.3	22.8	7.5	24	3.4	2.1	65.0	70.3	0.20	50.0	34.0	16.0	GC	
146+000	A	SUBRASANTE	28.0	90.0	---	92	923	1510	25.6	24.1	31.2	23.0	8.2	18	---	---	30	33	0.00	42.0	43.0	15.0	SC	

**AUTOPISTA: MÉXICO – QUERÉTARO, TRAMO: TEPOZOTLÁN – PALMILLAS, KM 90+000 – 148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN – PALMILLAS, KM 133+000 – 148+000**

---

---

**TABLA B.2.- RELACIÓN DE MUESTRAS ENSAYADAS CARRIL CENTRAL**

UBIC. SONDEO	CPO.	CAPA	ESP. cm.	ACUM. cm.	CONT. ASFAL. %	COMPAC. %	PVSS Kg/m³	PYSM Kg/m³	W OPT. %	W LUGAR %	L.L. %	L.P. %	E.A. %	ABS. %	DEN. t/m³	VRS LUGAR %	VRS %	EXPAN. %	PORCENTAJES			CLASIF. S.U.C.S.	
																			GRAVA	ARENA	FINOS		
134+500	A	CARPETA	45.0	45.0	5.8	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
134+500	Universidad Nacional Autónoma de México																						
134+500	División de Estudios de Posgrado																						
134+500	Facultad de Ingeniería		15.0	75.0	---	95	1250	1900	7.9	6.9	35.1	24.1	24.0	3.85	2.43	54	54	0.00	36.0	50.0	14.0	SC	
134+500	A	SUBRASANTE	15.0	90.0	---	91	1120	1726	14.9	11.9	32.8	23.5	9.3	---	---	21	26	0.51	22.0	57.0	21.0	SC	
134+500	A	SUBYACENTE	15.0	105.0	---	92	1090	1750	15.2	13.4	29.6	22.6	7.0	---	---	22	24	0.20	30.0	54.0	16.0	SC	
134+500	A	TERRAPLEN	15.0	120.0	---	91	980	1558	23.1	21.5	48.6	27.7	20.9	---	---	9	11	0.70	0.0	47.0	53.0	CL	
135+000	A	CARPETA	5.0	5.0	5.2	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
135+000	A	BASE NEGRA	25.0	30.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
135+000	A	SUB-BASE	25.0	55.0	---	90	1300	2002	11.9	15.5	28.1	22.2	5.9	20.0	3.86	83	88	0.00	65.0	25.0	10.0	GP-GC	
135+000	A	SUBRASANTE	25.0	80.0	---	90	1040	1594	20.52	23.8	24.8	INA P	24.0	---	---	30	33	0.00	40.0	39.0	21.0	GM	
135+000	A	CARPETA	10.0	90.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
135+000	A	BASE HCA	25.0	115.0	---	93	1290	1990	7.5	7.3	35.7	24.2	11.5	26.0	---	95	99	0.00	75.0	19.0	6.0	GP-GC	
137+000	A	CARPETA	35.0	35.0	5.5	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
137+000	A	BASE HCA.	20.0	55.0	---	95	1300	1893	10.1	10.1	34.8	24.0	10.8	29.0	3.50	92	98	0.00	62.0	19.0	19.0	GC	
137+000	A	SUB-BASE	20.0	75.0	---	96	1290	1910	12.0	9.1	32.3	23.3	9.0	20.4	3.24	81	89	0.00	52.0	28.0	20.0	GC	
137+000	A	SUBRASANTE	20.0	95.0	---	90	1001	1490	27.8	26.5	39.1	25.2	13.9	18.0	---	30	40	0.00	38.0	43.0	19.0	SC	
137+000	A	SUBYACENTE	20.0	115.0	---	93	990	1505	27.1	24.3	30.5	22.8	7.7	13.0	---	29	32	0.00	30.0	50.0	20.0	SC	
137+000	A	TERRAPLEN	20.0	135.0	---	93	1093	1523	26.0	25.1	34.1	23.8	10.3	15.0	---	25	20	0.00	20.0	56.0	24.0	SC	
139+000	A	CARPETA	65.0	65.0	5.9	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
139+000	A	BASE HCA.	20.0	85.0	---	96	1270	1995	9.2	9.1	34.0	23.8	10.2	24.0	3.64	89	92	0.00	56.0	30.0	14.0	GC	
139+000	A	SUB-BASE	10.0	95.0	---	97	1260	1950	11.0	8.5	38.4	25.0	13.4	20.5	3.54	82	84	0.00	55.0	32.0	13.0	GC	
139+000	A	SUBRASANTE	20.0	115.0	---	90	980	1520	25.5	20.5	31.2	23.0	8.2	12.0	---	31	36	0.00	42.0	46.0	12.0	SC	
139+000	A	SUBYACENTE	20.0	135.0	---	91	960	1500	26.5	22.5	34.5	23.9	10.6	15.0	---	30	28	0.00	35.0	52.0	13.0	SC	
139+000	A	TERRAPLEN		155.0	---	92	1002	1510	25.0	23.0	30.2	22.8	7.4	10.0	---	35	31	0.00	39.0	43.0	18.0	SC	
139+500	A	CARPETA	45.0	45.0	5.5	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
139+500	A	BASE HCA.	10.0	55.0	---	95	1400	2167	4.9	5.0	47.2	27.3	19.9	35.0	3.13	95	99	0.50	57.0	35.0	8.0	GP-GC	
139+500	A	SUB-BASE	10.0	65.0	---	96	1320	2100	6.5	6.0	38.6	25.0	13.6	30.5	3.61	91	89	0.00	60.0	33.0	7.0	GP-GC	
139+500	A	SUBRASANTE	20.0	85.0	---	93	960	1483	28.2	27.9	37.6	24.8	12.8	20	---	15	19	0.70	17.0	63.0	20.0	SC	
139+500	A	SUBYACENTE	15.0	100.0	---	90	990	1450	30.0	28.0	35.2	24.1	11.1	19	---	16	23	0.00	24.0	50.0	26.0	SC	
139+500	A	TERRAPLEN	15.0	115.0	---	88	920	1407	29.9	30.0	44.6	26.6	18.0	23	---	12	20	0.80	0.0	78.0	22.0	SC	
141+000	A	CARPETA	45.0	45.0	4.9	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
141+000	A	BASE HCA.	15.0	60.0	---	96	1327	2042	7.9	7.5	36.9	24.6	12.4	33	2.97	89	93	0.00	54.0	34.0	12.0	GC	
141+000	A	SUB-BASE	20.0	80.0	---	94	1315	2050	8.3	7.2	31.2	23.0	8.2	25	2.65	95	91	0.00	57.0	30.0	13.0	GC	
141+000	A	SUBRASANTE	25.0	105.0	---	92	840	1288	41.0	36.5	57.1	30.0	27.1	14	---	17	20	0.90	19.0	48.0	33.0	SC	
141+000	A	SUBYACENTE	20.0	125.0	---	90	890	1280	42.0	37.0	48.6	27.7	20.9	10	---	28	26	0.00	20.0	55.0	25.0	SC	
141+000	A	TERRAPLEN	20.0	145.0	---	90	910	1275	43.0	36.0	40.5	25.5	15.0	13	---	26	29	0.40	32.0	38.0	30.0	SC	
143+000	A	CARPETA	45.0	45.0	5.7	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
143+000	A	BASE HCA.	25.0	70.0	---	95	1300	2029	8.8	7.9	37.5	24.7	12.8	21	3.98	110	107	0.00	65.0	25.0	10.0	GP-GC	
143+000	A	SUB-BASE	20.0	90.0	---	94	1230	1950	10.0	9.8	37.4	24.7	12.7	15	3.68	100	110	0.00	73.0	17.0	10.0	GP-GC	
143+000	A	SUBRASANTE	20.0	110.0	---	92	940	1472	24.5	23.8	37.6	24.8	12.8	13	---	51	20	0.36	18.0	51.0	31.0	SC	
143+000	A	SUBYACENTE	20.0	130.0	---	90	945	1500	26.0	25.1	38.3	24.9	13.4	10	---	43	19	0.40	20.0	48.0	32.0	SC	

Anexo B  
Variables de diseño

174

**AUTOPISTA: MÉXICO – QUERÉTARO, TRAMO: TEPOZOTLÁN – PALMILLAS, KM 90+000 – 148+000  
SUBTRAMO: POLOTITLÁN – PALMILLAS, KM 133+000 – 148+000**

**TABLA B.3 RELACIÓN DE MUESTRAS ENSAYADAS CARRIL DE BAJA**

UBIC. SONDEO	CPO.	CAPA	ESP. cm.	ACUM. cm.	CONT. ASEAL. %	% COMPAC.	PVSS Kg/m <sup>3</sup>	PVSM Kg/m <sup>3</sup>	W OPT. %	W LUGAR %	L.L. %	L.P. %	L.P. %	I.P. %	E.A. %	ABS. %	DEN. t/m <sup>3</sup>	VRS LUGAR %	VRS %	EXPAN. %	PORCENTAJES		CLASIF. S.U.C.S.	
																					GRAVA	ARENA		FINOS
134+500	B	CARPETA	12.0	12.0	6.2	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
134+500	B	BASE HCA.	18.0	30.0	---	92	1297	2059	9.5	9.0	24.8	21.3	3.5	32	2.73	2.11	55	84	0.00	55.0	30.0	15.0	GC	
134+500	B	SUB BASE ESTABILIZADA	15.0	45.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
134+500	B	SUBRASANTE	20.0	65.0	---	91	2060	2060	8.9	22.9	23.3	20.9	2.4	29	---	---	---	40	56	0.50	63.0	26.0	11.0	GC
134+500	B	SUBYACENTE	20.0	85.0	---	90	1569	1569	22.9	21.1	24.1	INA P	28	28	---	---	---	30	33	0.00	0.0	90.0	10.0	SC
134+500	B	TERRENO NATURAL	20.0	105.0	---	90	1325	1325	34.3	30.0	42.7	26.1	16.6	8	---	---	---	19	6	0.00	0.0	55.0	45.0	SC
136+500	B	CARPETA	10.0	10.0	5.8	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
136+500	B	BASE HCA.	16.0	26.0	---	91	1300	2018	8.5	12.0	32.4	23.3	9.1	37	3.80	2.50	105	114	0.00	63.0	24.0	13.0	GC	
136+500	B	SUB BASE ESTABILIZADA	20.0	46.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
136+500	B	SUBRASANTE	20.0	66.0	---	92	1100	1720	16.2	15.0	37.3	24.7	12.6	15	---	---	---	28	33	0.80	25.0	53.0	22.0	SC
136+500	B	SUBYACENTE	25.0	91.0	---	92	1090	1700	15.0	14.9	36.0	24.3	11.7	14	---	---	---	25	28	0.50	20.0	55.0	25.0	SC
136+500	B	TERRAPLEN	25.0	116	---	91	1050	1710	15.9	16.0	35.6	24.2	11.4	17	---	---	---	21	27	0.70	23.0	53.0	24.0	SC
138+500	B	CARPETA	12.0	12.0	6.7	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
138+500	B	BASE HCA.	13.0	25.0	---	90	1200	1859	8.6	12.5	25.2	21.4	3.8	22	3.90	2.40	97	106	0.00	64.0	30.0	6.0	GP-GC	
138+500	B	SUB BASE ESTABILIZADA	20.0	45.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
138+500	B	SUBRASANTE	15.0	60.0	---	96	1320	2035	8.1	7.9	33.8	23.7	10.1	40	---	---	---	42	46	0.40	44.0	47.0	9.0	SC
138+500	B	SUBYACENTE	22.0	82.0	---	90	1300	2088	6.6	6.3	41.9	25.9	18.0	43	---	---	---	69	72	0.00	56.0	36.0	8.0	GC
138+500	B	TERRAPLEN	25.0	107.0	---	90	890	1380	31.1	29.5	48.6	27.7	20.9	29	---	---	---	10	14	0.90	0.0	61.0	39.0	SC
140+500	B	CARPETA	14.0	14.0	5.1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
140+500	B	BASE HCA.	16.0	30.0	---	96	1275	1962	9.1	9.0	31.3	23.1	8.2	34	3.71	2.45	95	99	0.00	60.0	29.0	11.0	GC	
140+500	B	SUB BASE ESTABILIZADA	12.0	42.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
140+500	B	SUBRASANTE	8.0	50.0	---	90	1000	1594	20.2	19.0	38.4	25.0	13.4	20	---	---	---	41	46	0.60	26.0	56.0	18.0	SC
140+500	B	SUBYACENTE	20.0	70.0	---	90	990	1610	18.0	18.2	37.1	24.6	12.5	37	---	---	---	35	39	0.40	33.0	41.0	26.0	SC

140+500	B	TERRAPLEN	20.0	90.0	---	91	940	1650	20.5	18.9	35.1	24.1	11.0	35	---	---	32	36	0.70	21.0	49.0	30.0	SC	
142+500	B	CARPETA	13.0	13.0	5.9	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
142+500	B	BASE HCA.	20.0	33.0	---	98	1275	1910	8.4	10.0	31.3	23.1	8.2	35	3.50	2.30	90	96	0.00	60.0	29.0	11.0	GP-GC	
142+500	B	SUB-BASE ESTABILIZADA	10.0	43.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
142+500	B	SUBRASANTE	7.0	50.0	---	92	950	1457	28.8	28.1	42.9	26.2	18.7	10	---	---	12	16	0.80	0.0	54.0	46.0	SC	
142+500	B	SUBYACENTE	28.0	78.0	---	90	920	1470	27.0	26.9	44.5	26.6	17.9	9	---	---	11	13	0.80	0.0	55.0	45.0	SC	
142+500	B	TERRAPLEN	30.0	108.0	---	90	930	1480	26.1	25.7	40.1	25.4	14.7	10	---	---	9	12	0.70	0.0	56.0	44.0	SC	
144+500	B	CARPETA	12.0	12.0	5.9	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
144+500	B	BASE HCA.	18.0	30.0	---	91	1315	2022	7.9	10.6	40.5	25.5	15.0	35	4.42	2.37	100	111	0.68	64.0	29.0	7.0	GP-GC	
144+500	B	SUB-BASE ESTABILIZADA	18.0	48.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
144+500	B	SUBRASANTE	20.0	68.0	---	90	1050	1616	20.5	19.5	34.5	23.9	10.6	30	---	---	42	47	0.53	30.0	48.0	22.0	SC	
144+500	B	SUBYACENTE	25.0	93.0	---	91	940	1507	25.9	23.1	37.1	24.6	12.5	10	---	---	10	13	0.50	0.0	60.0	40.0	SC	
146+500	B	CARPETA	10.0	10.0	5.9	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
146+500	B	BASE HCA	30.0	40.0	---	90	1400	2201	5.7	8.5	31.4	23.1	8.3	23	3.79	2.24	95	99	0.00	64.0	26.0	10.0	GP-GC	
146+500	B	SUB-BASE ESTABILIZADA	40.0	80.0	---	91	1270	1962	8.5	9.3	35.2	24.1	11.1	23	3.98	2.39	83	86	0.00	55.0	32.0	13.0	SC	
146+500	B	SUB-RASANTE ESTABILIZADA	4.0	84.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
146+500	B	SUBYACENTE	25.0	109.0	---	91	950	1491	26.2	25.9	40.2	25.5	14.7	23	---	---	25	28	0.20	32.0	52.0	16.0	SC	
146+500	B	TERRENO NATURAL	20.0	129.0	---	90	980	1520	24.5	23.9	34.2	23.8	10.4	18	---	---	28	21	0.00	27.0	53.0	20.0	SC	

**AUTOPISTA: MÉXICO – QUERÉTARO, TRAMO: TEPOZOTLÁN – PALMILLAS, KM 90+000 – 148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN – PALMILLAS, KM 133+000 – 148+000**

**TABLA B.4 RELACIÓN DE MUESTRAS ENSAYADAS CARRIL CENTRAL**

UBIC. SONDEO	CPO.	CAPA	ESP. cm.	ACUM. cm.	CONT. ASFAL. %	% COMPAC.	PVSS Kg/m <sup>3</sup>	PVSM Kg/m <sup>3</sup>	W OPT. %	W LUGAR %	L.L. %	L.P. %	L.P. %	E.-A. %	ABS. %	DEN. t/m <sup>3</sup>	VRS LUGAR %	VRS %	EXPAN. %	PORCENTAJES		CLASIF. S.U.C.S.		
																				GRAVA	ARENA		FINOS	
133+500	B	CARPETA	35.0	35.0	6.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
133+500	B	BASE HCA.	20.0	55.0	---	95	1240	2066	10.2	8.7	30.0	22.7	7.3	23	4.87	2.31	118	121	0.00	63.0	26.0	11.0	GP-GC	
133+500	B	SUB BASE	10.0	65.0	---	94	1200	1957	10.8	9.1	31.4	23.1	8.3	23	4.20	2.26	120	130	0.00	75.0	17.0	8.0	GP-GC	
133+500	B	SUBRASANTE	30.0	95.0	---	92	850	1370	33.0	30.0	42.8	26.2	16.6	22	---	---	19	22	0.50	0.0	54.0	46.0	SC	
133+500	B	SUBYACENTE	30.0	125.0	---	91	910	1360	34.0	31.3	35.8	24.3	11.5	19	---	---	26	27	0.00	0.0	61.0	39.0	SC	
133+500	B	TERRAPLEN	30.0	155.0	---	90	890	1350	34.5	32.0	36.2	24.4	11.8	10	---	---	15	18	0.10	17.0	49.0	34.0	SC	
135.500	B	CARPETA	35.0	35.0	6.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
135.500	B	BASE HCA.	20.0	55.0	---	95	1260	2033	9.1	8.7	32.2	23.3	8.9	22	3.09	2.43	80	85	0.00	66.0	23.0	11.0	GP-GC	
135.500	B	SUB-BASE	15.0	70.0	---	94	1240	2047	10.7	9.1	31.4	23.1	8.3	28	3.19	2.43	83	89	0.00	60.0	27.0	13.0	GC	
135.500	B	SUBRASANTE	20.0	90.0	---	92	800	1297	37.9	30.0	48.1	27.6	20.5	21	---	---	23	26	0.30	0.0	74.0	26.0	SC	
135.500	B	SUBYACENTE	20.0	110.0	---	91	970	1260	38.5	31.3	39.7	25.3	14.4	25	---	---	24	30	0.00	0.0	70.0	30.0	SC	
135.500	B	TERRAPLEN	20.0	130.0	---	90	876	1280	38.0	32.0	42.8	26.2	16.6	29	---	---	20	29	0.00	0.0	72.0	28.0	SC	
137+500	B	CARPETA	35.0	35.0	6.4	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
137+500	B	BASE HCA.	20.0	55.0	---	94	1290	2162	9.8	8.2	30.5	22.8	7.7	27	2.46	2.57	72	76	0.20	59.0	27.0	14.0	GP-GC	
137+500	B	SUB BASE	20.0	75.0	---	91.0	870	1415	30.1	25.1	34.2	23.8	10.4	23	3.09	2.50	31	36	0.40	21.0	53.0	26.0	SC	
137+500	B	SUBRASANTE	20.0	95.0	---	92.0	1010	1630	21.1	20.0	39.7	25.3	14.4	9	---	---	10	11	0.90	16.0	45.0	39.0	SC	
137+500	B	SUBYACENTE	20.0	115	---	92	998	1600	21.0	19.5	41.2	25.7	15.5	11	---	---	13	14	0.00	21.0	47.0	32.0	SC	
137+500	B	TERRAPLEN	20.0	135.0	---	90	987	1580	22.0	18.0	38.6	25.0	13.6	8	---	---	11	20	0.00	20.0	52.0	28.0	SC	
139+800	B	CARPETA	50.0	50.0	6.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
139+800	B	BASE HCA.	25.0	75.0	---	94	1280	2078	9.7	8.2	37.5	24.7	12.8	3	3.19	2.46	97	109	0.00	60.0	29.0	11.0	GP-GC	
139+800	B	SUB BASE	25.0	100.0	---	91	1060	1707	20.2	25.1	40.6	25.6	15.0	22	4.10	2.45	42	50	0.00	49.0	40.0	11.0	GP-GC	
139+800	B	SUBRASANTE	25.0	125.0	---	92	1078	1650	19.0	20.0	39.7	25.3	14.4	9	---	---	37	40	0.00	16.0	64.0	20.0	SC	
139+800	B	SUBYACENTE	15.0	140.0	---	92	1054	1680	18.1	19.5	40.7	25.6	15.1	9	---	---	39	48	0.00	21.0	63.0	16.0	SC	

139+500	B	TERRAPLEN	15.0	155.0	---	90	990	1690	17.1	18.0	36.8	24.5	12.3	10	---	---	37	35	0.00	20.0	56.0	24.0	SC	
141+500	B	CARPETA	50.0	50.0	5.9	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
141+500	B	BASE HCA.	15.0	65.0	---	95	1270	2047	6.2	5.9	29.7	22.6	7.1	30	3.73	241	110	115	0.00	64	31.0	5.0	GP-GC	
141+500	B	SUB BASE	20.0	85.0	---	93	1200	1916	7.7	6.0	32.6	23.4	9.2	25	4.16	2.40	46	50	0.00	45	52.0	3.0	GP-GC	
141+500	B	SUBRASANTE	10.0	95.0	---	91	991	160	17.3	16.5	35.6	24.2	11.4	18	---	---	41	44	0.30	38.0	52.0	10.0	SC	
141+500	B	SUBYACENTE	20.0	115.0	---	90	859	1446	26.1	21.3	32.1	25.3	8.8	17	---	---	24	26	0.00	0.0	88.0	12.0	SC	
141+500	B	TERRAPLEN	20.0	135.0	---	90	1021	1500	25.0	23.1	40.8	25.6	15.2	21	---	---	25	29	0.00	0.0	81.0	19.0	SC	
143+500	B	CARPETA	40.0	40.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
143+500	B	BASE HCA.	25.0	65.0	---	93	1360	2001	7.5	6.9	29.6	22.6	7.0	19	3.29	2.46	90	93	0.00	54.0	35.0	11.0	GP-GC	
143+500	B	SUB BASE	15.0	80.0	---	92	1307	2000	9.1	7.1	30.1	22.7	7.4	20	4.11	2.37	89	109	0.00	45.0	52.0	3.0	GP-C	
143+500	B	SUBRASANTE	20.0	100.0	---	93	840	1290	37.1	30.5	43.2	26.3	16.9	17	---	---	14	13	1.20	0.0	62.0	38.0	SC	
143+500	B	SUBYACENTE	20.0	120.0	---	94	890	1320	34.0	32.0	39.5	25.3	14.2	24	---	---	16	16	1.40	0.0	66.0	34.0	SC	
143+500	B	TERRAPLEN	20.0	140.0	---	93	910	1340	33.1	31.0	45.8	27.0	18.8	19	---	---	14	12	1.90	0.0	72.0	28.0	SC	
145+500	B	CARPETA	6.0	6.0	5.7	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
145+500	B	BASE ESTABILIZADA	24.0	30.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
145+500	B	CARPETA	31.0	61.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
145+500	B	BASE HCA	15.0	76.0	---	95	1140	1747	15.7	14.9	35.3	24.1	11.2	26	3.11	2.45	70	73	0.80	48.0	27.0	25.0	GC	
145+500	B	SUBRASANTE	20.0	96.0	---	92	990	1518	25.3	24.5	37.3	24.7	12.6	21	---	---	29	33	0.82	16.0	48.0	36.0	SC	
145+500	B	SUBYACENTE	20.0	116	---	93	1002	1500	25.0	24.0	31.5	23.1	8.4	26	---	---	24	28	0.40	11.0	55.0	34.0	SC	
145+500	B	TERRAPLEN	20.0	136.0	---	90	980	1490	26.0	25.0	34.2	25.8	10.4	27	---	---	32	35	0.70	27.0	48.0	25.0	SC	

**AUTOPISTA: MÉXICO – QUERÉTARO, TRAMO: TEPOZOTLÁN – PALMILLAS, KM 90+000 – 148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN – PALMILLAS, KM 133+000 – 148+000**

**TABLA B.5 RELACIÓN DE MUESTRAS ENSAYADAS**

UBIC. SONDEO	CPO.	CAPA	ESP. cm.	% COMPAC.	PVSS Kg/m <sup>3</sup>	PVSM Kg/m <sup>3</sup>	W OPT. %	W LUGAR %	L.L. %	L.P. %	L.P. %	E.A. %	VRS %	EXP AN. %	PORCENTAJES		CLASIF. SUCS.	
															GRAVA	ARENA		FINOS
133+000	B	TERRENO NATURAL	50	87	1030	1507	23.0	20.0	52.9	28.9	24.0	8	34	0.80	0.0	69.0	31.0	SC
133+160	B	TERRENO NATURAL	25	85	923	1432	31.2	34.0	48.8	27.8	21.0	3	8	3.30	0.0	42.0	58.0	CL
133+500	B	TERRENO NATURAL	40	96	1030	1592	22.2	20.0	52.9	28.9	24.0	9	34	0.00	0.0	71.0	29.0	SC
134+000	B	TERRENO NATURAL	20	97	706	1203	41.6	35.5	51.2	28.4	22.8	6	6	1.40	0.0	67.0	33.0	SC
134+500	B	TERRENO NATURAL	90	98	994	1508	26.0	25.0	43.2	26.3	16.9	8	9	0.90	0.0	26.0	74.0	CL
135+000	B	TERRENO NATURAL	100	92	959	1480	26.1	23.4	40.2	25.5	14.7	9	7	1.50	0.0	61.0	39.0	SC
135+300	B	TERRENO NATURAL	70	87	789	1254	39.0	35.5	49.7	28.0	21.7	22	12	0.00	0.0	90.0	10.0	SC
135+500	B	TERRENO NATURAL	70	88	700	1171	43.6	40.5	63.8	31.8	32.0		5	2.20	0.0	26.0	74.0	CH
136+500	B	TERRENO NATURAL	70	97	858	1308	38.0	37.1	51.5	28.5	23.0	24	13	2.10	0.0	58.0	42.0	SC
138+500	B	TERRENO NATURAL	70	96	850	1310	36.9	35.0	59.1	30.6	28.5	30	13	0.40	0.0	93.5	6.5	SC
140+500	B	TERRENO NATURAL	80	85	887	1437	30.1	29.5	42.9	26.2	16.7	11	10	1.52	0.0	27.0	73.0	CL

