

01182



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES CON  
MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN INGENIERÍA  
(MECÁNICA DE SUELOS)  
P R E S E N T A  
RAÚL VICENTE OROZCO SANTOYO



DIRECTOR DE TESIS: DR. MIGUEL P. ROMO ORGANISTA

MÉXICO, D.F.

MAYO DE 2005

m344133

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

**Para todos mis seres queridos,  
familiares, maestros y amigos,  
siempre fieles y atentos conmigo,  
con cariño, paciencia y denuedo**

**Especialmente a mi familia y a mis padres**

“El problema del hombre no está  
en la bomba atómica, sino en su corazón”

Albert Einstein

## **AGRADECIMIENTOS**

---

A los miembros del Jurado Doctoral: Dr. Eulalio Juárez Badillo, Ing. Jesús Alberro Aramburu, Dr. José Raúl Flores Berrones, Dr. Miguel Pedro Romo Organista (tutor académico), Dr. Gabriel Auvinet Guichard, Dr. Efraín Ovando Shelley y Dr. Rigoberto Rivera Constantino, por sus valiosos comentarios y sugerencias para culminar mi tesis, principalmente a mi tutor académico

A mis profesores de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería-UNAM, por sus enseñanzas y sugerencias durante mis estudios

A todas las personas que me apoyaron durante esta investigación, en especial a los Ings. Raúl Vicente e Irma Yolanda Orozco Escoto, Horacio Zambrano Ramos, José Arias Dufourcq y Luis Gómez Rábago, así como al Dr. Víctor Torres Verdín

# CONTENIDO

---

<b>RESUMEN</b>	ix
<b>ABSTRACT</b>	xi
<b>1. OBJETIVOS</b>	<b>1</b>
<b>2. ALCANCES</b>	<b>3</b>
<b>3. INTRODUCCIÓN</b>	<b>5</b>
3.1 Generalidades	5
3.2 Evaluación Superficial	6
3.3 Evaluación Estructural	7
<b>4. ANTECEDENTES</b>	<b>9</b>
<b>5. CARACTERÍSTICAS DEL PAVIMENTO</b>	<b>17</b>
5.1 Cualidades	17
5.2 Niveles de Calidad	18
5.3 Estructuración	20
<b>6. ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO CON SECCIÓN INVERTIDA</b>	<b>21</b>
6.1 Generalidades	21
6.2 Comentarios	24
<b>7. DETERIORO DEL PAVIMENTO</b>	<b>29</b>
7.1 Factores básicos que influyen	29
7.2 Principal deterioro	31
<b>8. PREVENCIÓN DE LA FATIGA EN LOS PAVIMENTOS</b>	<b>37</b>
<b>9. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES QUE CONSTITUYEN     LAS CAPAS DEL PAVIMENTO</b>	<b>39</b>
<b>10. EVALUACIÓN DEL PAVIMENTO</b>	<b>45</b>
10.1 Evaluación Superficial	44
10.1.1 <i>Índice de Irregularidad Internacional (III)</i>	44
10.1.2 <i>Profundidad de rodera</i>	47
10.1.3 <i>Levantamiento de deterioro</i>	47
10.2 Evaluación Estructural	47
10.2.1 <i>Medición de desplazamientos verticales</i>	47



Se presenta la tendencia mundial general existente en el proyecto, la construcción y la conservación de pavimentos, con los avances tecnológicos más recientes, sobre todo en la aplicación sistemática de métodos no destructivos de auscultación, asociados a simulaciones *in situ* realizadas con equipos especiales y en grandes tramos de prueba. En México, se lleva más de dos décadas de experimentación siempre gradual, con el espíritu de investigación científica aplicada (Romo y Orozco-Santoyo, 1978 y 1990).

Desde el punto de vista geotécnico de pavimentos, se describen sus cualidades, niveles de calidad, estructuración y factores que influyen en su deterioro, así como en la prevención de la fatiga y caracterización de materiales en las diversas capas del mismo. Además, se hace énfasis en la Sección Invertida como estructura de pavimento con enfoque eminentemente geotécnico, considerada como una opción altamente recomendable en la solución de muchos problemas.

Se describen los principales equipos no destructivos para la evaluación superficial (perfilómetro láser, Fotos 1 y 2) y estructural (deformómetros de impacto, Fotos 3 y 4). Se mencionan tanto la precursora viga Benkelman (Fotos 5 y 6) como el deflectógrafo francés (Lacroix). También se citan los métodos no destructivos de análisis espectral de ondas sísmicas (SASW) y los deflectómetros rodantes de alta velocidad (RDT) o de baja velocidad (RWD), así como el analizador sísmico portátil de pavimentos (PSPA). Este último, el SASW y la viga Benkelman son muy útiles para el control de calidad de los pavimentos durante su construcción, capa por capa. Por otro lado, se hace notar la importancia que tiene descubrir el nivel de calidad característico para cada una de las propiedades fundamentales y subordinadas de los pavimentos, tanto en su geometría y acabados como en los materiales y procedimientos constructivos, durante las diversas etapas de la obra: *planificación, proyecto, construcción, supervisión, control de calidad, conservación y operación* (Orozco-Santoyo, 1998 a 2005).