**AUTOPISTA: MÉXICO – QUERÉTARO, TRAMO: TEPOZOTLÁN – PALMILLAS, KM 90+000 – 148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN – PALMILLAS, KM 133+000 – 148+000**

**TABLA B.6 RELACIÓN DE MUESTRAS ENSAYADAS**

UBIC. SONDEO	CPO.	CAPA	ESP. cm.	% COMPAC.	PVSS Kg/m <sup>3</sup>	PVSM Kg/m <sup>3</sup>	W OPT. %	W LUGAR %	L.L. %	L.P. %	I.P. %	E.A. %	VRS %	EXPAN. %	PORCENTAJES			CLASIF. S.U.C.S.
															GRAVA	ARENA	FINOS	
133+000	A	TERRENO NATURAL	50	88.0	923	1412	31.1	30.0	49.6	28.0	21.6	11.5	11.2	0.32	0.0	48.0	52.0	CL
133+160	A	TERRENO NATURAL	300	90.0	923	1468	27.9	28.1	49.8	28.0	21.8	16.0	10.0	0.80	0.0	51.0	49.0	SC
133+500	A	TERRENO NATURAL	70	95.0	770	1294	35.8	30.0	39.2	25.2	14.0	15.9	30.4	0.21	0.0	40.7	59.3	CL
134+000	A	TERRENO NATURAL	90	90.0	923	1430	29.9	27.0	44.5	26.6	17.9	8.2	11.0	0.55	0.0	47.7	52.3	ML
134+500	A	TERRENO NATURAL	90	90.7	959	1507	26.1	25.0	44.7	26.7	18.0	9.0	4.6	3.20	0.0	40.0	60.0	CL
135+500	A	TERRENO NATURAL	80	88.0	855	1396	29.0	26.0	46.4	27.1	19.3	11.4	8.6	1.63	0.0	71.0	29.0	SC
135+500	A	TERRENO NATURAL	50	90.0	910	1372	33.4	31.3	42.2	26.0	16.2	18.0	6.0	1.19	0.0	45.0	55.0	CL
137+000	A	TERRENO NATURAL	80	87.0	923	1485	27.2	26.9	49.6	28.0	21.6	23.0	20.0	0.53	0.0	49.0	51.0	CL
139+030	A	TERRENO NATURAL	40	84.0	957	1527	24.9	26.5	45.3	26.8	18.5	30.0	11.0	0.67	0.0	52.0	48.0	SC
143+000	A	TERRENO NATURAL	60	99.2	923	1507	26.1	25.2	47.7	37.5	20.2	24.0	14.0	0.85	0.0	58.0	42.0	SC
147+000	A	TERRENO NATURAL	50	88.0	780	1410	31.1	30.0	46.3	27.1	19.2	9.0	6.0	1.80	0.0	8.0	92.0	CL

**AUTOPISTA: MÉXICO –QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

**TABLA B.7 RECOMENDACIONES DEL DRENAJE MENOR.**

KM.	Descripción de la Obra	Observaciones	Gasto Hidrológico (m <sup>3</sup> /s)	Gasto Hidráulico (m <sup>3</sup> /s)	Recomendaciones
133+420	Tubo de concreto de 0.90 m de diámetro	La caja de captación entre ambos cuerpos, está parcialmente azolvada.	0.22	0.45	Construir lavadero en la obra para descarga en canal de concreto lateral al PSV Polotitlán, la caída será de 5 m. Limpieza periódica y desazolve.
133+450	Tubo de lámina de 0.75 m de diámetro	La caja de captación entre ambos cuerpos, está azolvada un 50 %.	---	1.02	Realizar excavación para canal de desague del cuerpo A y B. Limpieza periódica.
133+600	Tubo de concreto de 0.90 m de diámetro	La obra se prolongó en entrada B para paso del camino lateral con tubo de 0.60 cm. de diámetro en derecho de vía	0.22	0.30	Limpieza periódica
133+850	Tubo de concreto de 0.75 m de diámetro	Drena canal de riego excavado en tierra con sección irregular de 0.4 x 0.5m.	-	0.86	Realizar excavación para canal de desague del cuerpo A y B. Limpieza periódica
134+020	Tubo de concreto de 0.75 m de diámetro	Los accesos a propiedades han propiciado azolve en la salida A	-	0.50	Limpieza periódica, prolongar el muro de cabezal para contener deslaves a los accesos a propiedades
134+300	Tubo de concreto de 0.75 m de diámetro	La salida en el cuerpo A esta azolvada en un 30%.	-	0.86	Realizar excavación para canal de desague del cuerpo A. Limpieza periódica y desazolve.
134+490	Losa de concreto de 3.0x2.1 m	En el interior de la obra, junto al estribo, se construyó otro canal de 0.40x0.4 m que conduce a aguas contaminantes.	-	1.86	Limpieza periódica
134+900	Tubo de concreto de 0.90 m de diámetro	Drena cuneta del cuerpo B y zona entre terraplenes. Su descarga hacia la zona de corte efectuada para el cruce de la vía férrea México- Querétaro. La caja de captación entre terraplenes está parcialmente azolvada.	0.22	0.45	Se requiere limpieza de la caja de captación y canalizar el agua en forma lateral hacia zona de corte.
135+250	Losa de concreto de 1.2x0.9 m	Drena canal de riego controlado por compuerta en derivación de canales la entrada B. En la salida de la obra no hay cauce y existe estancamiento de agua	-	1.32	Gestionar ante las autoridades correspondientes el correcto control de compuertas, para evitar almacenamiento de agua en la alcantarilla

135+590	Tubo de concreto de 0.75 m de diámetro	Drena zona entre ambos cuerpos y cuenta con tubo de 0.3m de diámetro para la captación del escurrimiento. No existe caja de captación.	0.22	0.27	Construir caja de captación entre ambos cuerpos 1.5x1.5x1.0 m. Realizar excavación para canal de desague del cuerpo A.
135+800	Tubo de lámina de 0.90m de diámetro	Del lado izquierdo existen construcciones a la entrada de la obra.	0.22	0.39	Realizar excavación para canal de desague del cuerpo A. Limpieza periódica
136+010	Losa de concreto de 1.1x0.9 m	Cuenta con un canal rectangular que liga las obras de ambos cuerpos y funciona como caja de captación.	0.22	1.07	Realizar excavación para canal de desague de entrada. Limpieza periódica
136+150	Tubo de lámina de 0.75 m de diámetro	La obra del cuerpo B fue obstruida por la construcción de un camino de acceso a propiedades.	0.22	0.24	Limpieza periódica y reubicar el acceso construido
136+600	Tubo de concreto de 0.90 m de diámetro	Se producen encharcamientos en la entrada del cuerpo B.	-	1.57	Limpieza periódica y canalizar el agua.
136+800	Tubo de concreto de 0.90 m de diámetro	Drena a canal de riego	--	1.57	Limpieza periódica.
136+950	Tubo de concreto de 0.90 m de diámetro	Tubo de lámina en el cuerpo B. Obra azolvada en un 10 %.	--	0.98	Se requiere bajar la rasante del camino de tierra, ubicado paralelo al camino del cuerpo A, ya que obstruye la salida de la obra. Limpieza periódica y desazolve.
137+050	Tubo de concreto de 0.80 m de diámetro	Tubo de lámina cuerpo A.	--	0.98	Limpieza periódica.
137+700	Tubo de concreto de 0.90 m de diámetro	Tubo de lámina en cuerpo A. La salida en el cuerpo B se encuentra totalmente obstruida debido a la construcción de un acceso de una vulcanizadora.	--	0.98	Limpieza periódica y canalizar el agua.
138+500	Losa de concreto 1.00x0.90 m.	No hay cauce definido.	--	1.40	-
138+700	Losa de concreto 1.80x1.90 m.	No hay cauce definido. Obra parcialmente azolvada.	--	8.2	Limpieza periódica y desazolve.
138+800	Tubo de lámina de 0.80 m de diámetro	Tubo de concreto cuerpo B. Obra azolvada en un 30 % en las salidas de los cuerpos A y B.	--	0.75	Limpieza periódica y desazolve.
139+050	Losa de concreto 2.70x3.50 m.	Su cauce desemboca en la represa Los Lirios aprox. 250m aguas abajo del cruce.	1.5	0.93	--
139+500	Losa de concreto 1.60x0.90 m.	Dren controlado por la represa San Elías y es canalizada al cruce de canal de tierra.	--	0.75	Limpieza periódica
139+900	Tubo de concreto de 0.90 m de diámetro	Tubo de lámina cuerpo A.	--	0.98	Limpieza periódica
140+060	Losa de concreto 2.60x2.50 m.	La obra presenta un cauce indefinido.	--	19.30	Limpieza periódica y desazolve
140+400	Tubo de concreto de 0.80 m de diámetro	Tubo de lámina cuerpo B. Obra azolvada en un 30 % en la salida del cuerpo B.	--	0.98	Limpieza periódica y desazolve. Requiere reparación en el cabezal.

140+500	Tubo de concreto de 0.80m de diámetro	Tubo de lámina cuerpo B. Obra azolvada en un 30 % en la salida del cuerpo A y B. La obra presenta en la entrada cuerpo A, cabezal semidestruído.	--	0.98	Limpieza periódica y desazolve. Requiere reparación en el cabezal
140+707	Tubo de concreto de 0.80 m de diámetro	Obra parcialmente azolvada.	--	0.98	Limpieza periódica y desazolve
140+950	Tubo de lámina de 0.80 m de diámetro	Obra parcialmente azolvada.	--	0.80	Limpieza periódica y desazolve
141+100	Tubo de concreto de 0.90 m de diámetro	Obra parcialmente azolvada.	--	0.98	Limpieza periódica y desazolve
141+400	Tubo de concreto de 0.90 m de diámetro	Obra parcialmente azolvada.	--	0.75	Limpieza periódica y desazolve
141+750	Tubo de lámina de 0.80 m de diámetro	Obra parcialmente azolvada	--	0.75	Limpieza periódica y desazolve en el cuerpo B
141+800	Losa de concreto 1.20x1.0 m	Drena un canal de riego de sección trapezoidal. 20 m aguas arriba del cruce existe una compuerta para su liberación.	--	2.88	Se requiere ampliar la obra de una losa de concreto de 1.0x1.0 m.
141+900	Tubo de concreto de 0.90 m de diámetro	La descarga es deficiente, ya que el tubo se reduce su diámetro a 0.30 m.	--	0.98	Limpieza periódica y desazolve. Canalizar en su descarga con el mismo diámetro de la alcantarilla existente.
142+050	Tubo de concreto de 0.80 m de diámetro	Obra azolvada en un 50 %.	--	0.98	Limpieza periódica y desazolve
	Tubo de concreto de 0.90 m de diámetro	Obra parcialmente azolvada	--	0.98	Limpieza periódica y desazolve
144+500	Tubo de concreto de 0.90 m de diámetro	Losa de concreto de 1.0x1.0 m en el cuerpo A. Drena canal controlado por la represa San Gilberto, la obra esta totalmente azolvada.	--	0.98	Limpieza periódica y desazolve. Se recomienda canalizar hasta la siguiente obra por el cuerpo B.
145+200	Bóveda de 3.0x3.5 m, más el arco	En la salida de la obra y paralelo al cuerpo A, existe un camino que obstruye el flujo de agua.	--	51.04	Se requiere bajar la rasante del camino que obstruye la salida de agua de la obra del cuerpo A del orden de un 1.0 m.
145+600	Tubo de concreto de 0.90 m de diámetro	Obra azolvada en un 40 % en la entrada y salida.	0.02	0.02	Limpieza periódica y desazolve.
146+050	Tubo de lámina de 0.90 m de diámetro	Obra parcialmente azolvada	--	0.75	Limpieza periódica y desazolve.
146+100	Tubo de lámina de 0.80 m de diámetro	La obra en el cuerpo B se encuentra totalmente obstruida con la construcción de un estacionamiento, solo drena la franja separadora hacia el cuerpo B.	--	0.75	Limpieza periódica y desazolve.



**AUTOPISTA: MÉXICO - QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN - PALMILLAS, KM 133+000 - 148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTILÁN - PALMILLAS, KM 133+000 - 148+000**

BANCOS DE MATERIALES		OBRA. AUTOPISTA MEXICO-QUERETARO	
ESTRATO		CLASIFICACION	
No ESP.		PRESUPUESTO	
(M)	PERFIL	CLASIFICACION	A B C
1 0.45	CAPA VEGETAL	COEFICIENTES DE VARIACION VOLUMETRICA	
2 INDEF	ARENA ARCILLOSA	90%	95%
3		0.92	0.90
			0.87
DATOS GENERALES DEL BANCO:			
DENOMINACION:	BANCO SIN NOMBRE		
UBICACION:	KM. 135+100 A 40 MTS. DE LA AUTOPISTA MEXICO - QUERETARO		
CAPACIDAD:	500000 M3		
EMPLEO:	SUBRASANTE Y TERRAPLEN		
TRATAMIENTO:	CRIBADO		
CLASIFICACION SUCS:	ARENA ARCILLOSA		
OBSERVACIONES:	ACTUALMENTE PRESENTA ABIERTO DE EXPLORACION		
CARACTERISTICAS:			
L.L (%)		34.2	
IP (%)		10.4	
CL (%)		3.8	
EA (%)		20	
PVSS (kg/cm3)		1098	
PVSM (kg/cm3)		1245	
W. OPT. (%)		14.3	
VRS (%)		26	
EXP (%)		0	

Figura B.2 Croquis e informe de laboratorio (Referencia 3)

**AUTOPISTA: MÉXICO - QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN - PALMILLAS, KM 133+000 - 148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN - PALMILLAS, KM 133+000 - 148+000**

BANCOS DE MATERIALES		OBRA. AUTOPISTA MEXICO-QUERETARO																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th>ESTRATO</th> <th>CLASIFICACION</th> <th>CLASIFICACION</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>PRESUPUESTO</td> <td></td> </tr> <tr> <td>No ESP.</td> <td>80 20 0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>(M)</td> <td>PERFIL</td> <td>CLASIFICACION A B C</td> </tr> </tbody> </table>		ESTRATO	CLASIFICACION	CLASIFICACION		PRESUPUESTO		No ESP.	80 20 0		(M)	PERFIL	CLASIFICACION A B C	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">CARACTERISTICAS:</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>L.L (%)</td> <td>34.2</td> </tr> <tr> <td>IP (%)</td> <td>10.4</td> </tr> <tr> <td>CL (%)</td> <td>2.6</td> </tr> <tr> <td>EA (%)</td> <td>24</td> </tr> <tr> <td>PVSS (kg/cm3)</td> <td>1023</td> </tr> <tr> <td>PVSM (kg/cm3)</td> <td>1125</td> </tr> <tr> <td>W.OPT. (%)</td> <td>10.6</td> </tr> <tr> <td>VRS (%)</td> <td>34</td> </tr> <tr> <td>EXP (%)</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>		CARACTERISTICAS:		L.L (%)	34.2	IP (%)	10.4	CL (%)	2.6	EA (%)	24	PVSS (kg/cm3)	1023	PVSM (kg/cm3)	1125	W.OPT. (%)	10.6	VRS (%)	34	EXP (%)	0
ESTRATO	CLASIFICACION	CLASIFICACION																																	
	PRESUPUESTO																																		
No ESP.	80 20 0																																		
(M)	PERFIL	CLASIFICACION A B C																																	
CARACTERISTICAS:																																			
L.L (%)	34.2																																		
IP (%)	10.4																																		
CL (%)	2.6																																		
EA (%)	24																																		
PVSS (kg/cm3)	1023																																		
PVSM (kg/cm3)	1125																																		
W.OPT. (%)	10.6																																		
VRS (%)	34																																		
EXP (%)	0																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">COEFICIENTES DE VARIACION VOLUMETRICA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 0.45</td> <td>CAPA VEGETAL</td> </tr> <tr> <td>2 INDEF</td> <td>ARENA ARCILLOSA</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>90% 95% 100%</td> </tr> <tr> <td></td> <td>0.92 0.90 0.88</td> </tr> </tbody> </table>		COEFICIENTES DE VARIACION VOLUMETRICA		1 0.45	CAPA VEGETAL	2 INDEF	ARENA ARCILLOSA	3	90% 95% 100%		0.92 0.90 0.88																								
COEFICIENTES DE VARIACION VOLUMETRICA																																			
1 0.45	CAPA VEGETAL																																		
2 INDEF	ARENA ARCILLOSA																																		
3	90% 95% 100%																																		
	0.92 0.90 0.88																																		
<p align="center"><b>DATOS GENERALES DEL BANCO:</b></p>																																			
DENOMINACION:		BANCO SIN NOMBRE																																	
UBICACION:		KM. 140+180 A 40 MTS. DE LA AUTOPISTA MEXICO - QUERETARO																																	
CAPACIDAD:		937500 M3																																	
EMPLEO:		SUBRASANTE Y TERRAPLEN																																	
TRATAMIENTO:		CRIBADO																																	
CLASIFICACION SUCS:		ARENA ARCILLOSA																																	
OBSERVACIONES:		ACTUALMENTE PRESENTA FRENTE ABIERTO DE EXPLORACION																																	

Figura B.3 Croquis e informe de laboratorio (Referencia 3)

**AUTOPISTA: MÉXICO - QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN - PALMILLAS, KM 133+000 - 148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN - PALMILLAS, KM 133+000 - 148+000**

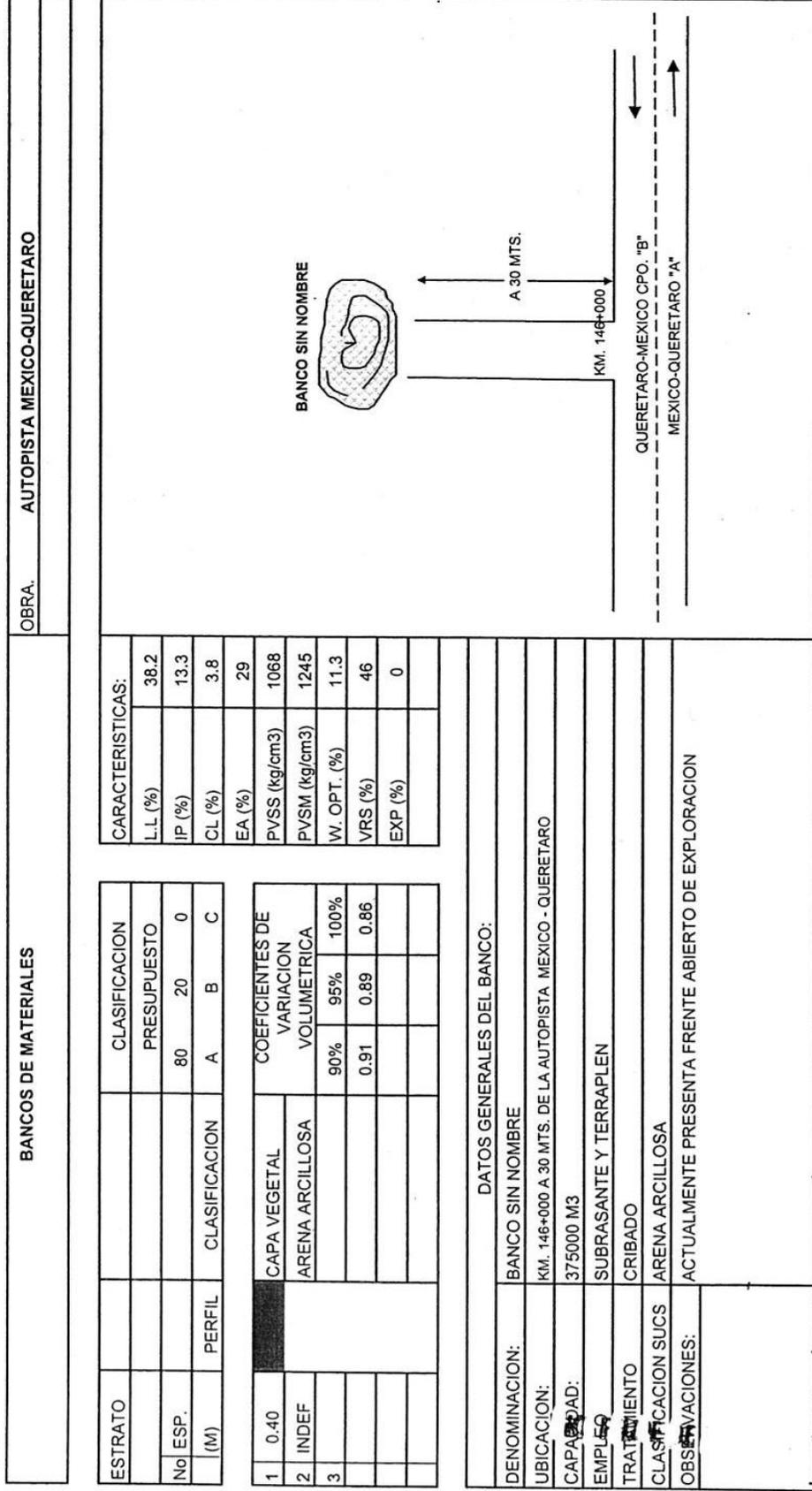


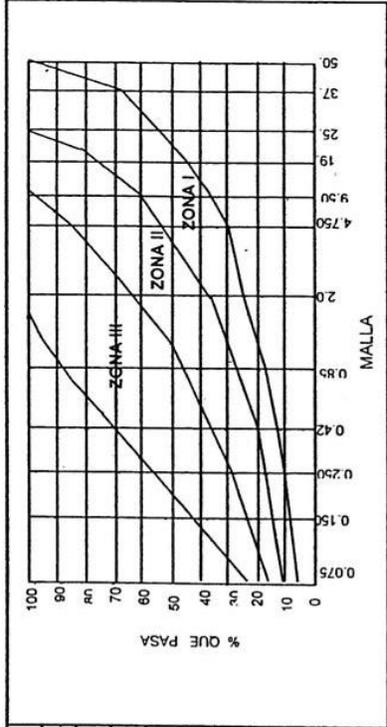
Figura B.4 Croquis e informe de laboratorio (Referencia 3)

**AUTOPISTA: MÉXICO - QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN - PALMILLAS, KM 133+000 - 148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN - PALMILLAS, KM 133+000 - 148+000**

<b>BANCOS DE MATERIALES</b>		<b>OBRA. AUTOPISTA MEXICO-QUERETARO</b>
-----------------------------	--	---

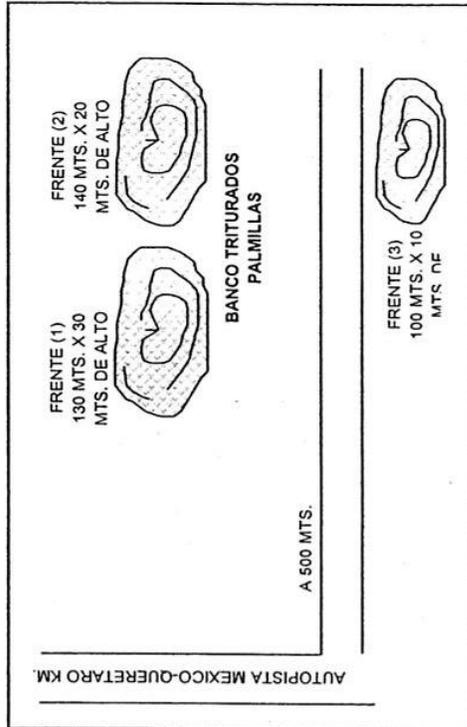
ESTRATO	PERFIL	CLASIFICACION	CLASIFICACION	PRESUPUESTO
No ESP.		0	75	35
(M)		A	B	C

<b>CARACTERISTICAS:</b>	
L.L. (%)	
IP (%)	
CL (%)	
EA (%)	
PVSS (kg/cm3)	
PVSM (kg/cm3)	
W. OPT. (%)	
VRS (%)	
EXP (%)	



CAPA VEGETAL		COEFICIENTES DE VARIACION VOLUMETRICA	
1	0.34	90%	95%
2	INDEF.	0.98	0.94
3			

<b>DATOS GENERALES DEL BANCO:</b>	
DENOMINACION:	BANCO PALMILLAS
UBICACION:	KM. 152+800 AUTOPISTA MEXICO - QUERETARO
CAPACIDAD:	1,170,000
EMPLEO	MATERIAL PETREO
TRATAMIENTO	TRITURADO TOTAL



CLASIFICACION SUCS	
OBSERVACIONES:	ACTUALMENTE PRESENTA FRENTE ABIERTO DE EXPLORACION

Figura B.5 Croquis e informe de laboratorio (Referencia 3)



**AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

**TABLA C.1 ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS**

Características	No. de muestras analizadas	Valor determinado		Valor promedio	Desviación estándar	% de muestras que no cumplen especificación	Especificación SCT
		Mínimo	máximo				

**Cuerpo A carril de baja**

SUBRASANTE (Normativa SCT, N.CMT.1.03/02)							
VRS; % (CBR)	7	24	33	29	3.61	0.00	20
EXP; %	7	0.00	0.90	0.36	0.30	0.00	2
LL; %	7	27.60	37.40	33.41	3.32	0.00	40
Compactación; %	7	87	95	90	2.55	100.00	100±2
IP; %	7	5.50	12.90	9.78	2.43	28.57	12
Espesor; cm	7	20	35	25	5.77	71.42	30
SUBYACENTE (Normativa SCT, N.CMT.1.02/02)							
VRS; % (CBR)	7	20	50	35	13.22	0.00	10
EXP; %	7	0.00	0.40	0.16	0.09	0.00	3
LL; %	7	29.00	47.40	39.51	5.84	0.00	50
Compactación; %	7	89	91	90	0.64	100.00	95±2
Espesor; cm	7	15	25	21	3.19	100.00	30
TERRAPLÉN (Normativa SCT, N.CMT.1.01/02)							
VRS; % (CBR)	4	19	47	26	12.00	0.00	5
EXP; %	4	0.00	0.30	0.12	0.00	0.00	5
LL; %	4	30.50	48.80	38.95	6.50	0.00	50
Compactación; %	4	89	93	91	1.50	0.00	90±2

**Cuerpo A carril central**

SUBRASANTE (Normativa SCT, N.CMT.1.03/02)							
VRS; % (CBR)	9	20	40	29	8.07	0.00	20
EXP; %	9	0.00	0.90	0.29	8.25	0.00	2
LL; %	9	24.80	57.10	37.50	8.40	22.22	40
Compactación; %	9	90	92	91	0.81	100.00	100±2
IP; %	9	8.20	27.10	12.36	5.39	55.55	12
Espesor; cm	9	15	25	18	3.97	100.00	30
SUBYACENTE (Normativa SCT, N.CMT.1.02/02)							
VRS; % (CBR)	8	19	32	26	3.96	0.00	10
EXP; %	8	0.00	0.40	0.07	0.12	0.00	3
LL; %	8	29.60	48.60	37.45	6.00	0.00	50
Compactación; %	8	90	93	91	1.26	75.00	95±2
Espesor; cm	8	15	20	19	2.16	100.00	30
TERRAPLÉN (Normativa SCT, N.CMT.1.01/02)							
VRS; % (CBR)	6	11	31	21	5.61	0.00	5
EXP; %	6	0.00	0.80	0.32	0.26	0.00	5
LL; %	6	25.30	48.60	36.66	8.45	0.00	50
Compactación; %	6	88	93	91	2.46	0.00	90±2

**AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO**

**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**

**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

**TABLA C.2 ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS**

Características	No. de muestras analizadas	Valor determinado		Valor promedio	Desviación estándar	% de muestras que no cumplen especificación	Especificación SCT
		Mínimo	máximo				

**Cuerpo B carril de baja**

SUBRASANTE (Normativa SCT, N.CMT.1.03/02)							
VRS; % (CBR)	6	16	56	41	12.90	16.66	20
EXP; %	6	0.50	8.80	0.60	0.15	0.00	2
LL; %	6	20.50	42.90	32.70	8.12	16.66	40
Compactación; %	6	90	96	92	2.03	100.00	100±2
IP; %	6	2.40	18.71	11.30	4.86	50.00	12
Espesor; cm	6	7	20	15	5.59	100.00	30
SUBYACENTE (Normativa SCT, N.CMT.1.02/02)							
VRS; % (CBR)	6	13	39	26	9.68	0.00	10
EXP; %	7	0.00	0.80	0.34	0.20	0.00	3
LL; %	7	24.10	44.50	35.67	7.25	0.00	50
Compactación; %	7	90	96	91	1.99	86.00	95±2
Espesor; cm	7	8	28	22	6.12	100.00	30
TERRAPLÉN (Normativa SCT, N.CMT.1.01/02)							
VRS; % (CBR)	4	12	36	22	9.80	0.00	5
EXP; %	4	0.70	0.90	0.75	0.07	0.00	5
LL; %	4	35.10	48.60	39.85	5.41	0.00	50
Compactación; %	4	90	91	91	0.5	0.00	90±2

**Cuerpo B carril central**

SUBRASANTE (Normativa SCT, N.CMT.1.03/02)							
VRS; % (CBR)	7	11	44	27	11.78	28.00	20
EXP; %	7	0.30	1.20	0.27	0.31	0.00	2
LL; %	6	35.6	48.10	40.91	3.81	42.85	40
Compactación; %	6	91	93	92	0.57	100.00	100±2
IP; %	7	11.40	20.5	15.25	2.81	85.71	12
Espesor; cm	7	10	30	20	5.62	85.71	30
SUBYACENTE (Normativa SCT, N.CMT.1.02/02)							
VRS; % (CBR)	6	14	30	24	6.15	0.00	10
EXP; %	7	0.00	1.40	0.25	0.61	0.00	3
LL; %	7	31.50	41.20	37.21	3.78	0.00	50
Compactación; %	7	90	94	92	2.09	71.43	95±2
Espesor; cm	7	15	30	21	4.16	85.72	30
TERRAPLÉN (Normativa SCT, N.CMT.1.01/02)							
VRS; % (CBR)	7	12	35	25	8.12	0.00	5
EXP; %	7	0.00	1.90	0.38	0.59	0.00	5
LL; %	7	34.20	45.80	39.31	3.76	0.00	50
Compactación; %	7	90	93	90	1.04	0.00	90±2

**AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

**TABLA C.3 ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS**

Características	No. de muestras analizadas	Valor determinado		Valor promedio	Desviación estándar	% de muestras que no cumplen especificación	Especificación SCT	
		Mínimo	Máximo				$\sum L \leq 106$	$\sum L > 106$

**Cuerpo A carril de baja**

BASE HIDRÁULICA (Normativa SCT,N. CMT.4.02.00/04)								
LL; %	9	30.30	39.20	35.70	2.80	100.00	25	25
IP; %	9	7.00	14.40	11.45	2.06	100.00	6	6
EA; %	9	17	43	26	7.78	100.00	40	50
VRS; %	9	70	122	100	15.13	44.00	80	100
DA; %	9						35	30
Compactación; %	9	80	93	89	4	100.00	100	100
Partículas alargadas y lajeadas; %	9						40	35
Espesor ; cm	9	10	30	20	5.53			

**Cuerpo A carril central**

BASE HIDRÁULICA (Normativa SCT,N. CMT.4.02.00/04)								
LL; %	9	34.00	47.20	37.16	3.81	100.00	25	25
IP; %	9	10.20	19.90	12.55	2.80	100.00	6	6
EA; %	9	19	33	26	5.19	100.00	40	50
VRS; %	8	92	109	100	5.96	37.00	80	100
DA; %							35	30
Compactación; %	9	93	96	95	0.88	100.00	100	100
Partículas alargadas y lajeadas; %								3
Espesor ; cm	9	10	25	17.77	4.77		40	35
SUB-BASE (Normativa SCT,N. CMT.4.02.00/04)								
LL; %	9	28.10	38.60	34.00	3.52	100.00	30	25
IP; %	9	5.90	13.60	10.27	2.46	88.88	10	6
VRS; %	8	84	112	97	10.41	00.00	50	60
EA; %	9	15	25	19	5.56	100.00	30	40
DA; %							50	40
Compactación; %	9	90	97	95	2.00	100.00	100	100

AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO

TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000

SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000

**TABLA C.4 ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS**

Características	No. de muestras analizadas	Valor determinado		Valor promedio	Desviación estándar	% de muestras que no cumplen especificación	Especificación SCT	
		Mínimo	Máximo				$\sum L \leq 106$	$\sum L > 106$

**Cuerpo B carril de baja**

BASE HIDRÁULICA (Normativa SCT, N. CMT.4.02.00/04)								
LL; %	7	24.80	40.50	30.98	4.84	85.72	25	25
IP; %	7	3.50	15.00	8.00	3.55	71.42	6	6
EA; %	7	22	37	32	4.76	100.00	40	50
VRS; %	7	84	114	101	9.38	28.57	80	100
DA; %							35	30
Compactación; %	7	90	98	96	4.18	100.00	100	100
Partículas alargadas y lajeadas; %							40	35
Espesor ; cm	7	10	30	21	7.12			

**Cuerpo B carril central**

BASE HIDRÁULICA (Normativa SCT, N. CMT.4.02.00/04)								
LL; %	7	29.50	37.50	32.00	3.00	100.00	25	25
IP; %	7	7.10	12.80	8.85	2.00	100.00	6	6
EA; %	7	19	30	25	3.85	100.00	40	50
VRS; %	7	73	121	96	17.78	57.14	80	100
DA; %							35	30
Compactación; %	7	93	95	94	1.00	100.00	100	100
Partículas alargadas y lajeadas; %							40	35
Espesor ; cm	7	15	25	20	3.77			
SUB-BASE (Normativa SCT, N. CMT.4.02.00/04)								
LL; %	6	30.10	40.60	33.78	3.66	100.00	30	25
IP; %	6	8.30	15.00	10.24	2.49	100.00	10	6
VRS; %	5	50	130	86	31.83	40.00	50	60
EA; %	6	20	28	24	2.54	100.00	30	40
DA; %							50	40
Compactación; %	6	91	94	93	1.35	100.00	100	40
Espesor ; cm	6	10	25	18	4.81			100

**TABLA D.1**

		Cálculo de tránsito acumulado a ejes equivalentes de 8.2 Toneladas.												Fecha = 15 de Febrero del 2006			
Carretera : México - Querétaro		TDPA : 30,784		TDPA_DISEÑO = 11,544		n = 20 años											
Tramo : Tepoztlán-Palmillas		Tasa de crecimiento anual (r) : 5.00%		Coeficientes direccionales : 0.50		Coeficientes de distribución de carril : 0.75											
del km : 90+000		al km : 148+000															
Obra: Subtramo km.133+000 a 148+000																	
Tipo de camión	Composición [%]	Coeficiente de diseño												Ejes equivalentes			
		z = 0	z = 5	z = 10	z = 15	z = 20	z = 30	z = 40	z = 50	z = 60	z = 70	z = 80	z = 90	z = 100	z = 5	z = 60	
A2	56.50	Cargado	100	0.0047	0.0028	0.0006	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
		Vació	0	0.0047	0.0028	0.0006	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
A2		Cargado	100	0.5362	0.3384	0.1317	0.0644	0.0398	0.0237	0.0153	0.0139	0.0139	0.0139	0.0139	0.0139	0.0139	0.0139
		Vació	0	0.5362	0.1550	0.0108	0.0016	0.0005	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
B2	5.00	Cargado	80	2.0000	1.9227	1.8034	1.8895	2.0846	2.4563	2.9388	3.0709	0.0769	0.0721	0.0756	0.0834	0.0883	0.1176
		Vació	20	2.0000	1.6428	1.0341	0.7574	0.6293	0.5197	0.4431	0.4278	0.2000	0.0164	0.1033	0.0766	0.0663	0.0452
B3	1.00	Cargado	80	1.9993	1.9045	1.6138	1.3685	1.2173	0.8762	0.8512	0.8471	0.1610	0.0129	0.1019	0.0997	0.0700	0.0068
		Vació	20	1.9993	1.5585	0.6883	0.3211	0.1860	0.0910	0.0575	0.0520	0.0040	0.0031	0.0014	0.0006	0.0004	0.0001
B4	0.40	Cargado	80	2.6858	2.2816	1.5424	1.2184	1.0738	0.7512	0.7525	0.7537	0.0485	0.0272	0.0449	0.0339	0.0224	0.0024
		Vació	20	2.6858	1.7763	0.6134	0.2525	0.1400	0.0624	0.0396	0.0359	0.0021	0.0014	0.0005	0.0002	0.0001	0.0000
C2	7.30	Cargado	80	2.0000	1.9227	1.8034	1.8895	2.0846	2.4563	2.9388	3.0709	0.1168	0.1123	0.1103	0.1217	0.1434	0.1793
		Vació	20	2.0000	1.2954	0.3709	0.1232	0.0591	0.0272	0.0145	0.0126	0.0292	0.0189	0.0054	0.0018	0.0009	0.0004
C3	8.10	Cargado	80	3.0000	2.9223	2.7867	2.8167	2.9277	2.4554	2.9373	3.0693	0.1944	0.1884	0.1866	0.1825	0.1897	0.1993
		Vació	20	3.0000	1.6720	0.4318	0.1542	0.0797	0.0395	0.0227	0.0201	0.0486	0.0271	0.0070	0.0025	0.0013	0.0006
C2 - R2		Cargado	80	4.0000	4.0122	4.2936	4.9715	5.7609	7.0356	8.5785	8.9921	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
		Vació	20	4.0000	2.1000	0.4618	0.1402	0.0651	0.0293	0.0154	0.0134	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
C2 - R3		Cargado	80	5.0000	5.0867	5.5674	6.4247	7.3842	8.2894	10.5996	11.1681	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
		Vació	20	5.0000	2.2327	0.4499	0.1364	0.0635	0.0287	0.0151	0.0131	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
C3 - R2		Cargado	80	5.0000	5.0119	5.2770	5.8987	6.6040	7.0347	8.5771	8.9905	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
		Vació	20	5.0000	2.4766	0.5227	0.1712	0.0857	0.0416	0.0236	0.0208	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
C3 - R3		Cargado	80	6.0000	6.0115	6.2603	6.8259	7.4471	7.0337	8.5756	8.9689	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
		Vació	20	6.0000	2.6093	0.5108	0.1674	0.0842	0.0410	0.0233	0.0206	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
T2 - S1		Cargado	80	3.0000	2.9674	3.0485	3.4305	3.9227	4.7459	5.7586	6.0315	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
		Vació	20	3.0000	1.9854	0.5891	0.1986	0.0956	0.0441	0.0235	0.0205	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
T2 - S2		Cargado	80	4.0000	3.9671	4.0318	4.3577	4.7658	4.7450	5.7572	6.0299	0.0096	0.0097	0.0105	0.0114	0.0114	0.0145
		Vació	20	4.0000	2.2383	0.6117	0.2220	0.1144	0.0566	0.0320	0.0283	0.0024	0.0013	0.0004	0.0001	0.0000	0.0000
T3 - S2		Cargado	80	5.0000	4.9668	5.0152	5.2849	5.6089	4.7441	5.7557	6.0283	0.6160	0.6119	0.6179	0.6511	0.6910	0.7427
		Vació	20	5.0000	2.3572	0.4817	0.1602	0.0812	0.0398	0.0227	0.0201	0.1540	0.0726	0.0148	0.0049	0.0025	0.0012
T3 - S3		Cargado	80	6.0000	5.8522	5.4665	5.2391	5.1661	4.7427	5.7535	6.0259	0.1152	0.1124	0.1050	0.1006	0.0992	0.0911
		Vació	20	6.0000	2.4958	0.4643	0.1546	0.0789	0.0398	0.0227	0.0201	0.0288	0.0120	0.0022	0.0007	0.0004	0.0002
T2 - S1 - R2		Cargado	80	5.0000	5.0569	5.5387	6.5124	7.5990	9.3252	11.3984	11.9527	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
		Vació	20	5.0000	2.7328	0.5955	0.1741	0.0788	0.0346	0.0199	0.0155	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
T3 - S1 - R2		Cargado	80	6.0000	6.0566	6.5221	7.4396	8.4421	9.3243	11.3969	11.9511	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
		Vació	20	6.0000	2.9827	0.6134	0.1929	0.0944	0.0452	0.0252	0.0223	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
T3 - S2 - R2		Cargado	80	7.0000	7.0563	7.5054	8.3668	9.2852	9.3234	11.3955	11.9494	0.0616	0.0621	0.0660	0.0736	0.0817	0.0820
		Vació	20	7.0000	3.1508	0.5910	0.1808	0.0889	0.0428	0.0241	0.0213	0.0154	0.0069	0.0013	0.0004	0.0002	0.0001
T3 - S2 - R3		Cargado	80	8.0000	8.0559	8.4888	9.2940	10.1283	9.3224	11.3940	11.9478	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
		Vació	20	8.0000	3.2920	0.5618	0.1743	0.0862	0.0416	0.0235	0.0208	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
T3 - S2 - R4		Cargado	80	9.0000	9.0556	9.4721	10.2712	10.9714	9.3215	11.3926	11.9462	0.1811	0.1811	0.1894	0.2044	0.2194	0.1684
		Vació	20	9.0000	3.4383	0.5386	0.1663	0.0827	0.0401	0.0228	0.0150	0.0040	0.0027	0.0008	0.0004	0.0002	0.0001
T3 - S3 - S2		Cargado	80	8.0000	7.8020	7.1325	6.4928	6.0625	5.1186	5.6793	5.9268	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
		Vació	20	8.0000	3.0875	0.5067	0.1609	0.0809	0.0404	0.0229	0.0203	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Sumas	100.00											1.7503	1.5566	1.4103	1.4434	1.5233	1.3758
																	1.7330

NOTAS: 1.- Las coeficientes de diseño de acuerdo al REGLAMENTO SCT, de pesos, dimensiones y capacidades de los vehículos autotransporte que operan en México. Se considera que todos los camiones estandarizados con la carga máxima permitida por el Reglamento REGLAMENTO de la SCT.

2.- Vida proyectada: 20 años

3.-

**TABLA D.2**

**Cálculo de tránsito acumulado a ejes equivalentes de 8.2 Toneladas.**

**Cálculo de crecimiento.**

Carretera :	México - Queretaro	Fecha :	15 de febrero del 2006						
Tramo :	Tepozotlán-Palmitillas								
del km :	90+000	al km :	148+000						
Origen :	México								
TDPA =	30,784	Coefficiente direccional =	0.50						
r =	5.0%	Factor de distribución de carril =	0.75						
A =	56.5%	B =	6.4%						
		C =	37.1%						
			TDPA_DISEÑO = 11,544						
Año	To	Z = 0	Z = 5	Z = 10	Z = 15	Z = 20	Z = 30	Z = 60	Z = 90
CT	1.7503	1.7503	1.5566	1.4103	1.4434	1.5233	1.3738	1.6564	1.7330
1	365	7.375E+06	6.559E+06	5.942E+06	6.082E+06	6.419E+06	5.789E+06	6.979E+06	7.302E+06
2	748	1.512E+07	1.345E+07	1.218E+07	1.247E+07	1.316E+07	1.187E+07	1.431E+07	1.497E+07
3	1151	2.325E+07	2.068E+07	1.873E+07	1.917E+07	2.023E+07	1.825E+07	2.200E+07	2.302E+07
4	1573	3.179E+07	2.827E+07	2.561E+07	2.621E+07	2.767E+07	2.495E+07	3.008E+07	3.147E+07
5	2017	4.075E+07	3.624E+07	3.283E+07	3.361E+07	3.547E+07	3.199E+07	3.857E+07	4.035E+07
6	2483	5.016E+07	4.461E+07	4.042E+07	4.137E+07	4.366E+07	3.937E+07	4.747E+07	4.967E+07
7	2972	6.005E+07	5.340E+07	4.838E+07	4.952E+07	5.226E+07	4.713E+07	5.683E+07	5.945E+07
8	3485	7.043E+07	6.263E+07	5.674E+07	5.807E+07	6.129E+07	5.528E+07	6.665E+07	6.973E+07
9	4025	8.132E+07	7.232E+07	6.552E+07	6.706E+07	7.078E+07	6.383E+07	7.696E+07	8.052E+07
10	4591	9.276E+07	8.250E+07	7.474E+07	7.649E+07	8.073E+07	7.281E+07	8.779E+07	9.184E+07
11	5185	1.048E+08	9.318E+07	8.442E+07	8.640E+07	9.119E+07	8.224E+07	9.915E+07	1.037E+08
12	5810	1.174E+08	1.044E+08	9.458E+07	9.680E+07	1.022E+08	9.214E+07	1.111E+08	1.162E+08
13	6465	1.306E+08	1.162E+08	1.053E+08	1.077E+08	1.137E+08	1.025E+08	1.236E+08	1.293E+08
14	7154	1.445E+08	1.285E+08	1.165E+08	1.192E+08	1.258E+08	1.135E+08	1.368E+08	1.431E+08
15	7876	1.591E+08	1.415E+08	1.282E+08	1.312E+08	1.385E+08	1.249E+08	1.506E+08	1.576E+08
16	8635	1.745E+08	1.552E+08	1.406E+08	1.439E+08	1.518E+08	1.369E+08	1.651E+08	1.727E+08
17	9432	1.906E+08	1.695E+08	1.536E+08	1.572E+08	1.659E+08	1.496E+08	1.803E+08	1.887E+08
18	10268	2.075E+08	1.845E+08	1.672E+08	1.711E+08	1.806E+08	1.629E+08	1.963E+08	2.054E+08
19	11147	2.252E+08	2.003E+08	1.815E+08	1.857E+08	1.960E+08	1.768E+08	2.131E+08	2.230E+08
20	12069	2.439E+08	2.169E+08	1.965E+08	2.011E+08	2.122E+08	1.914E+08	2.308E+08	2.415E+08
$\Sigma \Delta =$	To * CT * TDPA								
CT =	$[(1+r)n - 1] * 365$								
r	Tasa de crecimiento								
	To = Ejes equivalentes en un año								
	CT = Coeficiente de acumulación de tránsito								
	r = Tasa de crecimiento								

<b>TABLA D.3</b>								
<b>Diseño de pavimento Método de la AASHTO</b>								
<b>Carretera:</b>	MÉXICO-QUERÉTARO						<b>Fecha =</b>	27/Febr/2006
<b>Tramo:</b>	TEPOZOTLÁN-PALLILLAS							
<b>Km :</b>	90+000 AL 148+000, SUBTRAMO KM 133+000 AL 148+000							
<b>Origen :</b>	MÉXICO							
<b>Datos de transito</b>								
<b>TDPA =</b>	30,784	vehiculos por dia						
<b>Composición vehicular</b>								
<b>A2 =</b>	56.50%	<b>T2 - S1 =</b>		<b>r =</b>	5.0 %			
<b>A'2 =</b>		<b>T2 - S2 =</b>	0.30%	<b>n =</b>	20	años		
<b>B2 =</b>	5.00%	<b>T3 - S2 =</b>	15.40%	<b>CD =</b>	50.0 %	Tabla s/n, pag. II-9		
<b>B3 =</b>	1.00%	<b>T3 - S3 =</b>	2.40%	<b>CC =</b>	75.0 %			
<b>B4 =</b>	0.40%	<b>2 - S1 - R2 =</b>						
<b>C2 =</b>	7.30%	<b>3 - S1 - R2 =</b>						
<b>C3 =</b>	8.10%	<b>3 - S2 - R2 =</b>	1.10%					
<b>C2 - R2 =</b>		<b>T3 - S2 - R3 =</b>						
<b>C2 - R3 =</b>		<b>T3 - S2 - R4 =</b>	2.50%					
<b>C3 - R2 =</b>		<b>T3 - S3 - R2 =</b>						
<b>C3 - R3 =</b>		<b>Total =</b>	100.00%					
<b>Datos de diseño</b>								
<b>Factibilidad por etapa =</b>	95.0 %	Tabla 4.1, pag I - 62		<b>No de etapas=</b>	1			
<b>Factibilidad total =</b>	95.0 %							
<b>Zr =</b>	-1.751	pag I - 62						
<b>So =</b>	0.45							
<b>Po =</b>	4.2							
<b>Pt =</b>	2.5							
<b>Transito de diseño</b>				<b>Transito de la Estructura</b>				
<b>Esal<sub>req</sub> =</b>	220,065,082	<b>SN<sub>req</sub> =</b>	6.67	<b>Esal<sub>adm</sub> =</b>	183,105,862			
<b>Diseño estructural del Pavimento</b>								
Capa	E psi	a*	m**	ALTERNATIVA I				
				e in	SN***	e cm		
Concreto asfáltico, e <sub>CA</sub> )	426,682	0.43		8.26	3.55	20.98		
izada con cemento, e <sub>BEC</sub> )								
Base granular, e <sub>BH</sub> )	54 046	0.22	1.20	6.69	1.47	18.00		
Sub-base granular	42 668	0.21	1.15	7.87	1.65	19.99		
Cimentación	12,516							
				6.67				
* Fig. 2.5, 2.6 y 2.7, pag II - 18 II-20 y II - 21		** Tabla 2.4, pag II - 26		*** Nomograma 3.1, pag II - 32				
<b>SIMBOLOGIA</b>				<b>ESTRUCTURA</b>				
TDPA =	Transito Diario Promedio Anual							
CD =	Coeficiente de distribución direccional, en porciento							
CC =	Coeficiente de distribución de carril, en porciento							
Zr =	Desviación estandar Normal							
So =	Error estandar del trafico							
Po =	Indice de Servicio Inicial							
Pt =	Indice de Servicio Final							
M <sub>k</sub> =	Modulo de Resiliencia de la subrasante.							
a:	Coeficiente de capa.							
m:	Coeficiente de drenaje (solo en capas granulares)							
ESAL <sub>req</sub> =	Ejes estandar equivalentes requeridos por el transito							
ESAL <sub>adm</sub> =	Ejes estandar equivalentes admisibles por la estructura							
SN <sub>req</sub> =	Número requerido por el tránsito							
SN <sub>adm</sub> =	Número admisibles por la estructura							
				SR a <sub>1</sub> =0.11, m <sub>1</sub> =1.15		e <sub>sp</sub> = 30.0		

<b>TABLA D.4</b>							
<i>Carretera :</i>	MÉXICO-QUERÉTARO			TDPA =	30,784	CD =	0.50
<i>Tramo</i>	TEPOZOTLÁN-PALMILLAS			n (años)	20	CC =	0.75
<i>km :</i>	90+000 AL 148+000, SUBTRAMO KM 133+000 /			r =	0.05	Pt=	2.50
<i>Origen :</i>	MÉXICO			SN =	6.67	F. crecim. =	33.07
Tipo de camión	Comp. Vehic.	Porcentaje cargado/vacio		Trafico presente	Coefficiente Esal	Esal's anuales	Esal's de diseño
A2	0.565	Cargado	1.00	2,380,661	0.0004	1,015	33,573
		Vacio	0.00	0	0.0002	0	0
A'2	0.000	Cargado	1.00	0	0.0376	0	0
		Vacio	0.00	0	0.0009	0	0
B2	0.050	Cargado	0.80	168,542	3.9013	657,527	21,741,763
		Vacio	0.20	42,136	0.5361	22,589	746,932
B3	0.010	Cargado	0.80	33,708	3.3365	112,468	3,718,851
		Vacio	0.20	8,427	0.1078	908	30,040
B4	0.004	Cargado	0.80	13,483	3.2153	43,354	1,433,532
		Vaciuo	0.20	3,371	0.0716	241	7,980
C2	0.073	Cargado	0.80	246,072	3.9013	959,990	31,742,974
		Vacio	0.20	61,518	0.0389	2,396	79,216
C3	0.081	Cargado	0.80	273,039	3.3365	910,988	30,122,690
		Vacio	0.20	68,260	0.0508	3,470	114,752
C2 - R2	0.000	Cargado	0.80	0	8.6422	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0442	0	0
C2 - R3	0.000	Cargado	0.80	0	8.3817	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0428	0	0
C3 - R2	0.000	Cargado	0.80	0	8.0775	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0561	0	0
C3 - R3	0.000	Cargado	0.80	0	7.8169	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0547	0	0
T2 - S1	0.000	Cargado	0.80	0	6.2717	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0627	0	0
T2 - S2	0.003	Cargado	0.80	10,113	6.0112	60,789	2,010,030
		Vacio	0.20	2,528	0.0742	188	6,206
T3 - S2	0.154	Cargado	0.80	519,111	5.4464	2,827,295	93,487,212
		Vacio	0.20	129,778	0.0523	6,791	224,564
T3 - S3	0.024	Cargado	0.80	80,900	4.5096	364,832	12,063,519
		Vacio	0.20	20,225	0.0509	1,029	34,041
T2 - S1 - R2	0.000	Cargado	0.80	0	11.0127	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0539	0	0
T3 - S1 - R2	0.000	Cargado	0.80	0	10.4479	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0634	0	0
T3 - S2 - R2	0.011	Cargado	0.80	37,079	8.4910	314,840	10,410,497
		Vacio	0.20	9,270	0.0592	549	18,148
T3 - S2 - R3	0.000	Cargado	0.80	0	6.1119	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0570	0	0
T3 - S2 - R4	0.025	Cargado	0.80	84,271	4.3068	362,936	12,000,831
		Vacio	0.20	21,068	0.0542	1,141	37,732
T3 - S3 - S2	0.000	Cargado	0.80	0	3.8451	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0525	0	0
<b>Totales</b>				<b>4,213,560</b>		<b>6,655,337</b>	<b>220,065,082</b>

<b>TABLA D.5</b>								
<b>Diseño de pavimento Método de la AASHTO</b>								
<b>Carretera:</b>	MÉXICO-QUERÉTARO						<b>Fecha =</b>	27/Feb/2006
<b>Tramo:</b>	TEPOZOTLÁN -PALMILLAS							
<b>Km :</b>	90+000 AL 148+000, SUBTRAMO KM 133+000 AL 148+000							
<b>Origen :</b>	MÉXICO							
<b>Datos de tránsito</b>								
<b>TDPA =</b>	30,784	vehiculos por día						
<b>Composición vehicular</b>								
<b>A2 =</b>	56.50%	<b>T2 - S1 =</b>		<b>r =</b>	5.0 %			
<b>A'2 =</b>		<b>T2 - S2 =</b>	0.30%	<b>n =</b>	20	años		
<b>B2 =</b>	5.00%	<b>T3 - S2 =</b>	15.40%	<b>CD =</b>	50.0 %	Tabla s/n, pag. II-9		
<b>B3 =</b>	1.00%	<b>T3 - S3 =</b>	2.40%	<b>CC =</b>	75.0 %			
<b>B4 =</b>	0.40%	<b>2 - S1 - R2 =</b>						
<b>C2 =</b>	7.30%	<b>3 - S1 - R2 =</b>						
<b>C3 =</b>	8.10%	<b>3 - S2 - R2 =</b>	1.10%					
<b>C2 - R2 =</b>		<b>T3 - S2 - R3 =</b>						
<b>C2 - R3 =</b>		<b>T3 - S2 - R4 =</b>	2.50%					
<b>C3 - R2 =</b>		<b>T3 - S3 - R2 =</b>						
<b>C3 - R3 =</b>		<b>Total =</b>	100.00%					
<b>Datos de diseño</b>								
<b>Factibilidad por etapa =</b>	95.0 %	Tabla 4.1, pag I - 62		<b>No de etapas=</b>	1			
<b>Factibilidad total =</b>	95.0 %							
<b>Zr =</b>	-1.751	pag I - 62						
<b>So =</b>	0.45							
<b>Po =</b>	4.2							
<b>Pt =</b>	2.5							
<b>Transito de diseño</b>				<b>Transito de la Estructura</b>				
<b>Esal<sub>req</sub> =</b>	220,105,767	<b>SN<sub>req</sub> =</b>	6.68	<b>Esal<sub>adm</sub> =</b>	194,152,520			
<b>Diseño estructural del Pavimento</b>								
Capa	E psi	a*	m**	ALTERNATIVA II				
				e in	SN***	e cm		
Concreto asfáltico, e <sub>CA</sub> )	426,682	0.43		3.94	1.69	10.01		
trataada con asfalto, e <sub>BA</sub> )	284 454	0.26		12.99	3.38	32.99		
Base granular, e <sub>BH</sub> )								
Sub-base granular	42,668	0.21	1.15	7.87	1.65	19.99		
Cimentación	12,518							
					6.72			
* Fig. 2.5, 2.6 y 2.7, pag II - RR II - 20 y II - 21		** Tabla 2.4, pag II - 26		*** Nomograma 3.1, pag II - 32				
<b>SIMBOLOGIA</b>				<b>ESTRUCTURA</b>				
<b>TDPA =</b>	Tránsito Diario Promedio Anual							
<b>CD =</b>	Coeficiente de distribución direccional, en porciento							
<b>CC =</b>	Coeficiente de distribución de carril, en porciento							
<b>Zr =</b>	Desviación estandar Normal							
<b>So =</b>	Error estandar del tráfico							
<b>Po =</b>	Índice de Servicio Inicial							
<b>Pt =</b>	Índice de Servicio Final							
<b>M<sub>k</sub> =</b>	Modulo de Resiliencia de la subrasante.							
<b>a<sub>i</sub> =</b>	Coeficiente de capa.							
<b>m<sub>i</sub> =</b>	Coeficiente de drenaje (solo en capas granulares)							
<b>ESAL<sub>req</sub> =</b>	Ejes estandar equivalentes requeridos por el tránsito							
<b>ESAL<sub>adm</sub> =</b>	Ejes estandar equivalentes admisibles por la estructura							
<b>SN<sub>req</sub> =</b>	Número requerido por el tránsito							
<b>SN<sub>adm</sub> =</b>	Número admisibles por la estructura							
				SR a <sub>2</sub> =0.11, m <sub>2</sub> =1.15	e <sub>SP</sub> = 30.0			

<b>TABLA D.6</b>							
<b>Carretera :</b>	MÉXICO-QUERÉTARO			<b>TDPA =</b>	30,784	<b>CD =</b>	0.50
<b>Tramo</b>	TEPOZOTLÁN -PALMILLAS			<b>n (años)</b>	20	<b>CC =</b>	0.75
<b>km :</b>	90+000 AL 148+000, SUBTRAMO KM 133+000			<b>r =</b>	0.05	<b>Pt=</b>	2.50
<b>Origen :</b>	MÉXICO			<b>SN =</b>	6.68	<b>F. crecim. =</b>	33.07
<b>Tipo de camión</b>	<b>Comp. Vehic.</b>	<b>Porcentaje cargado/vacio</b>		<b>Trafico presente</b>	<b>Coefficiente Esal</b>	<b>Esal's anuales</b>	<b>Esal's de diseño</b>
A2	0.565	Cargado	1.00	2,380,661	0.0004	1,015	33,557
		Vacio	0.00	0	0.0002	0	0
A'2	0.000	Cargado	1.00	0	0.0376	0	0
		Vacio	0.00	0	0.0009	0	0
B2	0.050	Cargado	0.80	168,542	3.9030	657,818	21,751,378
		Vacio	0.20	42,136	0.5360	22,585	746,800
B3	0.010	Cargado	0.80	33,708	3.3370	112,485	3,719,416
		Vacio	0.20	8,427	0.1078	908	30,026
B4	0.004	Cargado	0.80	13,483	3.2158	43,360	1,433,751
		Vacio	0.20	3,371	0.0716	241	7,976
C2	0.073	Cargado	0.80	246,072	3.9030	960,414	31,757,012
		Vacio	0.20	61,518	0.0389	2,395	79,181
C3	0.081	Cargado	0.80	273,039	3.3370	911,126	30,127,266
		Vacio	0.20	68,260	0.0508	3,469	114,703
C2 - R2	0.000	Cargado	0.80	0	8.6455	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0442	0	0
C2 - R3	0.000	Cargado	0.80	0	8.3843	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0428	0	0
C3 - R2	0.000	Cargado	0.80	0	8.0795	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0560	0	0
C3 - R3	0.000	Cargado	0.80	0	7.8183	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0547	0	0
T2 - S1	0.000	Cargado	0.80	0	6.2742	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0627	0	0
T2 - S2	0.003	Cargado	0.80	10,113	6.0131	60,807	2,010,652
		Vacio	0.20	2,528	0.0742	188	6,203
T3 - S2	0.154	Cargado	0.80	519,111	5.4471	2,827,628	93,498,210
		Vacio	0.20	129,778	0.0523	6,788	224,467
T3 - S3	0.024	Cargado	0.80	80,900	4.5099	364,849	12,064,095
		Vacio	0.20	20,225	0.0509	1,029	34,027
T2 - S1 - R2	0.000	Cargado	0.80	0	11.0167	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0538	0	0
T3 - S1 - R2	0.000	Cargado	0.80	0	10.4507	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0633	0	0
T3 - S2 - R2	0.011	Cargado	0.80	37,079	8.4924	314,894	10,412,256
		Vacio	0.20	9,270	0.0592	549	18,140
T3 - S2 - R3	0.000	Cargado	0.80	0	6.1122	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0569	0	0
T3 - S2 - R4	0.025	Cargado	0.80	84,271	4.3061	362,879	11,998,936
		Vacio	0.20	21,068	0.0541	1,141	37,715
T3 - S3 - S2	0.000	Cargado	0.80	0	3.8445	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0524	0	0
<b>Totales</b>				<b>4,213,560</b>		<b>6,656,568</b>	<b>220,105,767</b>

<b>TABLA D.7</b>								
<b>Diseño de pavimento Método de la AASHTO</b>								
<b>Carretera:</b>	MÉXICO-QUERÉTARO						<b>Fecha =</b>	27/Feb/2006
<b>Tramo:</b>	TEPOZOTLÁN -PALMILLAS							
<b>Km :</b>	90+000 AL 148+000, SUBTRAMO KM 133+000 AL 148+000							
<b>Origen :</b>	MÉXICO							
<b>Datos de transito</b>								
<b>TDPA =</b>	30,784	vehiculos por dia						
<b>Composición vehicular</b>								
<b>A2 =</b>	56.50%	<b>T2 - S1 =</b>		<b>r =</b>	5.0 %			
<b>A'2 =</b>		<b>T2 - S2 =</b>	0.30%	<b>n =</b>	20	años		
<b>B2 =</b>	5.00%	<b>T3 - S2 =</b>	15.40%	<b>CD =</b>	50.0 %	Tabla s/n, pag. II-9		
<b>B3 =</b>	1.00%	<b>T3 - S3 =</b>	2.40%	<b>CC =</b>	75.0 %			
<b>B4 =</b>	0.40%	<b>2 - S1 - R2 =</b>						
<b>C2 =</b>	7.30%	<b>3 - S1 - R2 =</b>						
<b>C3 =</b>	8.10%	<b>3 - S2 - R2 =</b>	1.10%					
<b>C2 -R2 =</b>		<b>T3 - S2 - R3 =</b>						
<b>C2 -R3 =</b>		<b>T3 - S2 - R4 =</b>	2.50%					
<b>C3 -R2 =</b>		<b>T3 - S3 - R2 =</b>						
<b>C3 -R3 =</b>		<b>Total =</b>	100.00%					
<b>Datos de diseño</b>								
<b>Factibilidad por etapa =</b>	95.0 %	Tabla 4.1, pag I - 62		<b>No de etapas =</b>	1			
<b>Factibilidad total =</b>	95.0 %							
<b>Zr =</b>	-1.751	pag I - 62						
<b>So =</b>	0.45							
<b>Po =</b>	4.2							
<b>Pt =</b>	2.5							
<b>Transito de diseño</b>				<b>Transito de la Estructura</b>				
<b>Esal<sub>req</sub> =</b>	220,105,767	<b>SN<sub>req</sub> =</b>	6.68	<b>Esal<sub>adm</sub> =</b>	198,657,168			
<b>Diseño estructural del Pavimento</b>								
Capa	E psi	a*	m**	ALTERNATIVA III			e <sub>cm</sub>	
				e <sub>in</sub>	SN***			
Concreto asfáltico, e <sub>CA</sub> )	500,000	0.46		3.94	1.81		10.01	
trataada con asfalto, e <sub>BA</sub> )	426,682	0.27		11.81	3.19		30.00	
Base granular, e <sub>BH</sub> )								
Sub-base granular	42,668	0.21	1.15	7.87	1.65		19.99	
Cimentación	13,100							
					6.65			
* Fig. 2.5, 2.6 y 2.7, pag II - 18, II - 20 y II - 21		** Tabla 2.4, pag II - 26		*** Nomograma 3.1, pag II - 32				
<b>SIMBOLOGIA</b>				<b>ESTRUCTURA</b>				
<b>TDPA =</b>	Transito Diario Promedio Anual							
<b>CD =</b>	Coeficiente de distribución direccional, en porciento							
<b>CC =</b>	Coeficiente de distribución de carril, en porciento							
<b>Zr =</b>	Desviación estandar Normal							
<b>So =</b>	Error estandar del trafico							
<b>Po =</b>	Indice de Servicio Inicial							
<b>Pt =</b>	Indice de Servicio Final							
<b>M<sub>k</sub> =</b>	Modulo de Resiliencia de la subrasante.							
<b>a<sub>i</sub> =</b>	Coeficiente de capa.							
<b>m<sub>i</sub> =</b>	Coeficiente de drenaje (solo en capas granulares)							
<b>ESAL<sub>req</sub> =</b>	Ejes estandar equivalentes requeridos por el transito							
<b>ESAL<sub>adm</sub> =</b>	Ejes estandar equivalentes admisibles por la estructura							
<b>SN<sub>req</sub> =</b>	Número requerido por el tránsito							
<b>SN<sub>Adm</sub> =</b>	Número admisibles por la estructura							
					SR a <sub>2</sub> =0.11, m <sub>2</sub> =1.15		e <sub>sp</sub> = 30.0	

<b>TABLA D.8</b>							
<i>Carretera</i> :	MÉXICO-QUERÉTARO			TDPA =	30,784	CD =	0.50
<i>Tramo</i>	TEPOZOTLÁN -PALMILLAS			n (años)	20	CC =	0.75
<i>km</i> :	90+000 AL 148+000, SUBTRAMO KM 133+000.			r =	0.05	Pt=	2.50
<i>Origen</i> :	MÉXICO			SN =	6.68	F. crecim. =	33.07
Tipo de camión	Comp. Vehic.	Porcentaje cargado/vacio		Trafico presente	Coefficiente Esal	Esal's anuales	Esal's de diseño
A2	0.565	Cargado	1.00	2,380,661	0.0004	1,015	33,557
		Vacio	0.00	0	0.0002	0	0
A'2	0.000	Cargado	1.00	0	0.0376	0	0
		Vacio	0.00	0	0.0009	0	0
B2	0.050	Cargado	0.80	168,542	3.9030	657,818	21,751,378
		Vacio	0.20	42,136	0.5360	22,585	746,800
B3	0.010	Cargado	0.80	33,708	3.3370	112,485	3,719,416
		Vacio	0.20	8,427	0.1078	908	30,026
B4	0.004	Cargado	0.80	13,483	3.2158	43,360	1,433,751
		Vacio	0.20	3,371	0.0716	241	7,976
C2	0.073	Cargado	0.80	246,072	3.9030	960,414	31,757,012
		Vacio	0.20	61,518	0.0389	2,395	79,181
C3	0.081	Cargado	0.80	273,039	3.3370	911,126	30,127,266
		Vacio	0.20	68,260	0.0508	3,469	114,703
C2 - R2	0.000	Cargado	0.80	0	8.6455	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0442	0	0
C2 - R3	0.000	Cargado	0.80	0	8.3843	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0428	0	0
C3 - R2	0.000	Cargado	0.80	0	8.0795	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0560	0	0
C3 - R3	0.000	Cargado	0.80	0	7.8183	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0547	0	0
T2 - S1	0.000	Cargado	0.80	0	6.2742	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0627	0	0
T2 - S2	0.003	Cargado	0.80	10,113	6.0131	60,807	2,010,652
		Vacio	0.20	2,528	0.0742	188	6,203
T3 - S2	0.154	Cargado	0.80	519,111	5.4471	2,827,628	93,498,210
		Vacio	0.20	129,778	0.0523	6,788	224,467
T3 - S3	0.024	Cargado	0.80	80,900	4.5099	364,849	12,064,095
		Vacio	0.20	20,225	0.0509	1,029	34,027
T2 - S1 - R2	0.000	Cargado	0.80	0	11.0167	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0538	0	0
T3 - S1 - R2	0.000	Cargado	0.80	0	10.4507	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0633	0	0
T3 - S2 - R2	0.011	Cargado	0.80	37,079	8.4924	314,894	10,412,256
		Vacio	0.20	9,270	0.0592	549	18,140
T3 - S2 - R3	0.000	Cargado	0.80	0	6.1122	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0569	0	0
T3 - S2 - R4	0.025	Cargado	0.80	84,271	4.3061	362,879	11,998,936
		Vacio	0.20	21,068	0.0541	1,141	37,715
T3 - S3 - S2	0.000	Cargado	0.80	0	3.8445	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0524	0	0
<b>Totales</b>				<b>4,213,560</b>		<b>6,656,568</b>	<b>220,105,767</b>

<b>TABLA D.9</b>								
<b>Diseño de pavimento Método de la AASHTO</b>								
<b>Carretera:</b>	MÉXICO-QUERÉTARO						<b>Fecha =</b>	27/Febr/2006
<b>Tramo:</b>	TEPOZOTLÁN-PALMILLAS							
<b>Km :</b>	90+000 AL 148+000, SUBTRAMO KM 133+000 AL 148+000							
<b>Origen :</b>	MÉXICO							
<b>Datos de transito</b>								
<b>TDPA =</b>	30,784	vehiculos por dia						
<b>Composición vehicular</b>								
<b>A2 =</b>	56.50%	<b>T2 - S1 =</b>		<b>r =</b>	5.0 %			
<b>A'2 =</b>		<b>T2 - S2 =</b>	0.30%	<b>n =</b>	20	años		
<b>B2 =</b>	5.00%	<b>T3 - S2 =</b>	15.40%	<b>CD =</b>	50.0 %	Tabla s/n, pag. II-9		
<b>B3 =</b>	1.00%	<b>T3 - S3 =</b>	2.40%	<b>CC =</b>	75.0 %			
<b>B4 =</b>	0.40%	<b>2 - S1 - R2 =</b>						
<b>C2 =</b>	7.30%	<b>3 - S1 - R2 =</b>						
<b>C3 =</b>	8.10%	<b>3 - S2 - R2 =</b>	1.10%					
<b>C2 - R2 =</b>		<b>T3 - S2 - R3 =</b>						
<b>C2 - R3 =</b>		<b>T3 - S2 - R4 =</b>	2.50%					
<b>C3 - R2 =</b>		<b>T3 - S3 - R2 =</b>						
<b>C3 - R3 =</b>		<b>Total =</b>	100.00%					
<b>Datos de diseño</b>								
<b>Factibilidad por etapa =</b>	95.0 %	Tabla 4.1, pag I - 62		<b>No de etapas =</b>	1			
<b>Factibilidad total =</b>	95.0 %							
<b>Zr =</b>	-1.751	pag I - 62						
<b>So =</b>	0.45							
<b>Po =</b>	4.2							
<b>Pt =</b>	2.5							
<b>Transito de diseño</b>				<b>Transito de la Estructura</b>				
<b>Esal<sub>req</sub> =</b>	220,065,082	<b>SN<sub>req</sub> =</b>	6.67	<b>Esal<sub>adm</sub> =</b>	194,080,561			
<b>Diseño estructural del Pavimento</b>								
Capa	E psi	a*	m**	ALTERNATIVA IV			e <sub>cm</sub>	
				e <sub>in</sub>	SN***			
Concreto asfáltico, (e <sub>CA</sub> )	426,682	0.43		5.90	2.54	14.99		
izada con cemento, (e <sub>BEC</sub> )	853,364	0.23		11.02	2.53	27.99		
Base granular, (e <sub>BH</sub> )								
Sub-base granular	42 668	0.21	1.15	7.87	1.65	19.99		
Cimentación	12,516							
					6.72			
* Fig. 2.5, 2.6 y 2.7, pag II - 19, II - 20 y II - 21		** Tabla 2.4, pag II - 26		*** Nomograma 3.1, pag II - 32				
<b>SIMBOLOGIA</b>				<b>ESTRUCTURA</b>				
TDPA = Transito Diario Promedio Anual								
CD = Coeficiente de distribución direccional, en por ciento								
CC = Coeficiente de distribución de carril, en por ciento								
Zr = Desviación estandar Normal								
So = Error estandar del trafico								
Po = Indice de Servicio Inicial								
Pt = Indice de Servicio Final								
M <sub>k</sub> = Modulo de Resiliencia de la subrasante.								
a <sub>i</sub> = Coeficiente de capa.								
m <sub>i</sub> = Coeficiente de drenaje (solo en capas granulares)								
SR: a <sub>1</sub> =0.11, m <sub>1</sub> =1.15 e <sub>sp</sub> = 30.0								
ESAL <sub>req</sub> = Ejes estandar equivalentes requeridos por el transito								
ESAL <sub>adm</sub> = Ejes estandar equivalentes admisibles por la estructura								
SN <sub>req</sub> = Número requerido por el tránsito								
SN <sub>adm</sub> = Número admisibles por la estructura								

<b>TABLA D.10</b>							
<b>Carretera :</b>	MÉXICO-QUERÉTARO			<b>TDPA =</b>	30,784	<b>CD =</b>	0.50
<b>Tramo</b>	TEPOZOTLÁN-PALLILLAS			<b>n (años)</b>	20	<b>CC =</b>	0.75
<b>km :</b>	90+000 AL 148+000, SUBTRAMO KM 133+000			<b>r =</b>	0.05	<b>Pt=</b>	2.50
<b>Origen :</b>	MÉXICO			<b>SN =</b>	6.67	<b>F. crecim. =</b>	33.07
<b>Tipo de camión</b>	<b>Comp. Vehic.</b>	<b>Porcentaje cargado/vacio</b>		<b>Trafico presente</b>	<b>Coefficiente Esal</b>	<b>Esal's anuales</b>	<b>Esal's de diseño</b>
A2	0.565	Cargado	1.00	2,380,661	0.0004	1,015	33,573
		Vacio	0.00	0	0.0002	0	0
A'2	0.000	Cargado	1.00	0	0.0376	0	0
		Vacio	0.00	0	0.0009	0	0
B2	0.050	Cargado	0.80	168,542	3.9013	657,527	21,741,763
		Vacio	0.20	42,136	0.5361	22,589	746,932
B3	0.010	Cargado	0.80	33,708	3.3365	112,468	3,718,851
		Vacio	0.20	8,427	0.1078	908	30,040
B4	0.004	Cargado	0.80	13,483	3.2153	43,354	1,433,532
		Vaciuo	0.20	3,371	0.0716	241	7,980
C2	0.073	Cargado	0.80	246,072	3.9013	959,990	31,742,974
		Vacio	0.20	61,518	0.0389	2,396	79,216
C3	0.081	Cargado	0.80	273,039	3.3365	910,988	30,122,690
		Vacio	0.20	68,260	0.0508	3,470	114,752
C2 - R2	0.000	Cargado	0.80	0	8.6422	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0442	0	0
C2 - R3	0.000	Cargado	0.80	0	8.3817	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0428	0	0
C3 - R2	0.000	Cargado	0.80	0	8.0775	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0561	0	0
C3 - R3	0.000	Cargado	0.80	0	7.8169	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0547	0	0
T2 - S1	0.000	Cargado	0.80	0	6.2717	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0627	0	0
T2 - S2	0.003	Cargado	0.80	10,113	6.0112	60,789	2,010,030
		Vacio	0.20	2,528	0.0742	188	6,206
T3 - S2	0.154	Cargado	0.80	519,111	5.4464	2,827,295	93,487,212
		Vacio	0.20	129,778	0.0523	6,791	224,564
T3 - S3	0.024	Cargado	0.80	80,900	4.5096	364,832	12,063,519
		Vacio	0.20	20,225	0.0509	1,029	34,041
T2 - S1 - R2	0.000	Cargado	0.80	0	11.0127	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0539	0	0
T3 - S1 - R2	0.000	Cargado	0.80	0	10.4479	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0634	0	0
T3 - S2 - R2	0.011	Cargado	0.80	37,079	8.4910	314,840	10,410,497
		Vacio	0.20	9,270	0.0592	549	18,148
T3 - S2 - R3	0.000	Cargado	0.80	0	6.1119	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0570	0	0
T3 - S2 - R4	0.025	Cargado	0.80	84,271	4.3068	362,936	12,000,831
		Vacio	0.20	21,068	0.0542	1,141	37,732
T3 - S3 - S2	0.000	Cargado	0.80	0	3.8451	0	0
		Vacio	0.20	0	0.0525	0	0
<b>Totales</b>				<b>4,213,560</b>		<b>6,655,337</b>	<b>220,065,082</b>

AUTOPISTA: MÉXICO- QUERÉTARO  
TRAMO: TEPOZOTLÁN- PALMILLAS, KM 90+000-148+000  
SUBTRAMO: POLOTITLÁN- PALMILLAS

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA DISPAV – 5

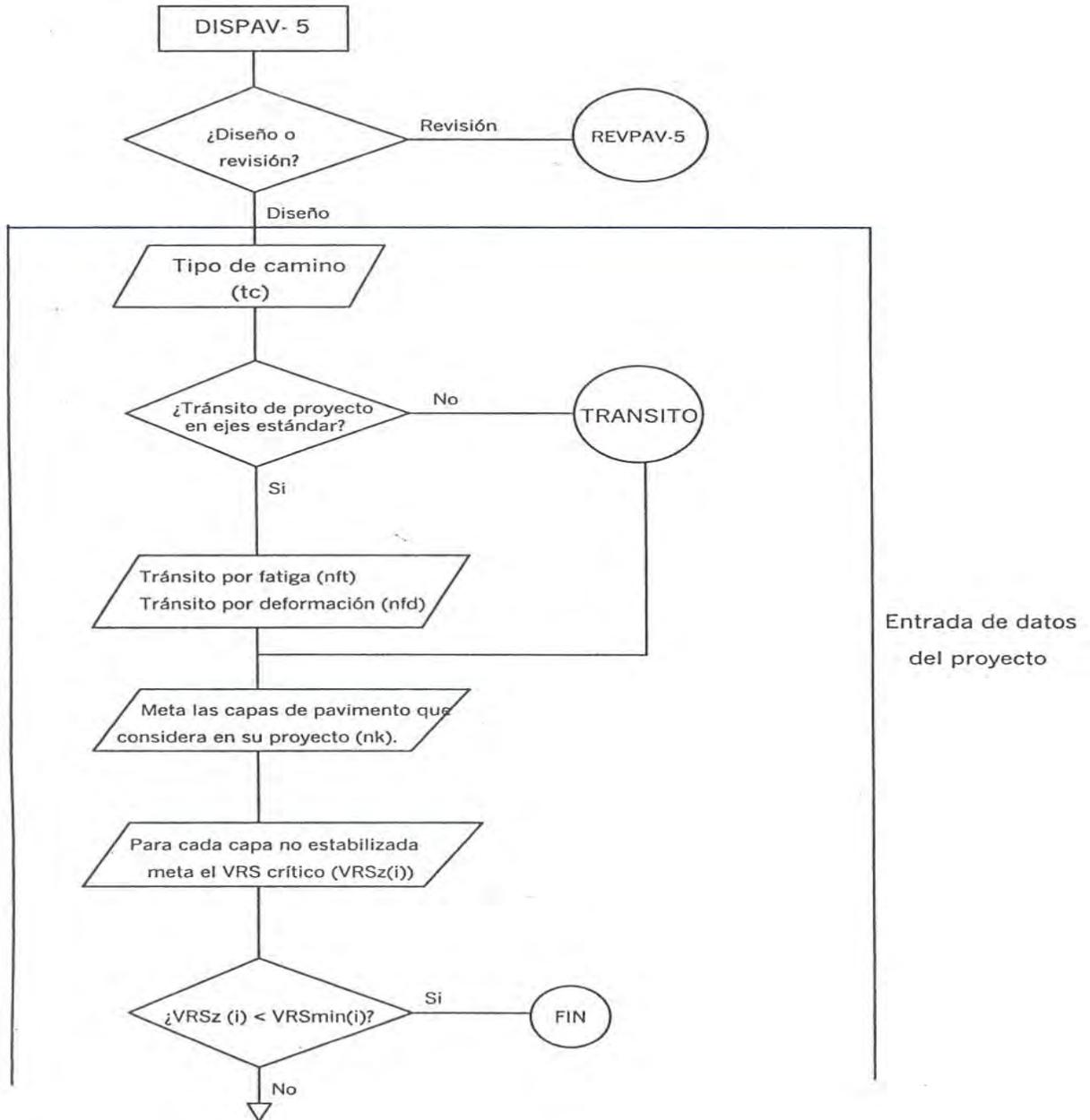


Figura D.1 Primera parte del diagrama de flujo del programa de diseño

AUTOPISTA: MÉXICO- QUERÉTARO  
TRAMO: TEPOZOTLÁN- PALMILLAS, KM 90+000-148+000  
SUBTRAMO: POLOTITLÁN- PALMILLAS

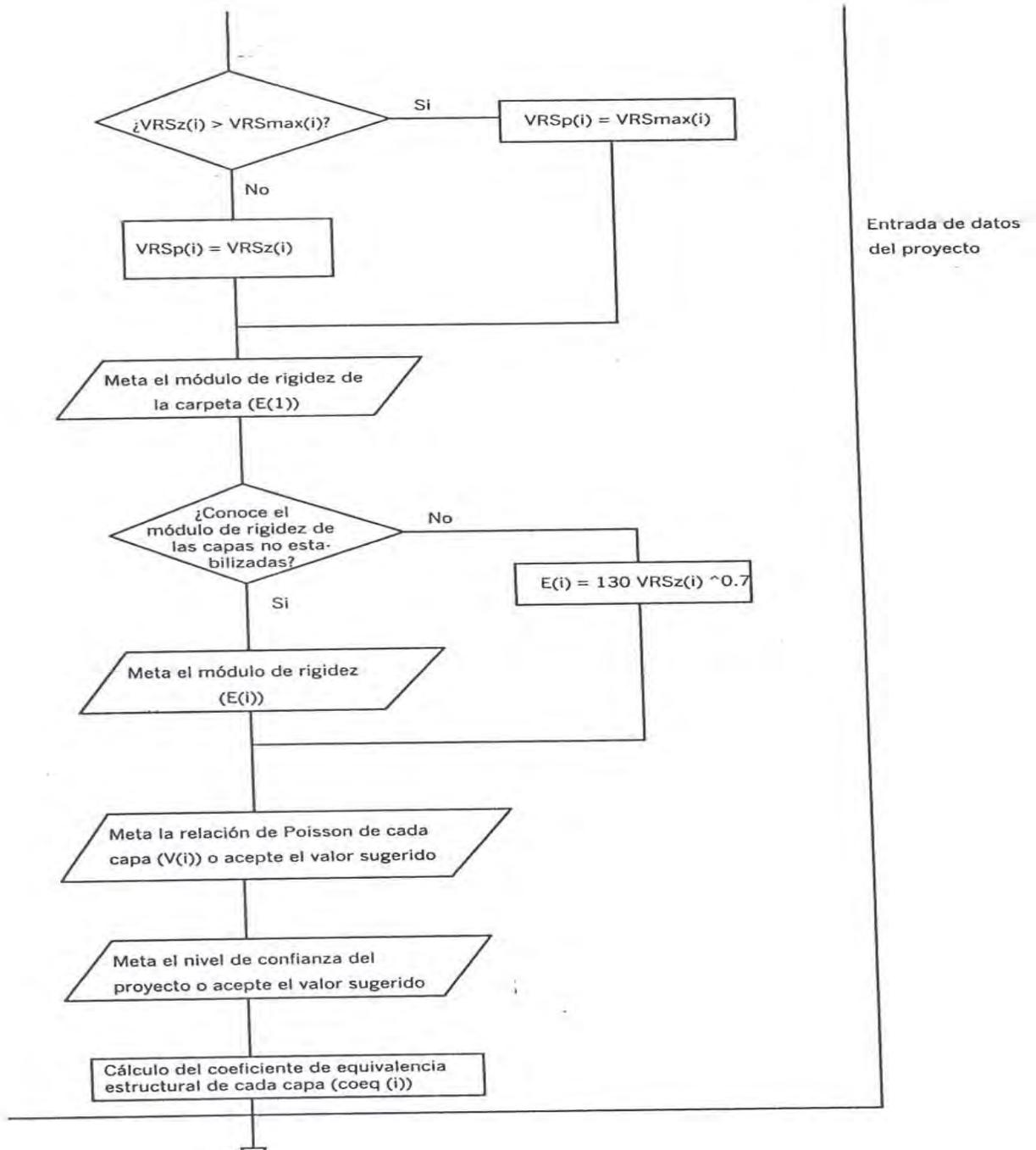


Figura D.1 Segunda parte del diagrama de flujo del programa de diseño

AUTOPISTA: MÉXICO- QUERÉTARO  
 TRAMO: TEPOZOTLÁN- PALMILLAS, KM 90+000-148+000  
 SUBTRAMO: POLOTITLÁN- PALMILLAS

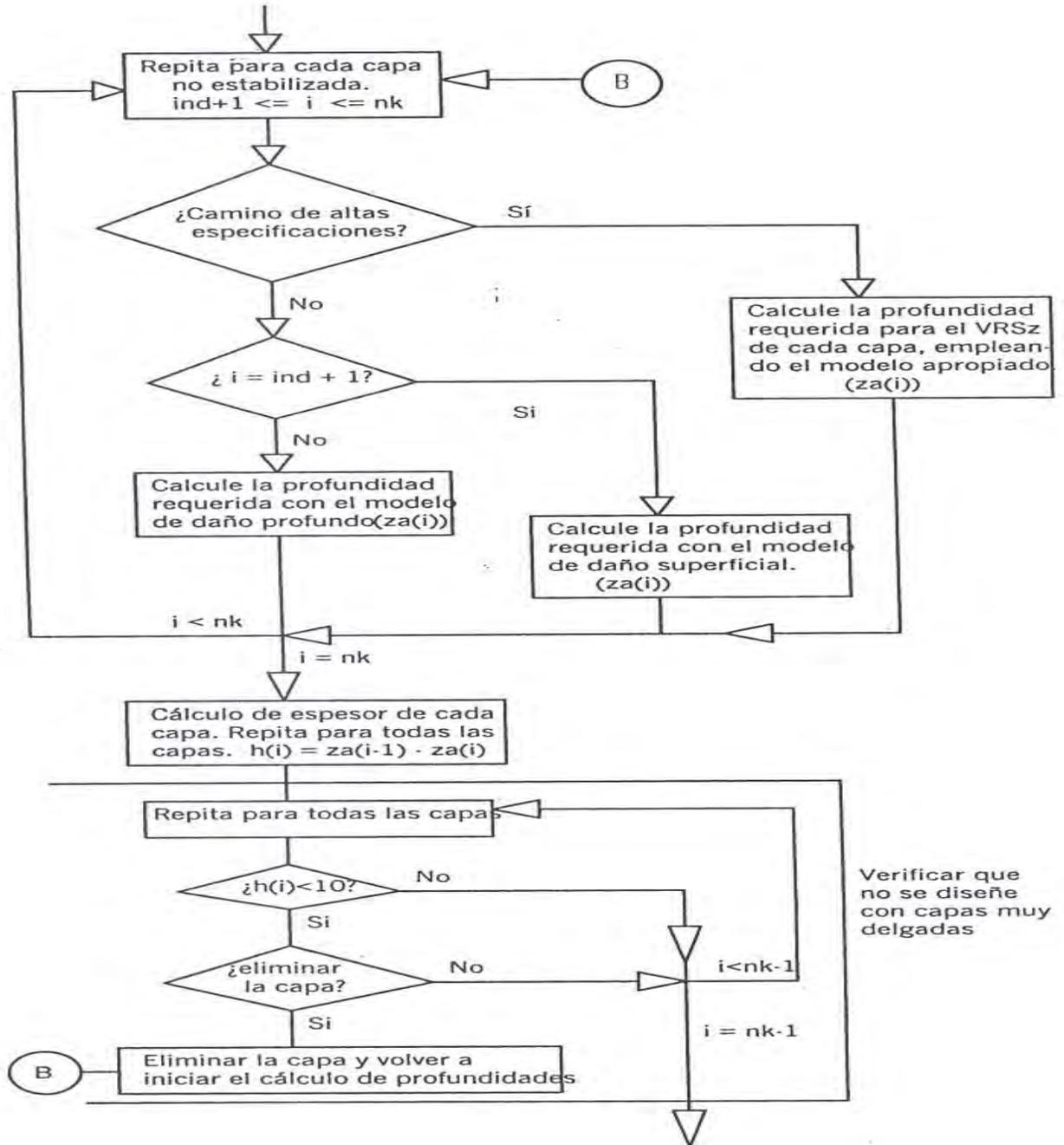


Figura D.1 Tercera parte del diagrama de flujo del programa de diseño

AUTOPISTA: MÉXICO- QUERÉTARO  
 TRAMO: TEPOZOTLÁN- PALMILLAS, KM 90+000-148+000  
 SUBTRAMO: POLOTITLÁN- PALMILLAS

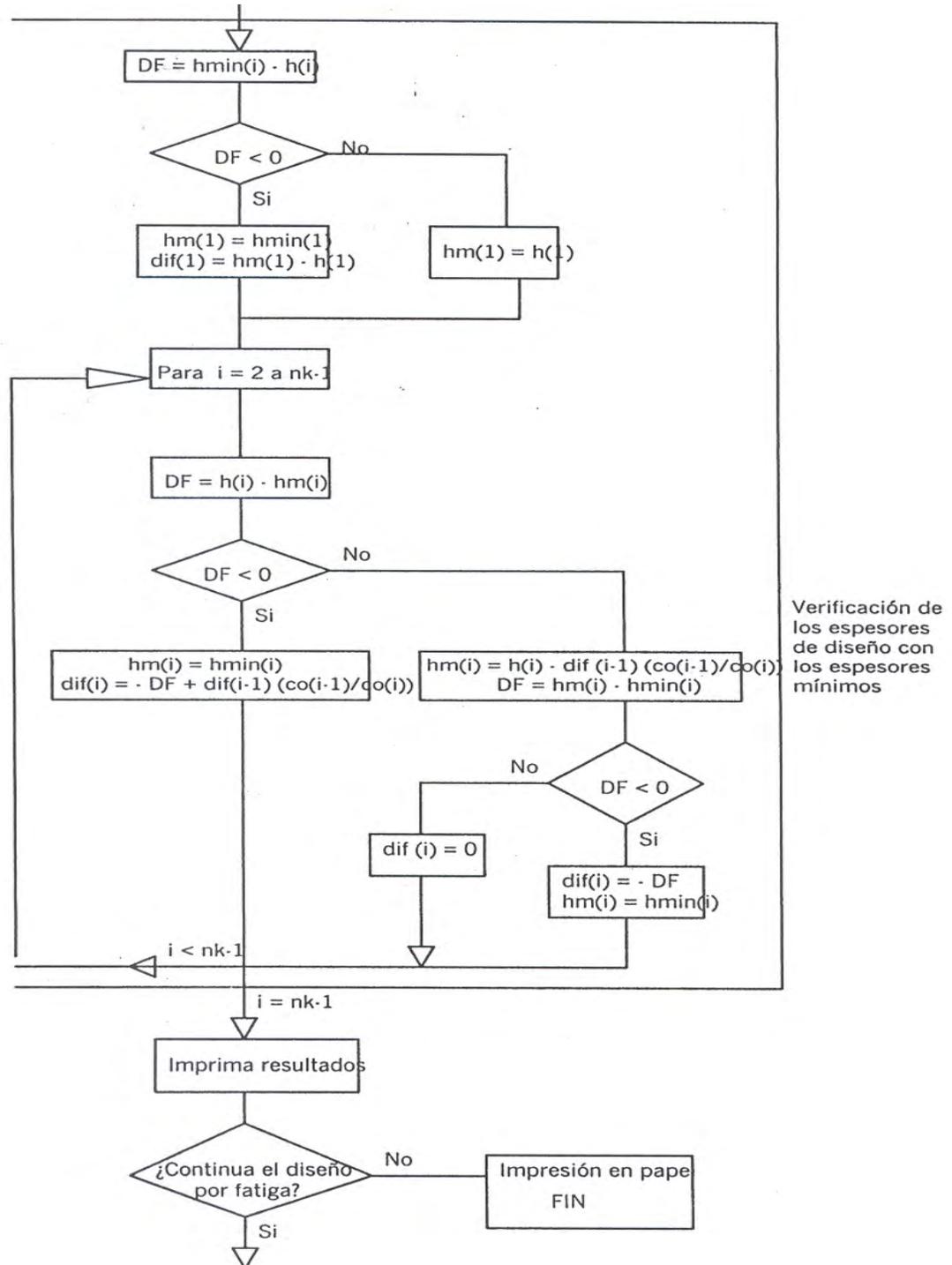


Figura D.1 Cuarta parte del diagrama de flujo del programa de diseño

AUTOPISTA: MÉXICO- QUERÉTARO  
TRAMO: TEPOZOTLÁN- PALMILLAS, KM 90+000-148+000  
SUBTRAMO: POLOTITLÁN- PALMILLAS

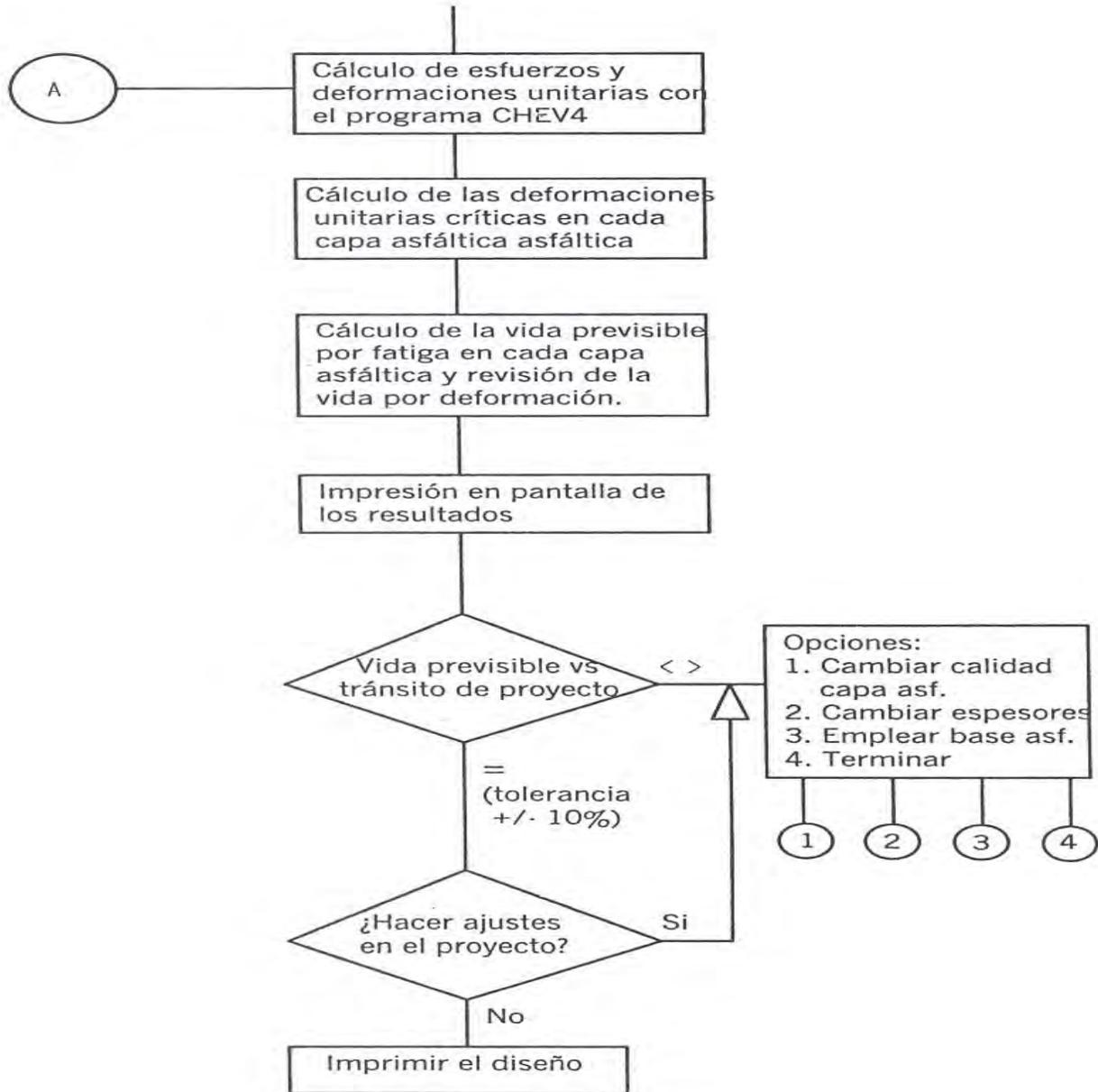


Figura D.1 Quinta parte del diagrama de flujo del programa de diseño

AUTOPISTA: MÉXICO- QUERÉTARO  
TRAMO: TEPOZOTLÁN- PALMILLAS, KM 90+000-148+000  
SUBTRAMO: POLOTITLÁN- PALMILLAS

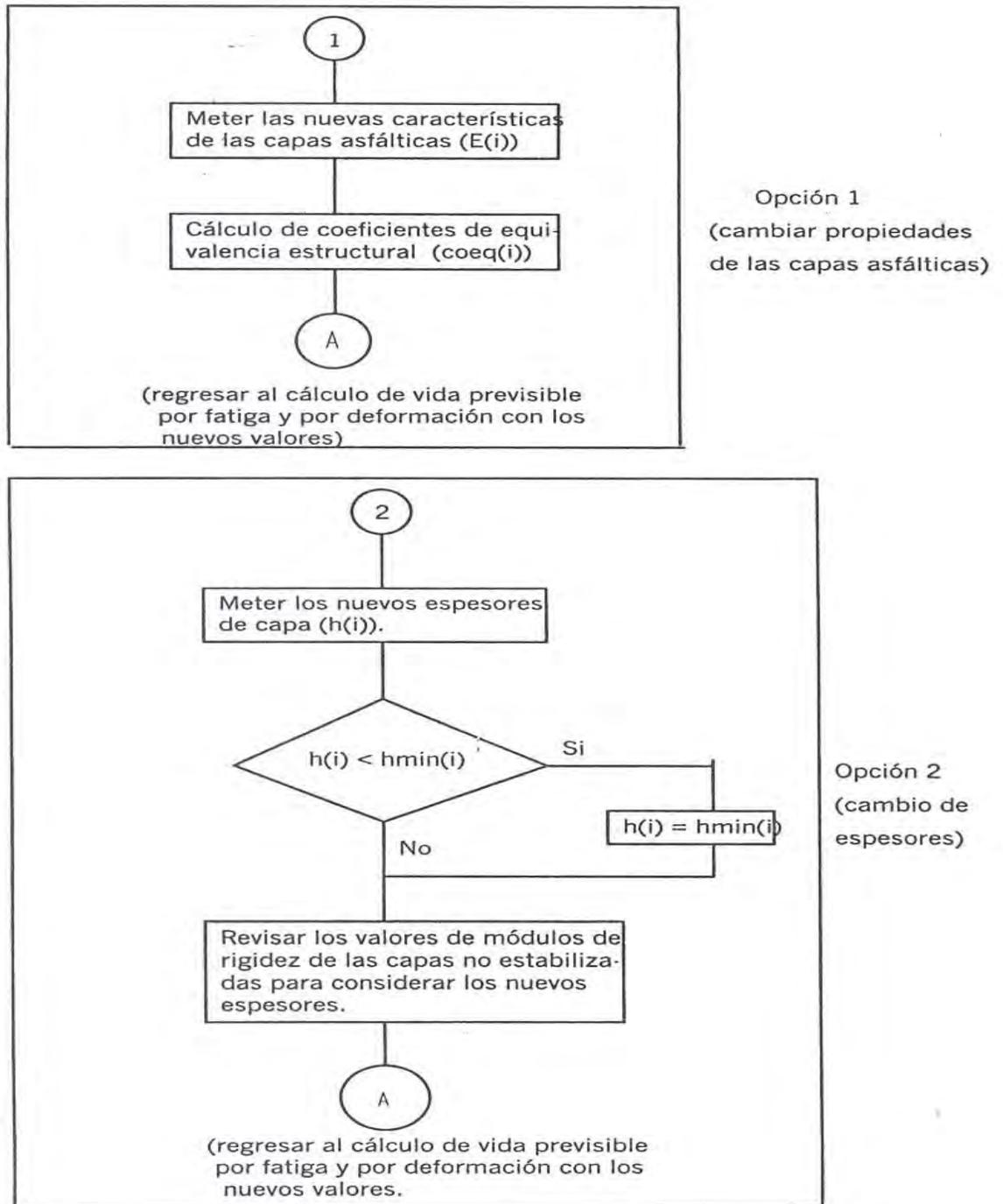


Figura D.1 Sexta parte del diagrama de flujo del programa de diseño.

AUTOPISTA: MÉXICO- QUERÉTARO  
TRAMO: TEPOZOTLÁN- PALMILLAS, KM 90+000-148+000  
SUBTRAMO: POLOTITLÁN- PALMILLAS

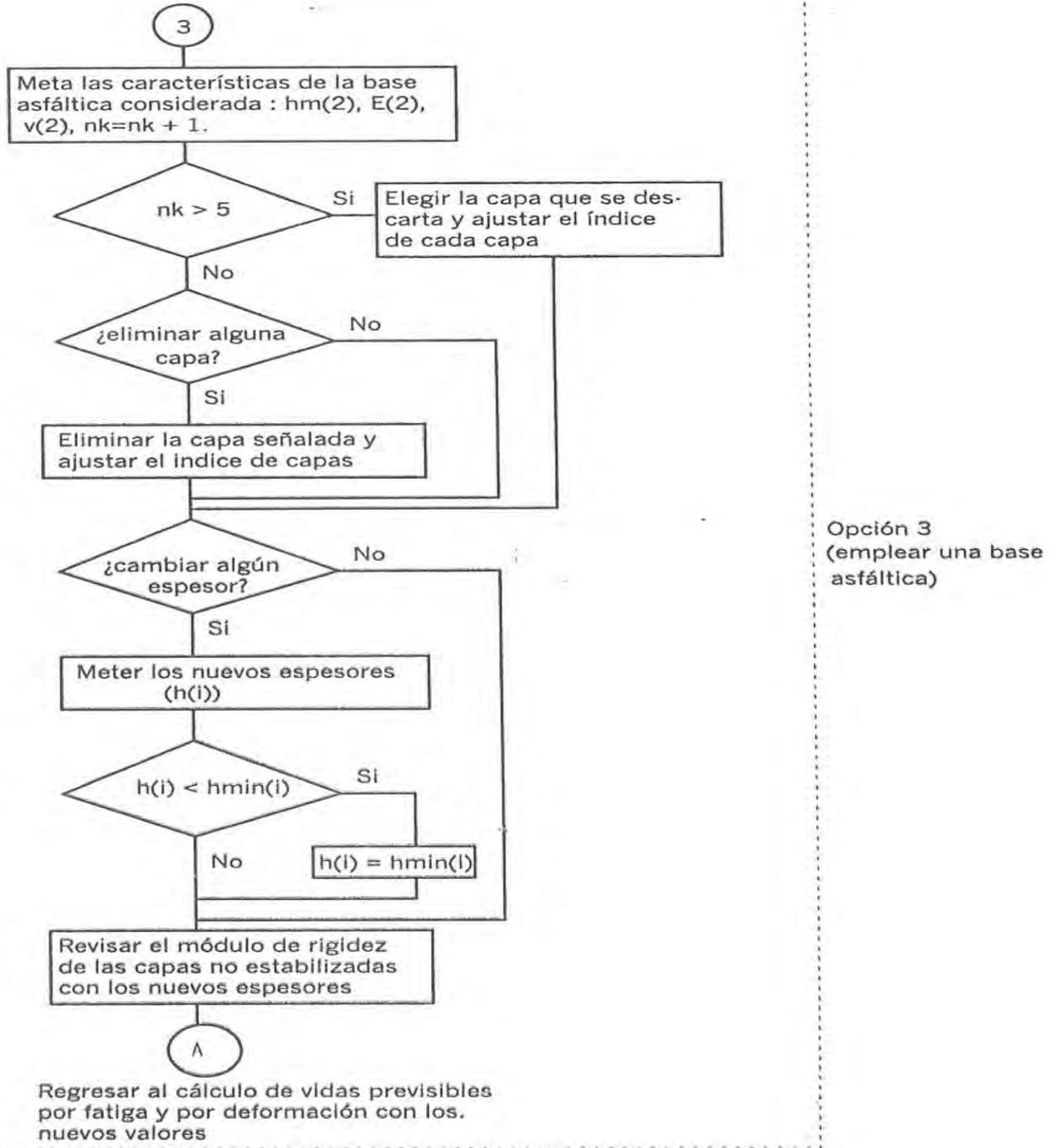


Figura D.1 Séptima parte del diagrama de flujo del programa de diseño.

AUTOPISTA: MÉXICO- QUERÉTARO  
 TRAMO: TEPOZOTLÁN- PALMILLAS, KM 90+000-148+000  
 SUBTRAMO: POLOTITLÁN- PALMILLAS

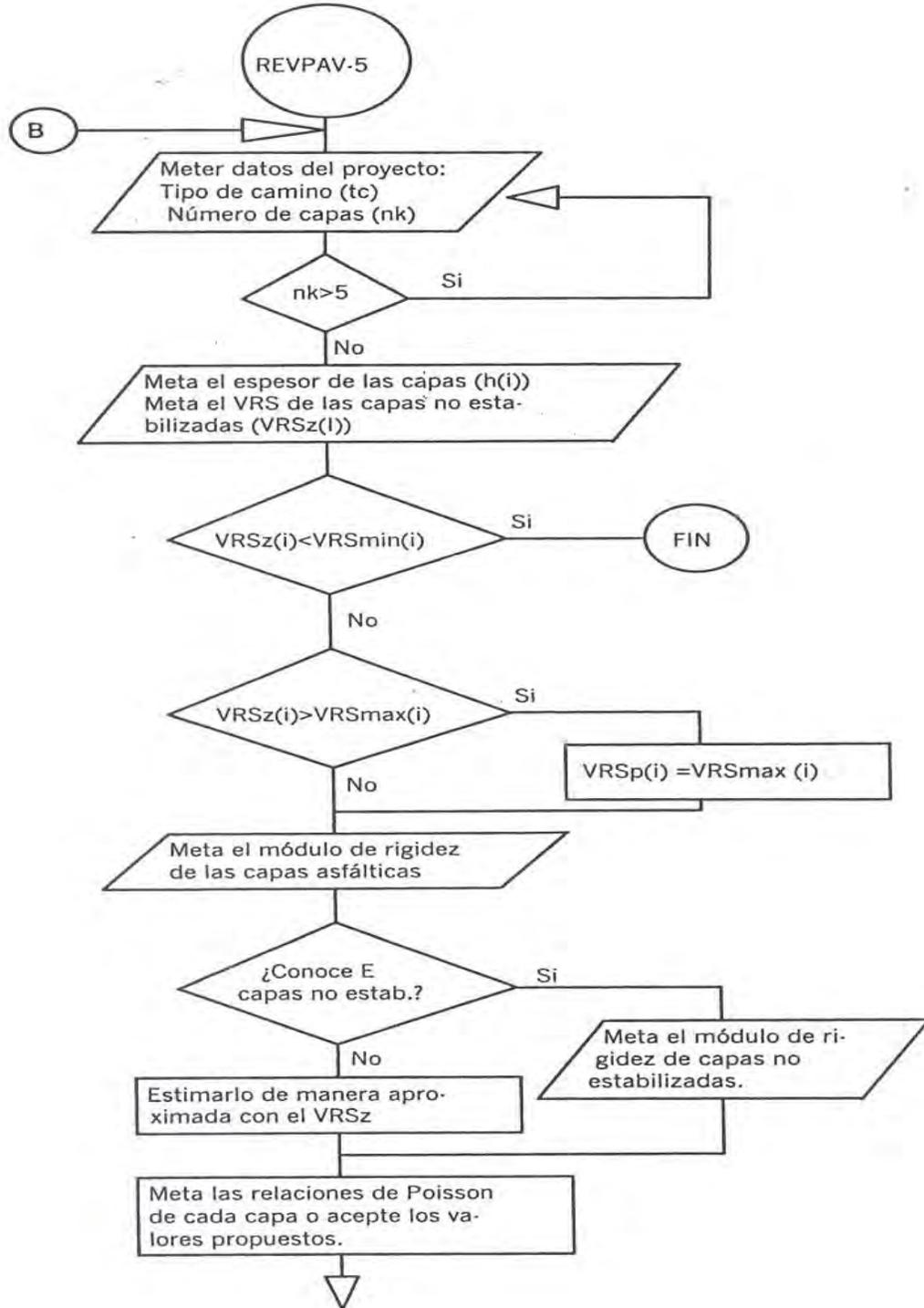


Figura D.2 Primera parte del diagrama de flujo del subprograma para revisión de pavimentos.

AUTOPISTA: MÉXICO- QUERÉTARO  
TRAMO: TEPOZOTLÁN- PALMILLAS, KM 90+000-148+000  
SUBTRAMO: POLOTITLÁN- PALMILLAS

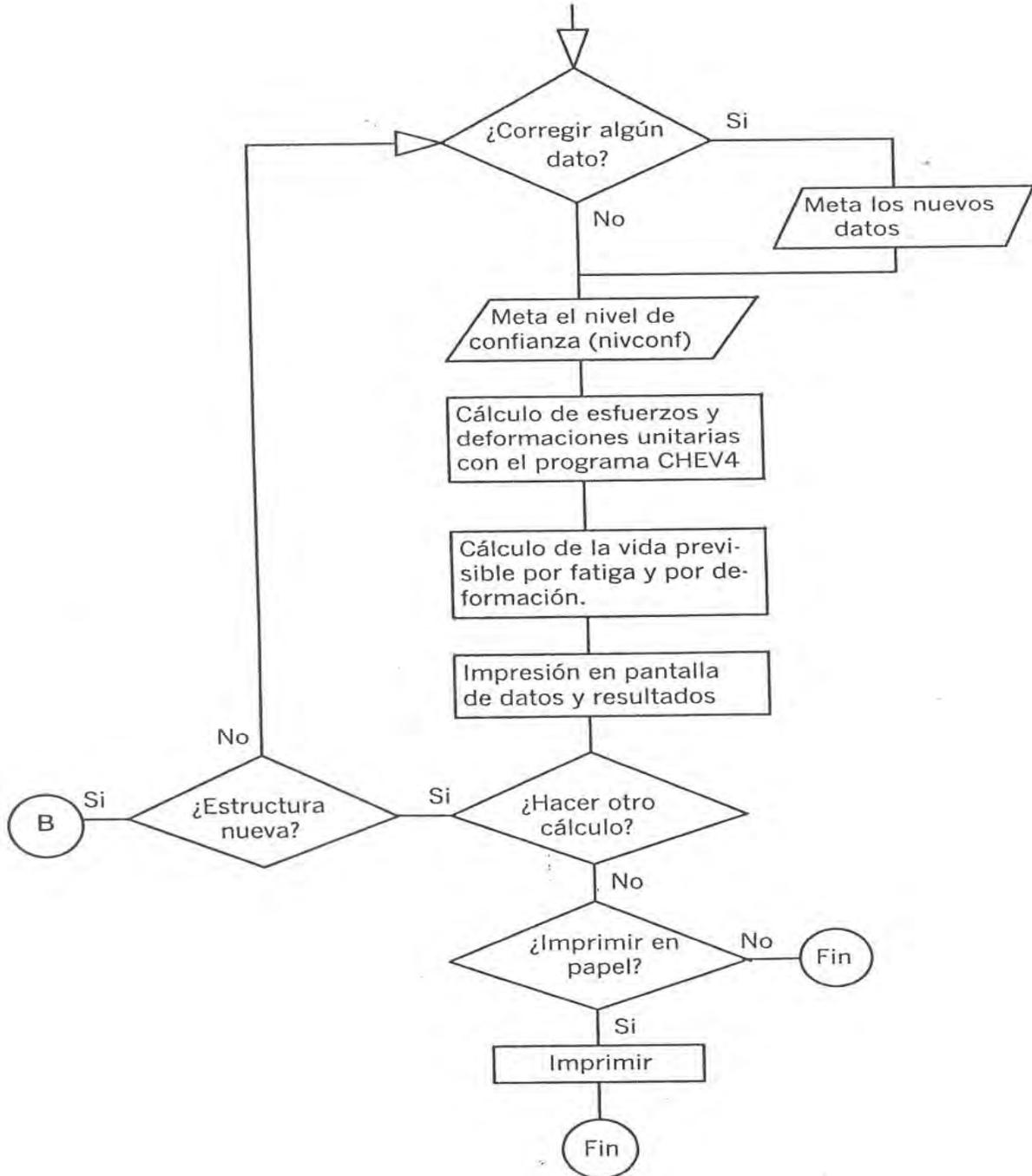


Figura D.2 Segunda parte del diagrama de flujo del subprograma para revisión de pavimento

**AUTOPISTA: MÉXICO- QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN- PALMILLAS, KM 90+000- 148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTTILÁN- PALMILLAS**

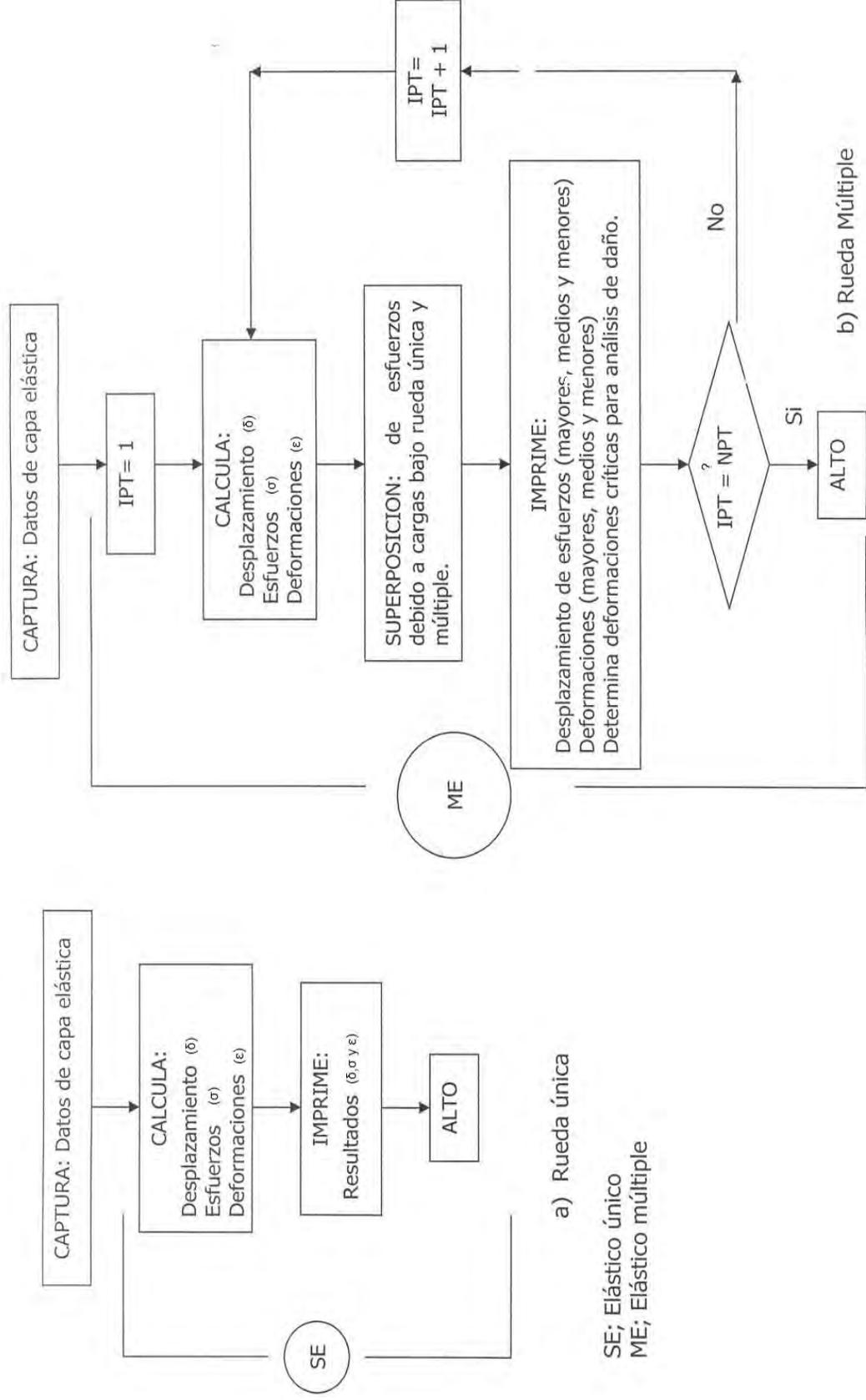


Figura D.3 Diagrama de flujo del sistema elástico lineal.

**AUTOPISTA: MÉXICO- QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN- PALMILLAS, KM 90+000-148+000,**  
**SUBTRAMO: POLOTTILÁN- PALMILLAS**

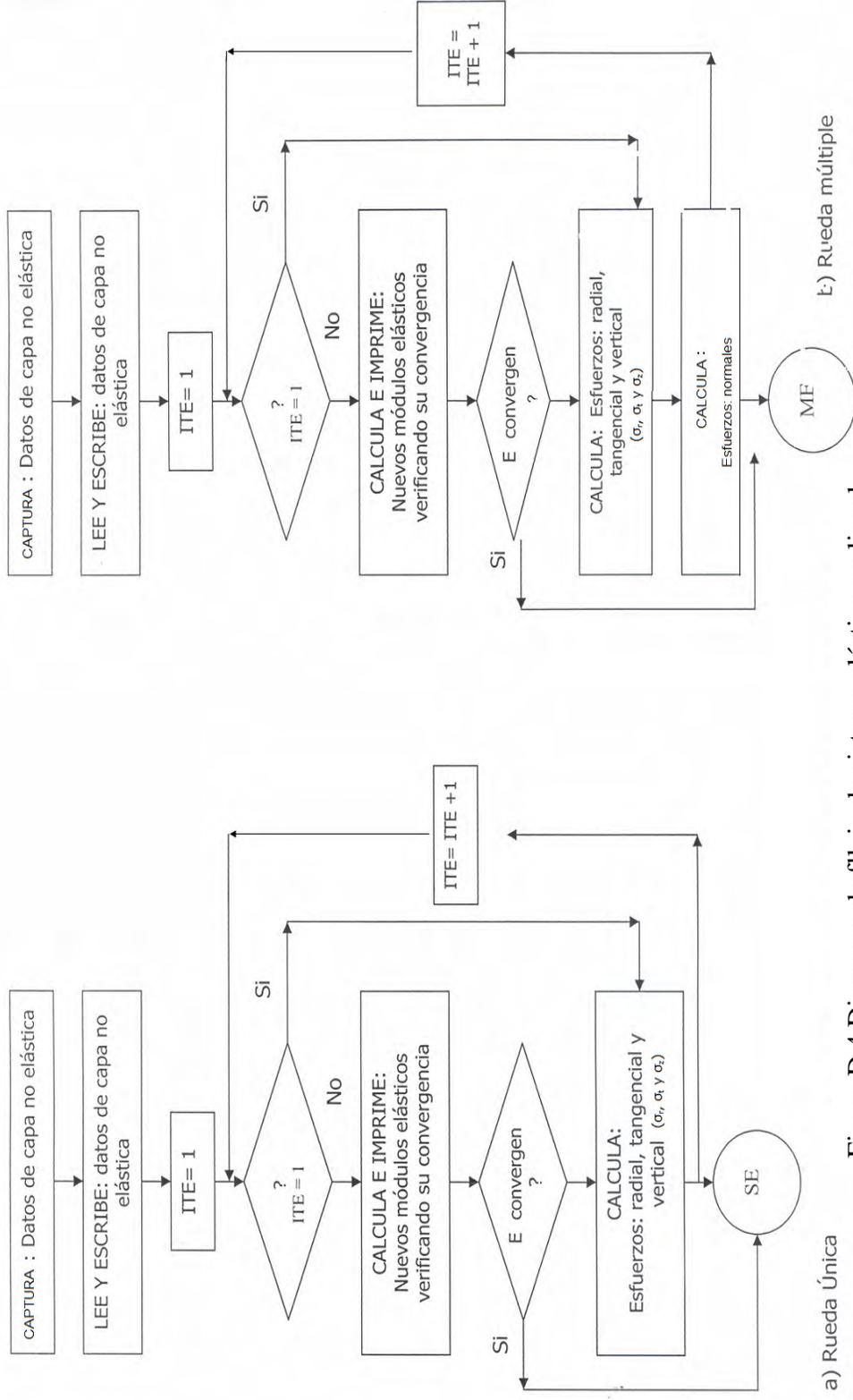
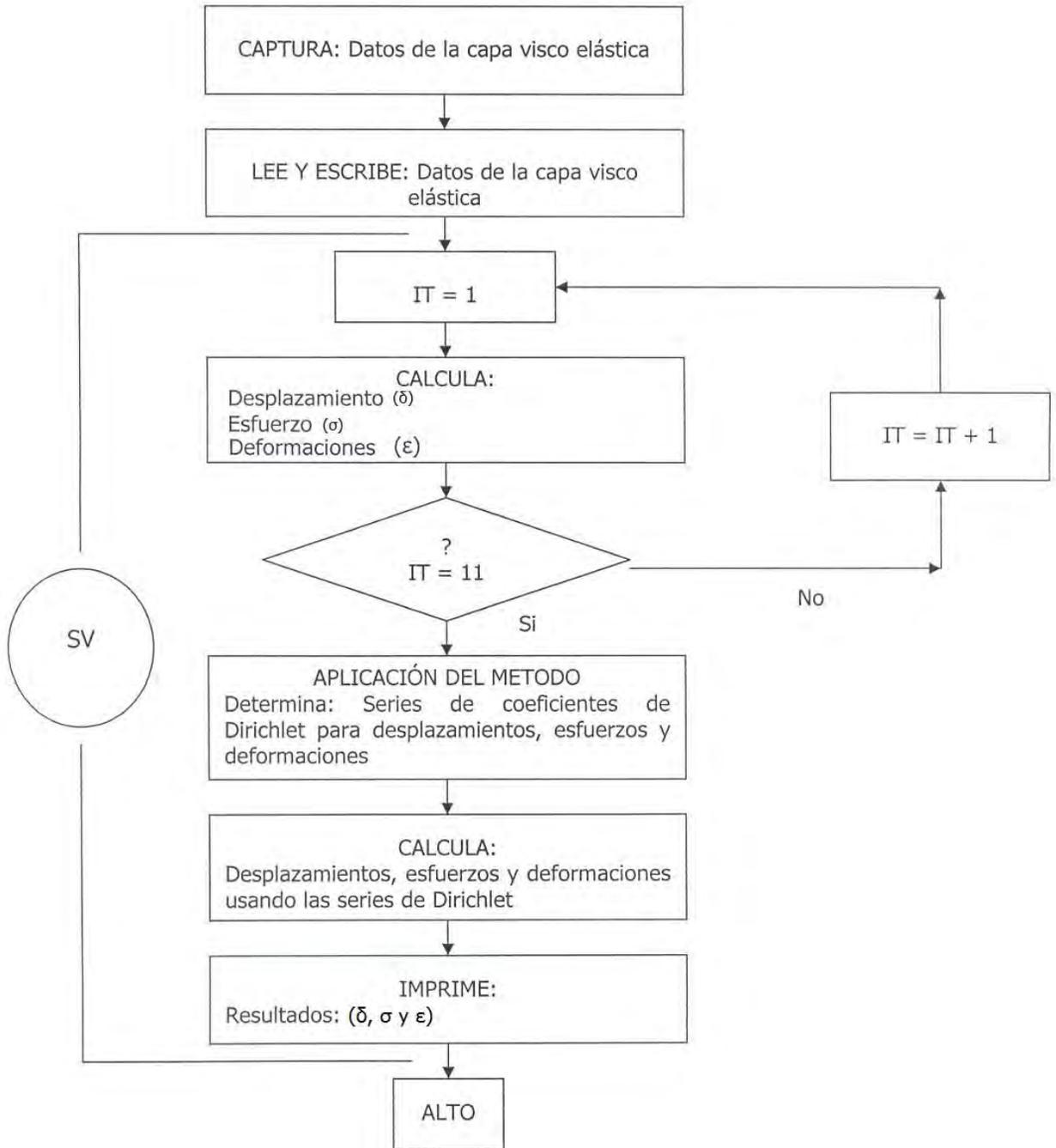


Figura D.4 Diagrama de flujo de sistema elástico no lineal

**AUTOPISTA: MÉXICO- QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN- PALMILLAS, KM 90+000-148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN- PALMILLAS**



SV; Visco elástico único

a) Rueda única

Figura D.5 Diagrama de flujo del sistema visco elástico

**AUTOPISTA: MÉXICO- QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN- PALMILLAS, KM 90+000-148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN- PALMILLAS**

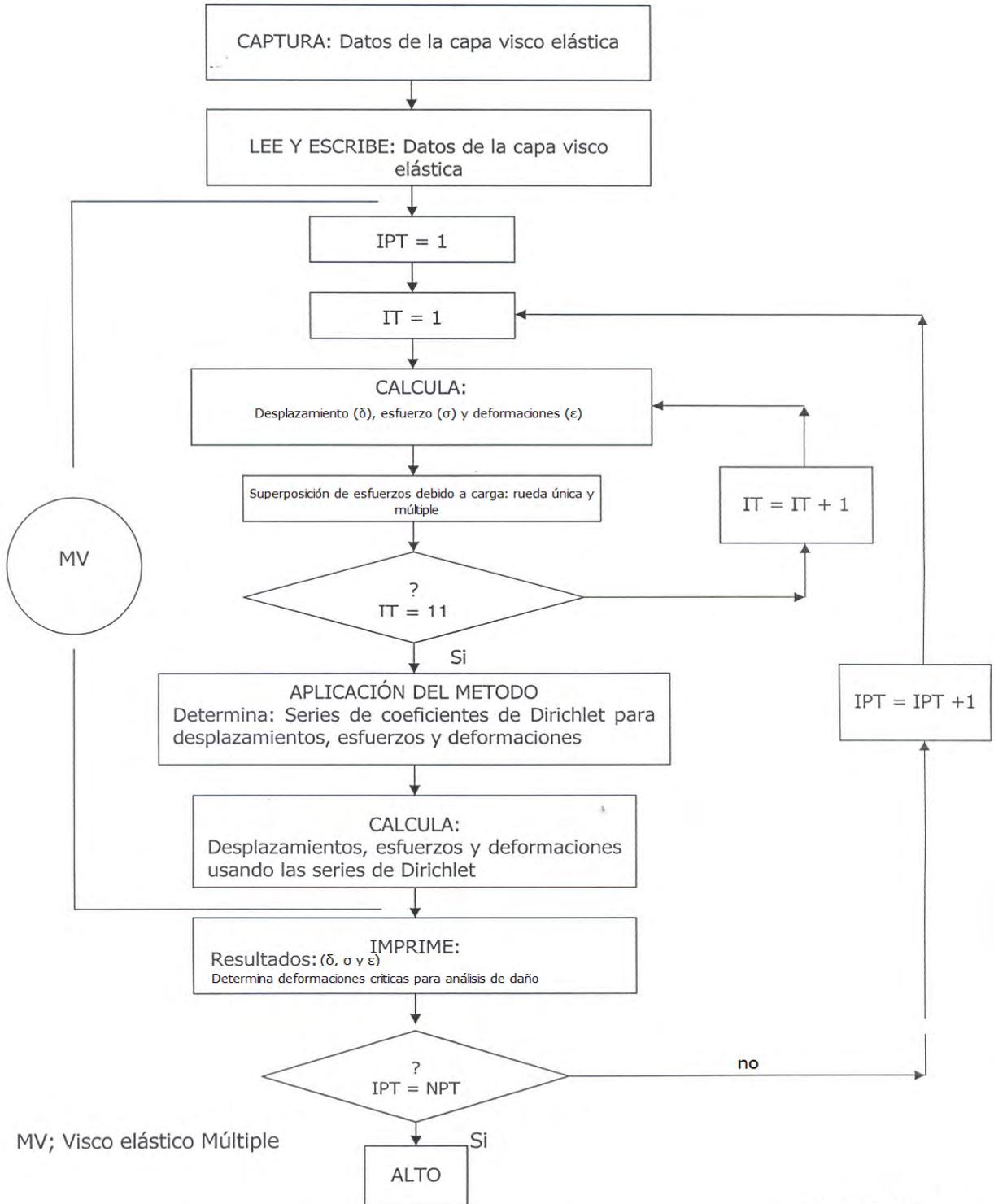
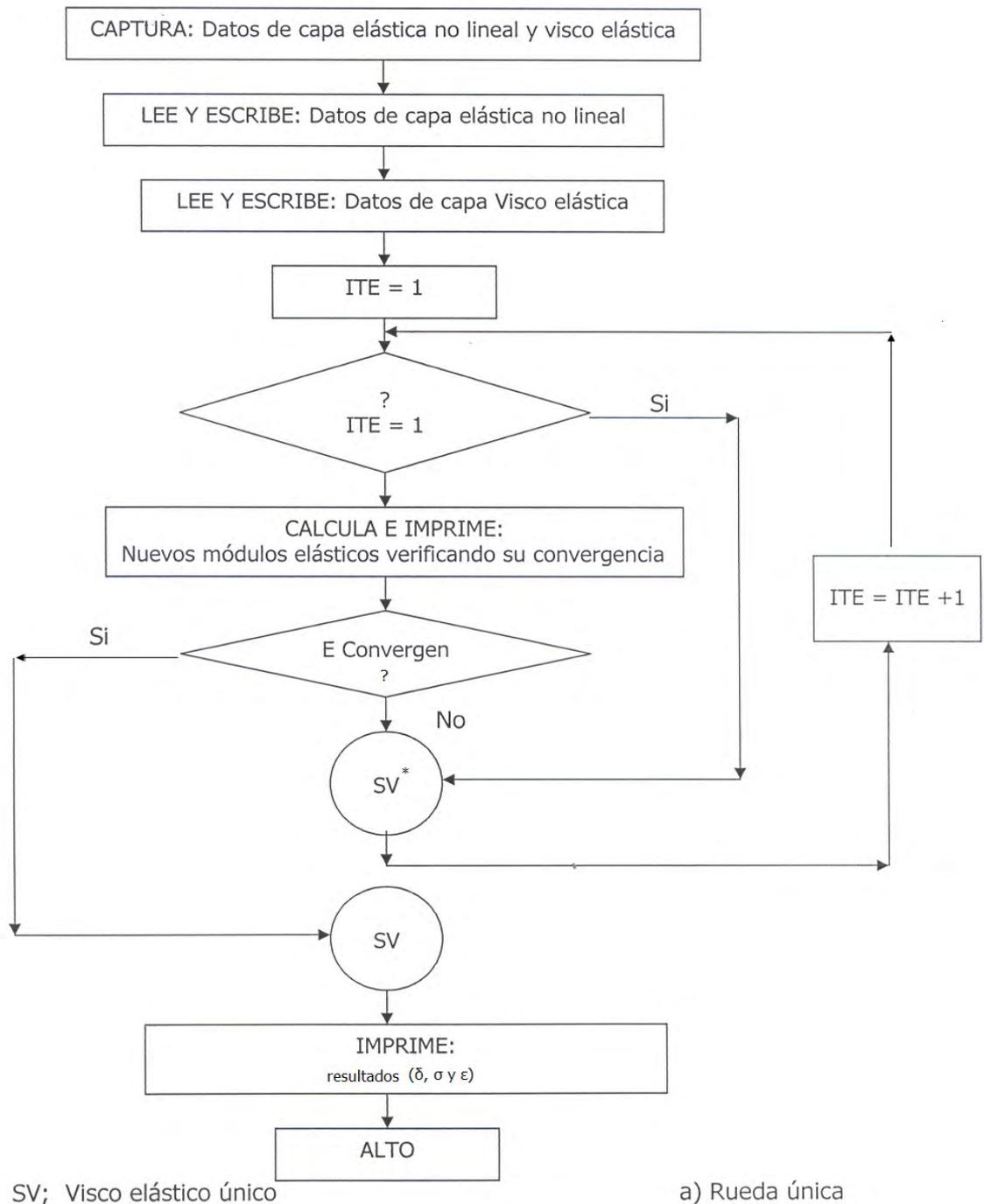


Figura D.5 Diagrama de flujo del sistema visco elástico.

b) Rueda única

TRAMO: TEPOZOTLÁN- PALMILLAS, KM 90+000-148+000  
 SUBTRAMO: POLOTITLÁN- PALMILLAS



Nota.- SV\*, Mv\* el cálculo de desplazamientos, esfuerzos y deformaciones se realizan con un cálculo no lineal y la superposición de esfuerzos debido a rueda única y múltiple, será reemplazado por el cálculo de esfuerzos superpuestos para capas no lineales.

**Figura D.6** Diagrama de flujo para el sistema elástico no lineal y visco elástico

AUTOPISTA: MÉXICO- QUERÉTARO

TRAMO: TEPOZOTLÁN- PALMILLAS, KM 90+000-148+000  
 SUBTRAMO: POLOTITLÁN- PALMILLAS

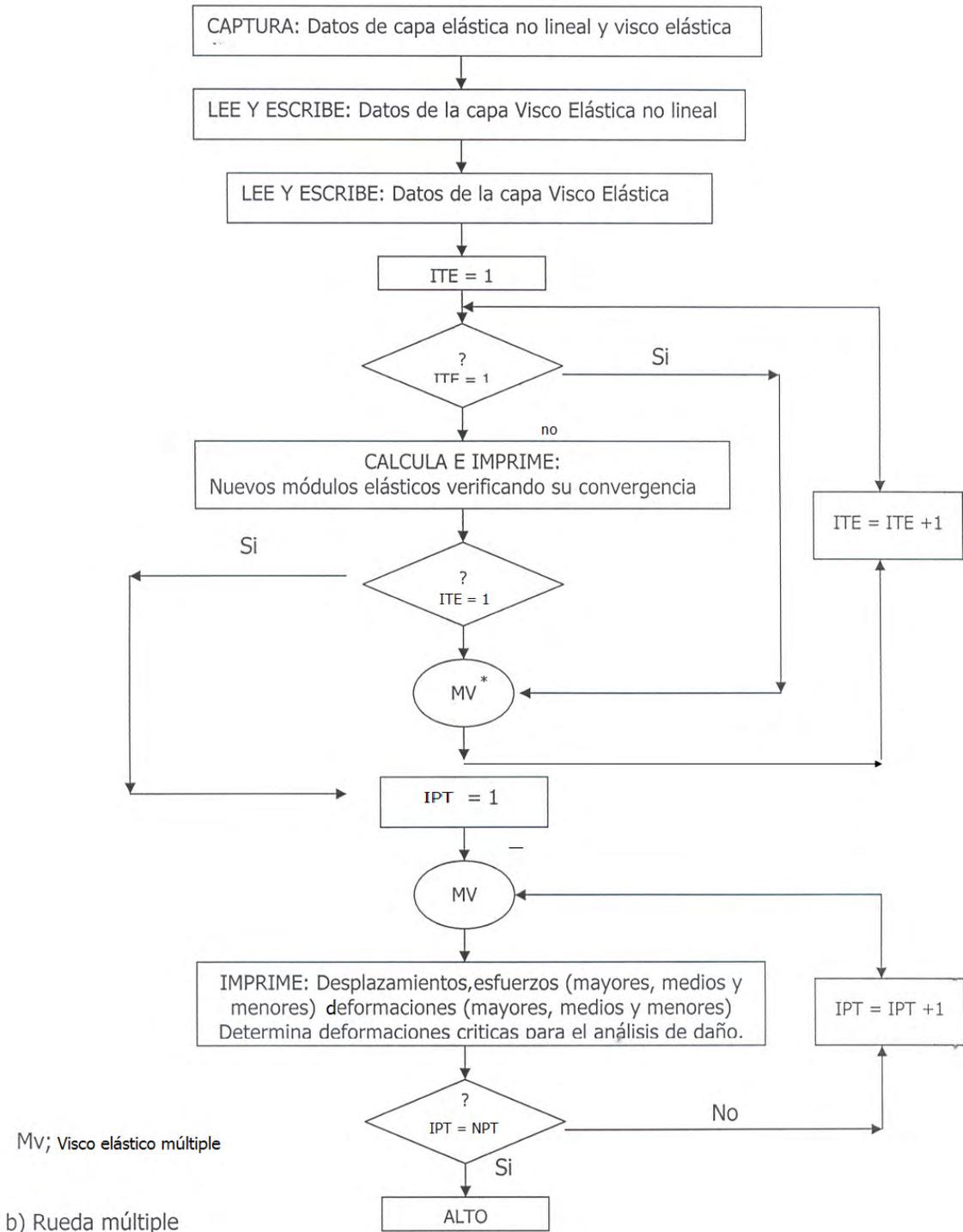


Figura D.6 Diagrama de flujo para el sistema elástico no lineal y visco elástico.

AUTOPISTA: MÉXICO- QUERÉTARO  
TRAMO: TEPOZOTLÁN- PALMILLAS, KM 90+000-148+000  
SUBTRAMO: POLOTITLÁN- PALMILLAS

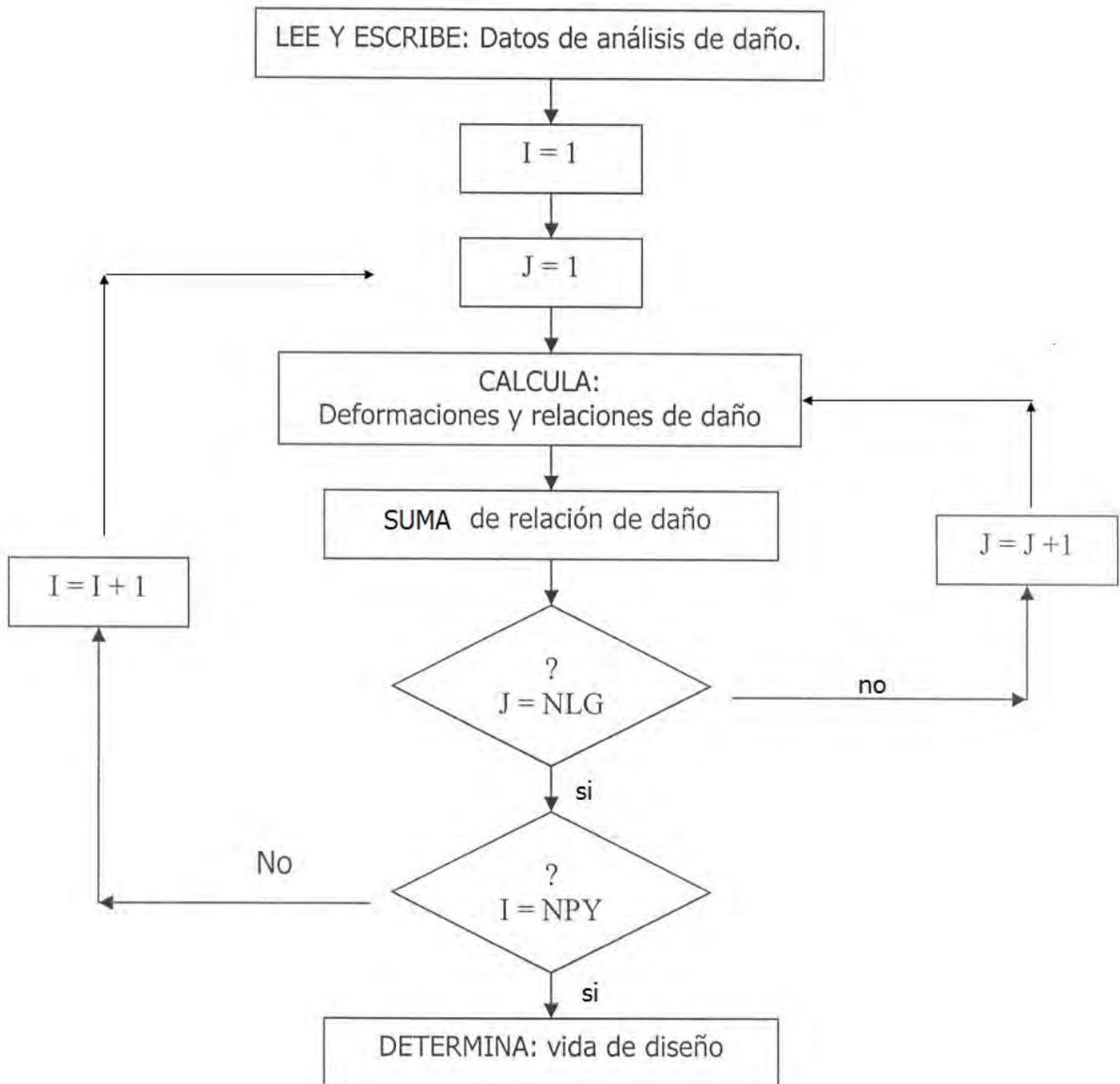


Figura D.7 Diagrama de flujo para el análisis de daño

**AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTTILÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

**TABLA E.1 VOLÚMENES DE OBRA: subtramo km 133+000 al 148+000**

**ALTERNATIVA A**

**TRABAJOS DE REHABILITACIÓN**

<b>Cuerpo</b>	<b>Retiro de material de carpeta (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Fresado de carpeta y base (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Grava de banco (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Riego de liga (lts)</b>	<b>Base asfáltica (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Carpeta asfáltica (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Micro carpeta 2 cm (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Cemento asfáltico (kg)</b>	<b>Polímero tipo I (kg)</b>
A	24 930.00	62 325.00	19 944.00	490 809.12	58 170.00	20 775.00	4 155.00	9 074 644.80	81 023.21
B	29 916.00	68 557.50	19 944.00	490 809.12	58 170.00	20 775.00	4 155.00	9 074 644.80	81 023.21
<b>TOTAL</b>	<b>54 846.00</b>	<b>130 882.50</b>	<b>39 888.00</b>	<b>981 618.24</b>	<b>116 340.00</b>	<b>41 550.00</b>	<b>8 310.00</b>	<b>18 149 289.60</b>	<b>162 046.42</b>

**AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

**TABLA E.2 COSTO DE OBRA: ALTERNATIVA A**

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P/U	IMPORTE
1. Fresado de la carpeta y base hidráulica en un espesor de 30 y 33 cm en los cuerpos A y B; incluye retiro de material a 5 km.	m <sup>3</sup>	130 882.50	106.25	13 906 265.63
2. Compactación de la superficie descubierta de la sub-base al 100% de su peso volumétrico seco máximo (P.V.S.M.) en un espesor de 20 cm.	m <sup>3</sup>	83 100.00	85.80	7 129 980.00
3. Riesgo de liga con emulsión asfáltica de rompimiento rápido (EAR – 60) a razón de 0.5 L/m <sup>2</sup>	L	981 618.24	2.66	2 611 104.52
4. Grava de material de banco de 1 ½” a la malla No. 4 que se incorpora al material fresado de la capa de base hidráulica (40% aproximadamente)	m <sup>3</sup>	39 888.00	180.00	7 179 840.00
5. Construcción de la base estabilizada con material recuperado y grava de banco de 1 ½” a la malla No. 4 con emulsión asfáltica para formar una capa de 28 cm de espesor compacto, la emulsión será de rompimiento medio (EAM - 60) a razón de 95 L/m <sup>3</sup> con respecto al P.V.S.M..	m <sup>3</sup>	116 340.00	399.00	46 419 660.00
6. Suministro de cemento asfáltico tipo AC – 10	kg	18 149 289.60	2.76	50 092 039.30
7. Polímero de tipo I (aditivo modificador SBS) dosificado en un 2.5% con respecto al peso de cemento asfáltico.	kg	162 046.42	32.00	5 185 485.44
8. Construcción de la carpeta de concreto asfáltico de 10 cm. de espesor compactos elaborada en caliente con material de tamaño máximo de agregado de 19 mm con cemento asfáltico AC- 10 y aditivo modificador SBS	m <sup>3</sup>	41 550.00	650.00	27 007 500.00
9. Construcción de micro carpeta con polímero en caliente de 2 cm de espesor con tamaño máximo de 3/8” del agregado y cemento asfáltico AC – 10	m <sup>3</sup>	8 310.00	572.74	4 759 469.40

**TOTAL \$ 164 291 344.30**

**COSTO POR KILÓMETRO \$ 10 952 756.29**

**AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

**TABLA E.3 VOLÚMENES DE OBRA: subtramo km 133+000 al 148+000**

**ALTERNATIVA B**

**TRABAJOS DE REHABILITACIÓN**

<b>Cuerpo</b>	<b>Retiro de material de carpeta y base (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Fresado de carpeta y base (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Grava de banco (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Riego de liga (lts)</b>	<b>Base asfáltica (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Carpeta asfáltica (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Micro carpeta 2 cm (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Cemento asfáltico (kg)</b>	<b>Polímero tipo I (kg)</b>
A	34 902.00	62 325.00	19 944.00	490 809.12	49 860.00	20 775.00	4 155.00	27 223 933.80	175 550.29
B	39 888.00	68 557.50	19 944.00	490 809.12	49 860.00	20 775.00	4 155.00	27 223 933.80	175 550.29
<b>TOTAL</b>	<b>74 790.00</b>	<b>130 882.50</b>	<b>39 888.00</b>	<b>981 618.24</b>	<b>99 720.00</b>	<b>41 550.00</b>	<b>8 310.00</b>	<b>54 447 867.60</b>	<b>351 100.58</b>

**AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTTILÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

**TABLA E.4 COSTO DE OBRA: ALTERNATIVA B**

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P/U	IMPORTE
1. Fresado de la carpeta y base hidráulica en un espesor de 30 y 33 cm en los cuerpos A y B; incluye retiro de material a 5 km.	m <sup>3</sup>	130 882.50	106.25	13 906 265.63
2. Compactación de la superficie descubierta de la sub-base al 100% de su peso volumétrico seco máximo (P. V.S.M.) en un espesor de 20 cm.	m <sup>3</sup>	83 100.00	85.80	7 129 980.00
3. Riesgo de liga con emulsión asfáltica de rompimiento rápido (EAR – 60) a razón de 0.5 L/m <sup>2</sup>	L	981 618.24	2.66	2 611 104.52
4. Grava de material de banco de 1 ½” a la malla No. 4 que se incorpora al material fresado de la capa de base hidráulica (40% aproximadamente)	m <sup>3</sup>	39 888.00	180.00	7 179 840.00
5. Construcción de la base estabilizada con material recuperado y grava de banco de 1 ½” a la malla No. 4 con cemento asfáltico AC-10 en caliente para formar una capa de 24 cm de espesor compacto y aditivo modificador SBS.	m <sup>3</sup>	99 720.00	591.11	58 945 489.20
6. Suministro de cemento asfáltico tipo AC – 10	kg	54 447 867.60	2.76	150 276 114.60
7. Polímero de tipo I (aditivo modificador SBS) dosificado en un 2.5% con respecto al peso de cemento asfáltico.	kg	351 100.58	32.00	11 235 218.56
8. Construcción de la carpeta de concreto asfáltico de 10 cm de espesor compactos elaborada en caliente con material de tamaño máximo de agregado de 19 mm con cemento asfáltico AC- 10 y aditivo modificador SBS para obtener un módulo elástico de 35 000 kg/cm <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	41 550.00	911.50	37 872 825.00
9. Construcción de micro carpeta con polímero en caliente de 2 cm de espesor con tamaño máximo de 3/8” del agregado y cemento asfáltico AC – 10	m <sup>3</sup>	8 310.00	572.74	4 759 469.40

**TOTAL \$ 293 916 306.90**

**COSTO POR KILÓMETRO \$ 19 594 420.46**

**AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

**TABLA E.5 VOLÚMENES DE OBRA: subtramo km 133+000 al 148+000**

**ALTERNATIVA C**

**TRABAJOS DE REHABILITACIÓN**

<b>Cuerpo</b>	<b>Retiro de material de carpeta (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Fresado de carpeta y base (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Grava de banco (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Riego de liga (Its)</b>	<b>Base estabilizada con cemento Pórtland (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Carpeta asfáltica (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Micro carpeta 2 cm (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Cemento asfáltico (kg)</b>	<b>Polímero tipo I (kg)</b>
A	24 930.00	63 325.00	19 944.00	490 809.12	58 170.00	20 775.00	4 155.00	9 074 644.80	81 023.21
B	29 916.00	68 557.50	19 944.00	490 809.12	58 170.00	20 775.00	4155.00	9 074 644.80	81 023.21
<b>TOTAL</b>	<b>54 846.00</b>	<b>130 882.50</b>	<b>39 888.00</b>	<b>981 618.24</b>	<b>116 340.00</b>	<b>41 550.00</b>	<b>8 310.00</b>	<b>18 149 289.60</b>	<b>162 046.42</b>

Nota. Cantidad del cemento Pórtland: 36 065.00 toneladas  
 Cantidad de emulsión de rompimiento rápido para impregnación: 654 412.50 litros

**AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

**TABLA E.6 COSTO DE OBRA: ALTERNATIVA C**

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P/ U	IMPORTE
1. Fresado de la carpeta y base hidráulica en un espesor de 30 y 33 cm en los cuerpos A y B; incluye retiro de material a 5 km.	m <sup>3</sup>	130 882.50	106.25	13 906 265.63
2. Compactación de la superficie descubierta de la sub-base al 100% de su peso volumétrico seco máximo (P.V.S.M.) en un espesor de 20 cm.	m <sup>3</sup>	83 100.00	85.80	7 129 980.00
3. Riego de impregnación con emulsión asfáltica de rompimiento rápido (EAR – 60) a razón de 1.5 L/m <sup>2</sup>	L	654 412.50	2.66	1 740 737.25
4. Riego de liga con emulsión asfáltica de rompimiento rápido (EAR – 60) a razón de 0.5 L/m <sup>2</sup>	L	981 618.24	2.66	2 611 104.52
5. Grava de material de banco de 1 ½” a la malla No. 4 que se incorpora al material fresado de la capa de base hidráulica (40% aproximadamente)	m <sup>3</sup>	39 888.00	180.00	7 179 840.00
6. Construcción de la base estabilizada con material recuperado y grava de banco de 1 ½” a la malla No. 4 con cemento Pórtland para formar una capa de 28 cm de espesor compactos.	m <sup>3</sup>	116 340.00	143.29	16 670 358.60
7. Cemento Pórtland para mejoramiento de material fresado a razón del 18% con respecto al peso volumétrico seco máximo incluye: adquisición, acarreo y aplicación.	ton	36 065.00	1 570.00	56 622 050.00
8. Suministro de cemento asfáltico tipo AC – 10	kg	18 149 289.60	2.76	50 092 039.30
9. Polímero de tipo I (aditivo modificador SBS) dosificado en un 2.5% con respecto al peso de cemento asfáltico.	kg	162 046.42	32.00	5 185 485.44
10. Construcción de la carpeta de concreto asfáltico de 10 cm de espesor compactos elaborada en caliente con material de tamaño máximo de agregado de 19 mm con cemento asfáltico AC- 10 y aditivo modificador SBS	m <sup>3</sup>	41 550.00	650.00	27 007 500.00
11.- Construcción de micro carpeta con polímero en caliente de 2 cm de espesor con tamaño máximo de 3/8” del agregado y cemento asfáltico AC – 10	m <sup>3</sup>	8 310.00	572.74	4 759 469.40

**TOTAL \$ 192 904 830.10**  
**COSTO POR KILÓMETRO \$ 12 860 322.01**

AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO  
 TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000  
 SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000

TABLA E.7 PRECIOS BÁSICOS DE CONSTRUCCIÓN

CONCEPTO	PRECIO \$/M <sup>3</sup> , L Y T DE PAVIMENTO
Fresado de la estructura existente en un espesor de 30 a 33 cm.	106.25
Construcción de base estabilizada con emulsión asfáltica de rompimiento medio	399.00
Construcción de base estabilizada con cemento Pórtland	143.29
Riego de liga utilizando emulsión de rompimiento rápido	2.66
Grava de banco tamaño máximo de 1 ½” a la malla No. 4	180.00
Compactación de la superficie descubierta de la sub-base compactada al 100%	85.80
Suministro de cemento asfáltico tipo AC-10	2.76
Aditivo modificador SBS dosificado en un 2.5%	32.00
Cemento Pórtland para estabilización de material fresado y de banco	1 570.00
Riego de impregnación utilizando emulsión de rompimiento medio	2.66
Construcción de base asfáltica con cemento asfáltico AC-10	591.11
Construcción de micro carpeta asfáltica y aditivo modificador SBS	572.74
Construcción de carpeta asfáltica de 10 cm de espesor y polímetro	911.50
Reparación de baches	950.00
Riego de sello	345.58
Fresado y retiro de carpeta de 10 cm de espesor	106.25

**AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO**

**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**

**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

**TABLA E.8 PRECIOS BÁSICOS DE CONSERVACIÓN**

r= tasa de actualización 0.08

n= años

Año (n)	(1+r) <sup>n</sup>	Micro carpeta	Alternativa C		Bacheo	Base asfáltica	Carpeta asfáltica
			Micro carpeta	Bacheo			
1	1.08				3.11		
2	1.17			12.35	2.88		
3	1.26				2.67		
4	1.36			10.58	2.47		
5	1.47	389.34			2.29		
6	1.59			9.07	2.12		
7	1.71		720.63		1.96		
8	1.85			7.78	1.82		
9	2.00				1.68		
10	2.16			6.67	1.56	189.15	322.24
11	2.33				1.44		
12	2.52			5.72	1.33		
13	2.72				1.44		
14	2.94		420.48	4.90	1.14		
15	3.17	122.73			1.06		
16	3.43			4.20	0.98		
17	3.70				0.91		
18	4.00			3.60	0.84		
19	4.32				0.78		
20	4.66		241.35	3.09	0.72		
Σ		512.07	1,141.11	67.96	33.00	189.15	322.24

**AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

**TABLA E.9 COSTO DE CONSERVACIÓN ALTERNATIVA A**

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P/ U	IMPORTE
1. Realizar bacheo de caja de carpetas y base asfáltica con mezcla asfáltica de material de banco de 1" a la malla No. 4 y cemento asfáltico AC – 10, elaborada en caliente en un espesor de 30 cm.	m <sup>3</sup>	120.00	33.00	3 960.00
2. Aplicar nivelaciones en forma aislada con mezcla asfáltica en caliente con material de banco de 19 mm de tamaño máximo, cemento asfáltico AC – 10 y aditivo modificar SBS en un espesor de 10 cm.	m <sup>3</sup>	7.00	189.15	1324.05
3. Construcción de micro carpeta con polímero en caliente de 2 cm de espesor con tamaño máximo de 3/8" de agregado y cemento asfáltico AC – 10	m <sup>3</sup>	554.00	512.07	283 686.78
4. Construcción de la base estabilizada con material recuperado y grava de banco de 1 1/2" a la malla No. 4 con emulsión asfáltica para formar una capa de 28 cm de espesor compacto, la emulsión será de rompimiento medio (EAM - 60) a razón de 95 lts/m <sup>3</sup> con respecto al P.V.S.M.	m <sup>3</sup>	39 888.00	180.00	7 179 840.00
5. Construcción de la carpeta de concreto asfáltico de 5 cm. de espesor compactos elaborada en caliente con material de tamaño máximo de agregado de 19 mm con cemento asfáltico AC- 10 y aditivo modificador SBS	m <sup>3</sup>	1385.00	322.24	446 302.40
6. Construcción de micro carpeta con polímero en caliente de 2 cm de espesor con tamaño máximo de 3/8" de agregado y cemento asfáltico AC – 10	m <sup>3</sup>	554.00	398.34	215 694.36
<b>TOTAL</b>				<b>\$ 2 418 014.99</b>

**AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

**TABLA E.10 COSTO DE CONSERVACIÓN ALTERNATIVA B**

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P/ U	IMPORTE
1. Realizar bacheo de caja de carpetas y base asfáltica con mezcla asfáltica de material de banco de 1" a la malla No. 4 y cemento asfáltico AC – 10, elaborada en caliente en un espesor de 30 cm.	m <sup>3</sup>	120.00	33.00	3 960.00
2. Aplicar renivelaciones en forma aislada con mezcla asfáltica en caliente con material de banco de 19 mm de tamaño máximo, cemento asfáltico AC – 10 y aditivo modificar SBS en un espesor de 10 cm.	m <sup>3</sup>	7.00	189.15	1 324.05
3. Construcción de micro carpeta con polímero en caliente de 2 cm de espesor con tamaño máximo de 3/8" de agregado y cemento asfáltico AC – 10	m <sup>3</sup>	554.00	512.07	283 686.78
4. Construcción de la carpeta de concreto asfáltico de 5 cm. de espesor compactos elaborada en caliente con material de tamaño máximo de agregado de 19 mm con cemento asfáltico AC- 10 y aditivo modificador SBS	m <sup>3</sup>	1 385.00	322.24	446 302.40
5. Construcción de micro carpeta con polímero en caliente de 2 cm de espesor con tamaño máximo de 3/8" de agregado y cemento asfáltico AC – 10	m <sup>3</sup>	554.00	389.34	215 694.36

**TOTAL \$ 950 968.22**

**AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 - 148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

**TABLA E.11 COSTO DE CONSERVACIÓN ALTERNATIVA C**

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P/ U	IMPORTE
1. Realizar bacheo de caja de carpetas y base estabilizada con cemento Pórtland.	m <sup>3</sup>	120.00	33.00	3 960.00
2. Aplicar renivelaciones en forma aislada con mezcla asfáltica en caliente con material de banco de 19 mm de tamaño máximo, cemento asfáltico AC – 10 y aditivo modificar SBS en un espesor de 10 cm.	m <sup>3</sup>	7.00	189.15	1 324.05
3. Construcción de micro carpeta con polímero en caliente de 2 cm de espesor con tamaño máximo de 3/8" de agregado y cemento asfáltico AC – 10	m <sup>3</sup>	554.00	389.34	215 694.36

**TOTAL \$ 660 861.21**

**AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

TPDA = 30 784 vehículos

Periodo de diseño = 20 años

Tasa de actualización (r) = 8%

**TABLA E.12 COSTOS DE OPERACIÓN (\$ km)**

AÑO	HORIZONTE ECONÓMICO	FACTOR DE ACTUALIZACIÓN	IRI	ALTERNATIVA A		IRI	ALTERNATIVA B		IRI	ALTERNATIVA C	
				TOTAL	ACTUALIZADO		TOTAL	ACTUALIZADO		TOTAL	ACTUALIZADO
2006	0	1.000	2.5	90 354	90 345	2.2	87 354	87 354	2.0	85 398	85 398
2007	1	0.926	2.7	96 791	89 628	2.4	94 560	87 562	2.2	91 721	84 933
2008	2	0.857	2.9	102 522	87 861	2.7	101 371	86 875	2.4	989 12	84 767
2009	3	0.794	3.2	110 678	87 878	3.0	108 985	86 534	2.5	104 972	83 348
2010	4	0.735	3.4	118 478	87 081	3.2	115 538	84 920	2.7	110 632	83 314
2011	5	0.681	3.5	124 587	84 843	3.5	124 552	84 820	3.0	118 457	80 669
2012	6	0.630	2.9	120 850	76 135	2.7	119 803	75 476	3.2	125 165	78 853
2013	7	0.583	3.0	127 971	76 607	3.0	127 936	74 587	3.5	134 515	78 422
2014	8	0.540	3.2	134 432	75 293	3.2	134 795	72 789	2.4	125 910	67 991
2015	9	0.500	3.5	144 229	72 147	3.5	143 949	71 974	2.5	132 957	66 478
2016	10	0.463	4.0	156 840	72 616	4.0	156 952	72 668	2.7	138 289	63 613
2017	11	0.429	2.5	139 434	59 817	2.5	141 485	60 697	3.0	146 890	63 016
2018	12	0.397	2.7	147 991	58 553	2.7	147 727	58 648	3.2	153 850	61 078
2019	13	0.368	2.9	154 006	56 674	2.9	154 203	56 746	3.5	164 427	60 509
2020	14	0.340	3.0	161 739	54 991	3.2	162 971	55 410	4.0	177 880	60 479
2021	15	0.315	3.5	17 493	55 104	3.5	174 374	54 928	2.5	159 742	50 318
2022	16	0.292	3.0	170 594	49 813	3.0	170 582	49 810	2.7	165 888	48 439
2023	17	0.270	3.4	182 993	49 408	3.4	183 030	49 418	3.0	176 024	47 526
2024	18	0.250	3.7	192 583	48 147	3.7	192 583	48 146	3.5	189 321	47 330
2025	19	0.232	4.0	204 038	47 337	4.0	204 038	47 337	4.0	204 038	47 337
2026	20	0.215	4.5	22 241	47 830	4.5	222 465	47 830	4.5	222 465	47 830
<b>Σ</b>				<b>1 340 247</b>	<b>1 364 719</b>	<b>1 391 648</b>					

**AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

Tipo de terreno: plano

**TABLA E.13 COSTO DE OPERACIÓN VEHICULAR UNITARIO (\$ km)**

IRI	A	B2	B4	C2	C3	T3 – S2	T3 – S3	T3-S2-R4
2	3.51	9.73	16.54	5.84	10.04	12.45	16.95	22.26
2.2	3.53	9.77	16.61	5.96	10.19	12.66	17.16	22.51
2.4	3.55	9.81	16.68	6.07	10.33	2.86	17.36	22.75
2.5	3.56	9.83	16.71	6.13	10.41	12.96	17.46	22.87
2.7	3.58	9.88	16.80	6.25	10.55	13.16	17.66	23.12
2.9	3.60	9.91	16.85	6.37	10.07	13.36	17.86	23.37
3.0	3.61	9.93	16.88	6.43	10.77	13.47	17.97	23.49
3.2	3.63	9.98	16.97	6.55	10.92	13.67	18.17	23.75
3.4	3.65	10.02	17.03	6.66	11.06	13.88	18.36	23.96
3.5	3.66	10.04	17.07	6.72	11.14	13.98	18.46	24.11
3.7	3.69	10.09	17.15	6.84	11.28	14.19	18.69	24.36
4.0	3.72	10.15	17.26	7.02	11.51	14.51	19.00	24.73
4.4	3.59	9.83	14.75	6.31	10.62	13.48	17.76	25.00
4.5	3.79	10.27	17.46	7.31	11.68	15.03	19.53	25.37
4.7	3.82	10.31	17.53	7.43	12.03	15.24	19.74	25.62
5.1	3.87	10.41	17.70	7.67	12.13	15.67	20.17	26.14

**AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO**

**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**

**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

**TABLA E.14**

CARACTERÍSTICAS DEL VEHÍCULO	TIPO DE VEHÍCULO							
	A	B2	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	
Peso del vehículo vacío (kg)	1 300	11 000.00	5 100.00	6 800.00	14 500.00	15 000.00	24 000.00	
Carga transportada (kg)	0.00	4 900.00	12 400.00	19 200.00	29 500.00	33 500.00	42 500.00	
Número de llantas del vehículo (#)	4.00	6.00	6.00	10.00	18.00	22.00	34.00	
Número de km conducidos por año (horas)	16 000.00	170 000.00	100 000.00	100 000.00	120 000.00	120 000.00	120 000.00	
Número de horas conducidas por año (horas)	1 000.00	2 400.00	2 100.00	2 300.00	2 300.00	2 300.00	2 300.00	
Vida útil promedio de servicio (años)	6.00	8.00	8.00	8.00	10.00	10.00	10.00	
¿Usar vida útil constante? Código: 1-si 0-no	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
Edad del vehículo en kilómetros (km)	60 000.00	680 000.00	600 000.00	600 000.00	600 000.00	600 000.00	600 000.00	
Número de pasajeros por vehículo (#)	2.00	30.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Precio del vehículo nuevo (\$)	217 874.56	2 396 620.21	762 560.98	871 498.26	1 634 059.23	1 742 996.52	2 287 682.93	
Costo del combustible (\$/litro)	6.79	5.31	5.31	5.31	5.31	5.31	5.31	
Costo de los lubricantes (\$/litro)	31.37	31.37	31.37	31.37	31.37	31.37	31.37	
Costo por llanta nueva (\$/llanta)	762.56	5 991.55	5 011.11	5 011.11	5 991.55	5 991.55	5 991.55	
Tiempo de los operativos (\$/hora)	0.00	20.70	18.52	18.52	18.52	18.52	18.52	
Tiempo de los pasajeros (\$/hora)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Mano de obra de mantenimiento (&/hora)	15.25	23.97	19.61	19.61	19,61	19 61	19 61	
Retención de la carga (%/hora)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Tasa de interés anual real (%)	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	
Costos directos por vehículo – km (\$)	0.12	0.25	0.82	0.89	1.26	1.30	1.70	

**AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

Diseño de proyecto  
TPDA = 30 784 vehículos  
Tasa de crecimiento (r) = 5%  
Longitud l  
Días 365

Composición vehicular  
A = 0.565, B2 = 0.06, B4 = 0.004  
C2 = 0.073, C3 = 0.081, T3 – S2 = 0.157  
T3 – S3 = 0.024 y T3 – S2 – R4, = 0.036

**TABLA E.15 PAVIMENTO CON BASE ESTABILIZADA CON EMULSIÓN ASFÁLTICA ALTERNATIVA A**

HORIZONTE		TPDA	IRI	COSTO DE OPERACIÓN ANUALIZADO (\$)										TOTAL	(\$)	km
AÑO	PERÍODO			A	B2	B4	C2	C3	T3 – S2	T3 – S3	T3-S2-R4	TOTAL				
2006	0	30 784	2.5	23 504 429	7 024 712	796 086	5 783 369	10 893 746	26 289 511	5 414 660	10 638 598	90 345 111				
2007	1	32 323	2.7	25 056 782	7 483 358	848 316	6 245 214	11 692 990	28 273 538	5 800 486	11 390 763	96 791 447				
2008	2	33 862	2.9	26 396 462	7 863 468	891 352	6 783 144	11 893 998	30 329 101	6 198 463	12 166 132	102 522 520				
2009	3	35 402	3.2	28 014 543	8 356 534	947 297	7 353 828	13 598 841	32 721 480	6 649 191	13 036 733	110 678 447				
2010	4	36 941	3.4	29 752 715	8 835 822	1 001 158	7 933 518	14 613 459	35 256 077	7 129 624	13 956 357	118 478 730				
2011	5	38 480	3.5	31 367 595	9 222 303	1 045 317	8 407 382	15 459 081	36 989 469	7 467 102	14 628 806	124 587 055				
2012	6	40 019	2.9	31 196 031	9 265 120	1 053 423	7 732 178	14 056 637	35 843 728	7 325 506	14 378 254	120 850 877				
2013	7	41 558	3.0	32 485 717	9 670 118	1 095 882	8 403 198	5 611 937	37 849 388	7 719 494	15 136 136	127 971 870				
2014	8	43 098	3.2	34 198 804	10 173 151	1 153 229	8 952 454	16 555 078	39 834 765	8 094 651	15 870 773	134 432 905				
2015	9	44 637	3.5	36 386 573	10 697 919	1 212 573	9 526 210	17 932 633	42 907 976	8 661 877	16 969 491	144 295 252				
2016	10	46 176	4.0	38 612 423	11 290 655	1 279 978	10 884 819	19 795 504	47 221 899	9 298 969	18 456 141	156 840 388				
2017	11	47 715	2.5	36 431 712	10 888 258	1 233 928	8 964 180	16 285 106	40 748 571	8 392 688	16 489 758	139 434 201				
2018	12	49 254	2.7	38 181 690	11 403 189	1 292 669	9 516 475	17 817 881	43 083 403	8 838 820	17 357 320	147 491 447				
2019	13	50 794	2.9	39 595 472	12 015 910	1 337 054	10 174 916	17 841 352	45 494 548	9 297 878	18 249 558	154 006 688				
2020	14	52 333	3.0	40 908 489	12 177 349	1 392 915	10 448 692	19 659 735	48 370 522	9 720 974	19 060 576	161 739 252				
2021	15	53 872	3.5	43 914 632	12 911 224	1 450 017	11 770 345	21 642 738	51 785 257	1 045 943	21 006 990	174 935 146				
2022	16	55 411	3.0	43 267 291	12 893 568	1 474 840	11 204 326	20 816 034	50 466 154	10 292 720	20 181 636	170 596 569				
2023	17	56 950	3.4	45 818 154	13 621 723	1 543 433	12 230 671	22 528 829	54 744 030	10 991 368	21 515 782	182 993 990				
2024	18	58 490	3.7	48 017 436	14 087 807	1 596 339	13 114 145	23 988 324	57 544 524	11 581 050	22 653 725	192 583 350				
2025	19	60 029	4.0	50 141 551	14 677 900	1 663 977	14 150 297	25 734 226	61 388 674	12 289 200	23 993 063	204 038 888				
2026	20	61 568	4.5	53 836 832	15 370 662	1 742 108	15 832 284	28 054 268	67 870 120	13 482 529	26 271 256	222 465 059				

**AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

Diseño de proyecto

TPDA = 30 784 vehículos

Tasa de crecimiento (r) = 5%

Longitud l

Días 365

Composición vehicular

A = 0.565, B2 = 0.06, B4 = 0.004

C2 = 0.073, C3 = 0.081, T3 – S2 = 0.157

T3 – S3 = 0.024 y T3 – S2 – R4, = 0.036

**TABLA E.16 PAVIMENTO CON BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO ASFÁLTICO ALTERNATIVA B**

HORIZONTE		TPDA	IRI	COSTO DE OPERACIÓN ANUALIZADO (\$)							TOTAL	
AÑO	PERÍODO			A	B2	B4	C2	C3	T3 – S2	T3 – S3		T3-S2-R4
2006	0	30 784	2.2	23 280 929	6 981 835	791 322	5 574 082	10 570 816	24 815 753	5 165 083	10 174 756	87 354 576
2007	1	32 323	2.4	24 819 700	7 360 895	834 384	6 013 058	11 350 481	27 534 231	5 652 796	10 994 623	94 560 168
2008	2	33 862	2.7	26 221 175	7 839 663	888 707	6 542 561	12 249 757	29 619 730	6 076 666	11 933 114	101 371 373
2009	3	35 402	3.0	27 643 403	8 237 680	933 548	7 158 433	13 229 335	32 242 746	6 576 002	12 894 015	108 985 162
2010	4	36 941	3.2	29 281 165	8 719 810	988 478	7 673 511	14 190 009	34 143 952	6 938 246	13 603 468	115 538 639
2011	5	38 480	3.5	31 333 371	9 222 303	1 045 317	8 407 394	15 459 111	36 989 469	7 467 102	14 628 806	124 552 873
2012	6	40 019	2.7	30 988 872	9 265 120	1 050 297	7 732 171	14 477 084	35 005 374	7 181 564	14 102 867	119 803 349
2013	7	41 558	3.0	32 450 273	9 670 118	1 095 882	8 403 202	15 611 936	37 849 388	7 719 494	15 136 136	127 936 429
2014	8	43 098	3.2	34 161 491	10 173 152	1 153 229	8 952 464	16 555 074	39 834 765	8 094 651	15 870 773	134 795 599
2015	9	44 637	3.5	36 346 873	10 697 919	1 212 573	9 752 620	17 932 649	42 907 977	8 661 877	16 437 508	143 949 996
2016	10	46 176	4.0	38 570 295	11 290 655	1 279 978	10 884 818	19 795 506	47 221 899	9 453 206	18 456 141	156 952 498
2017	11	47 715	2.5	36 741 886	10 888 258	1 233 928	8 964 178	16 885 266	41 457 242	8 538 648	16 776 537	141 485 943
2018	12	49 254	2.7	38 140 032	11 403 189	1 292 669	9 516 488	17 817 894	43 083 403	8 838 820	17 635 097	147 727 592
2019	13	50 794	2.9	39 552 272	11 795 435	1 337 054	10 174 921	17 841 375	45 494 548	9 297 877	18 710 287	154 203 769
2020	14	52 333	3.2	41 481 585	12 353 045	1 400 342	10 870 790	20 102 481	47 662 833	9 829 166	19 271 548	162 971 790
2021	15	53 872	3.5	43 866 719	12 911 224	1 463 443	11 770 351	21 642 755	51 785 257	10 453 943	20 480 328	174 374 020
2022	16	55 411	3.0	43 267 291	12 893 568	1 461 184	11 204 337	20 816 040	50 466 154	10 292 720	20 181 636	170 582 930
2023	17	56 950	3.4	46 246 361	13 621 723	1 543 433	12 230 678	22 528 831	54 352 442	10 991 368	21 515 783	183 030 619
2024	18	58 490	3.7	48 017 436	14 087 807	1 596 339	13 114 145	23 988 324	57 544 524	11 581 050	22 653 725	192 583 350
2025	19	60 029	4.0	50 141 551	14 677 900	1 663 977	14 150 297	25 734 226	61 388 674	12 289 200	23 993 063	204 038 888
2026	20	61 568	4.5	53 836 832	15 370 662	1 742 108	15 832 284	28 054 268	6 787 0120	13 482 529	26 271 256	222 465 059

**AUTOPISTA: MÉXICO -QUERÉTARO**  
**TRAMO: TEPOZOTLÁN-PALMILLAS, KM 90+000 -148+000**  
**SUBTRAMO: POLOTITLÁN-PALMILLAS, KM 133+000-148+000**

Diseño de proyecto

TPDA = 30 784 vehículos

Tasa de crecimiento (r) = 5%

Longitud l

Días 365

Composición vehicular

A = 0.565, B2 = 0.06, B4 = 0.004

C2 = 0.073, C3 = 0.081, T3 – S2 = 0.157

T3 – S3 = 0.024 y T3 – S2 – R4, = 0.036

**TABLA E.17 PAVIMENTO CON BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO PÓRTLAND ALTERNATIVA C**

HORIZONTE	TPDA	IRI	COSTO DE OPERACIÓN ANUALIZADO (\$)										TOTAL	(\$ km
			A	B2	B4	C2	C3	T3 – S2	T3 – S3	T3-S2-R4				
2006	0	30 784	2.0	2 926 439	6 953 250	539 717	5 270 208	10 049 764	24 497 365	5 104 273	10 057 532	85 398 548		
2007	1	32 323	2.2	24 444 825	7 330 882	830 883	5 852 750	11 099 288	26 056 380	5 423 303	10 683 428	91 721 739		
2008	2	33 862	2.4	26 001 444	7 711 371	874 112	6 299 359	11 890 913	28 694 987	5 921 943	11 518 112	98 912 241		
2009	3	35 402	2.5	27 260 531	8 078 510	915 509	6 648 448	12 527 973	30 759 076	6 335 224	12 447 300	104 972 571		
2010	4	36 941	2.7	28 605 411	8 595 789	969 515	7 137 462	13 363 602	32 312 990	6 629 205	13 018 167	110 632 141		
2011	5	38 480	3.0	30 046 838	8 953 899	1 014 715	7 777 898	14 455 636	35 046 067	7 147 748	14 015 076	118 457 877		
2012	6	40 019	3.2	31 720 932	9 446 363	1 070 840	8 312 883	15 372 349	36 988 896	7 516 345	14 736 936	125 165 544		
2013	7	41 558	3.5	33 839 715	9 959 991	1 128 931	9 079 898	16 695 679	39 948 242	8 064 393	15 798 958	134 515 807		
2014	8	43 098	2.4	33 093 446	9 834 688	1 112 530	8 017 535	15 134 208	36 521 663	7 537 178	14 659 724	125 910 972		
2015	9	44 637	2.5	34 371 740	10 185 878	1 154 330	8 385 916	15 796 031	39 381 420	7 987 837	15 694 316	132 957 468		
2016	10	46 176	2.7	35 756 570	10 744 679	1 211 887	8 921 780	16 704 412	40 391 019	8 286 461	16 272 620	138 289 428		
2017	11	47 715	3.0	37 257 923	11 102 788	1 258 241	9 648 173	1 794 913	43 456 941	8 863 170	17 378 621	146 890 770		
2018	12	49 254	3.2	39 041 025	11 626 256	317 953	10 231 209	18 919 756	45 524 653	9 250 087	17 939 151	153 850 090		
2019	13	50 794	3.5	41 360 375	12 173 535	1 396 187	11 097 846	20 406 187	48 826 484	9 856 653	19 310 176	164 427 443		
2020	14	52 333	4.0	43 713 168	12 796 125	1 450 648	12 336 174	22 434 993	53 518 357	10 713 674	20 917 039	177 880 178		
2021	15	53 872	2.5	4 148 298	12 293 246	1 393 151	10 120 888	1 906 090	46 806 760	9 640 450	18 941 330	159 742 863		
2022	16	55 411	2.7	42 907 729	12 828 646	1 461 184	10 706 098	20 045 222	48 469 047	9 943 718	19 527 074	165 888 718		
2023	17	56 950	3.0	44 469 008	13 184 952	1 501 768	11 515 529	21 394 191	52 637 938	10 578 593	20 742 166	176 024 145		
2024	18	58 490	3.5	47 627 050	14 017 990	1 588 892	12 779 325	23 498 009	56 224 378	11 350 073	2 225 937	189 321 654		
2025	19	60 029	4.0	50 141 551	14 677 900	1 663 977	14 150 297	25 734 226	61 388 674	12 289 200	23 993 063	204 038 888		
2026	20	61 568	4.5	53 836 832	15 370 662	1 742 108	15 832 284	28 054 268	67 870 120	13 482 529	26 271 256	222 465 059		

AUTOPISTA: MÉXICO- QUERÉTARO  
TRAMO: TEPOZOTLÁN- PALMILLAS, KM 90+000-148+000  
SUBTRAMO: POLOTITLÁN- PALMILLAS

# A N E X O S

## T A B L A S Y F I G U R A S

**ANEXO A:** INFORMACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN TRAMO CARRETERO DE CUOTA

**ANEXO B:** VARIABLES DE DISEÑO

**ANEXO C:** NORMATIVIDAD SCT DE LA CALIDAD DE LOS MATERIALES Y PRUEBAS DE LABORATORIO

**ANEXO D:** APLICACIÓN DEL DISEÑO ESTRUCTURAL EN PAVIMENTO FLEXIBLE EN EL SUBTRAMO CARRETERO.

**ANEXO E:** EVALUACIÓN ECONÓMICA

## REFERENCIAS

1. INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. Pavimentos flexibles. Problemática, metodologías de diseño y tendencias. Publicación 104,1998.
2. SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES. Modernización del sistema carretero troncal, 1998.
3. EMPRESA. Geotecnia y control de calidad S.A. de C.V. Estudios y proyecto de la autopista: México-Querétaro, tramo: Tepozotlán-Palmillas. 2004.
4. MONCAYO, M. C. Tesis de maestría en administración de la construcción. Técnica para la selección de contratistas para la ejecución de obras con recursos federales. Jalapa Veracruz, 2003.
5. LOPEZ, L. Tesis de maestría en mecánica de suelos. Sistema de administración de pavimentos en aeropuertos. Facultad de Ingeniería UNAM, 1999.
6. INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. Catálogo de deterioros en pavimentos flexibles de carreteras mexicanas. Publicación 21, 1991.
7. INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. Índice internacional de rugosidad, aplicación en la red carretera de México. Publicación 108, 1998.
8. INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. Una estrategia para la conservación de la red carretera. Publicación 11, 1995.
9. SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES. Instructivo de operadores de la Dirección General de Servicios Técnicos de SCT, 1978.
10. INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. Evaluación estructural no destructiva de pavimentos. Publicación 107, 1998.
11. GEOMEX. Sistema de análisis y evaluación de pavimentos Geomex.
12. SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES. Normativa para la infraestructura del transporte. 2004.  
Libro: CTR. Construcción  
Tema: CAR. Carreteras  
Título: 03 Drenaje y subdrenaje
13. SOSA, R. Apuntes de: Proyecto y construcción de pavimentos. Maestría en mecánica de suelos. Facultad de Ingeniería UNAM, 2004.

14. SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES. Dirección General de Servicios Técnicos. Datos Viales 1995 a 2004.

15. SANCHEZ, M. Resumen de drenaje y subdrenaje en conservación de carreteras. 1999.

16. RICO, A. Y DEL CASTILLO, H. Ingeniería de suelos en las vías terrestres. Volumen 2. LIMUSA, 2002.

17. SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES. Normativa para la infraestructura del transporte 2004.

Libro: INT. INTRODUCCIÓN

Parte: 1. Propósito de la normativa para la infraestructura del transporte

18. SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES. Normativa para la infraestructura del transporte 2004.

Libro: CMT. Características de los materiales

Parte: 1. Materiales para terracerías

Título: 01. Materiales para terraplén

02. Materiales para subyacente

03. Materiales para subrasante

Parte: 04. Materiales para pavimento

Título: 02. Materiales para sub-bases y bases

Capítulo: 001. Materiales para sub-base

002. Materiales para base hidráulicas

003. Materiales para bases tratadas

Título: 04. Materiales pétreos para mezclas asfálticas.

Título: 05. Materiales asfálticos, aditivos y mezclas.

Título: 001. Calidad de los materiales asfálticos.

002. Calidad de los materiales asfálticos modificados.

003. Calidad de mezclas asfálticas para carreteras.

Parte: 4. Materiales para pavimentos.

Título: 04 Materiales pétreos para mezclas asfálticas.

19. ASOCIACIÓN MEXICANA DEL ASFALTO, A. C. Seminario regional sobre materiales asfálticos utilizados en la construcción de pavimentos flexibles. 2000.

20. ASOCIACIÓN MEXICANA DEL ASFALTO, A. C. Curso técnico regional de tratamientos asfálticos para pavimentación. 2001.

21. INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM. Diseño estructural de pavimentos asfálticos, incluyendo carreteras de altas especificaciones. DISPAV-5 VERSIÓN 2.0. 1999.

22. INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM. Comportamiento de pavimentos de altas especificaciones en la pista circular. 1997
23. Yoder Witczak, principles of pavement design. 1975.
24. AASHTO. THE AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. Aashto guide for design of pavements structures. 1993.
25. Yang H. Huag, pavement analysis and design. Prentice Hall. 1993
26. Catálogo de España, secciones de firme. 2003.
27. INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. Elementos de proyecto y costos de operación en carreteras. Publicación 20, 1991.
28. INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. Estado superficial y costos de operación en carreteras. Publicación 30, 1991.