Con apoyo experimental fenomenológico, en esencia, se propone una metodología para proyectar geotécnicamente los pavimentos, a partir de un indicador que se ha definido como Índice Estructural ( $I_e$ ) que, en forma sencilla y confiable, proporciona la Calificación Estructural ( $C_e$ ) del pavimento (Escala de 5 a 10) y las acciones más recomendables a tomar para la rehabilitación y/o la reconstrucción del mismo.

Perfilómetro láser RSP 5.2, Clase 1-ASTM, Dynatest



Foto 1 Vista general



Foto 2 Vista detallada

Deformómetros de Impacto:



Foto 3 Falling Weight Deflectometer, KUAB



Foto 4 Heavy Weight Deflectometer, Dynatest

Viga Benkelman y camión cargado (8.2 t/eje)



Foto 5 Posición inicial



Foto 6 Posición final

The actual mundial trend on project, construction and conservation of pavements are presented, with systematic application on non-destructive methods of evaluation related with results of *in situ* simulations realized with special equipments and large road tests. In Mexico, there are crecient experimentation during more than 25 years (Romo y Orozco-Santoyo, 1978 and 1990).

From geotechnical viewpoint of pavements, their structure and detrimental factors, fatigue prevention and materials characterization, their properties and qualities levels are described. Besides, the geotechnical focus of Inverted Section structure are emphasized, which strongly is recommended as an option for solution in many cases.

The main non-destructive equipments for superficial evaluation (laser perfilometer; photographs 1 and 2) and structural evaluation (Falling Weight Deflectometer, FWD, or Heavy Weight Deflectometer, HWD, photographs 3 and 4) are described. The Benkelman beam (Photographs 5 and 6) and the French deflectograph (Lacroix) are mencionated. Also, other non-destructive procedures as the Spectral Analyses of Seismic Waves (SASW) and the High Velocity Ridding Deflectometer (RDT) or similar of low velocity (RWD) are mentioned, and the Portatil Seismic Pavement Analyzer (PSPA). This one, the SASW and the Benkelman beam have a lot of application in quality control during the pavements construction (layer by layer). On the other hand, is very important to identify the characteristical quality level for each fundamental and secondary propierties of the pavements, about of geometry, apariency and texture, materials and constructive procedures, during all the job activities: planning, studies and projects (designs), construction, supervision, quality control, conservation (mantainment) and operation (Orozco-Santoyo, 1998 to 2005).

Basically, with phenomenological experimental approach, a procedure to geotechnical project of pavements are proposed, from the Structural Index ( $I_c$ ), that give us, in a simple manner and with confidence, the Structural Qualification ( $C_e$ ) of the pavement (5 to 10 scale), and the more recomendable activities to rehabilitation and/or reconstruction of the pavements.

## Capítulo 1 OBJETIVOS

---

Son los siguientes:

- 1) Presentar un panorama muy general de lo que ocurre en el ámbito internacional y nacional sobre los aspectos principales de los pavimentos (Capítulo 4)
- 2) Aportar nuevos enfoques personales acerca de la evaluación rápida y confiable de los pavimentos flexibles, a partir de procedimientos no destructivos

- a) Obtener la Calificación Estructural ( $C_e$ ), de 5 a 10, correlacionada con el comportamiento real de los pavimentos y un indicador que aquí se denomina Índice Estructural ( $I_e$ ).

El valor de  $I_e$  se obtiene a partir del desplazamiento vertical ( $\delta_1$ ) registrado en el sensor 1 (bajo la carga aplicada) y su distancia al punto de inflexión ( $p$ ) perteneciente a la cuenca de desplazamientos verticales, obtenida de los sensores ( $S_1$  a  $S_7$ ), mediante deformómetros de impacto: Falling Weight Deflectometer (FWD) o Heavy Weight Deflectometer (HWD), todo lo cual se describe en el Capítulo 10, inciso 10.2.2.

- b) Estimar en forma rápida la capacidad de carga relativa del pavimento, mediante el  $I_e$ , que sirve como auxiliar en el diagnóstico de su comportamiento con su probable solución, al comparar dicho  $I_e$  con los niveles de calidad admisible e inadmisibles (Capítulos 8 y 10, inciso 10.2.2)
- c) Presentar la información resumida de la evaluación superficial (Capítulo 10, inciso 10.1) con la correspondiente estructural (Capítulo 10, inciso 10.2), para su interpretación conjunta, mediante planos diseñados ex profeso (Anexo E y Planos)
- d) Proponer una metodología para analizar un proyecto nuevo o de rehabilitación y/o reconstrucción de un pavimento (Capítulo 11)

e) Promover la utilización de la Sección Invertida de un pavimento (Capítulo 6), recopilando y analizando los casos reales, para difundir la bondad de su aplicación (Romo y Orozco-Santoyo, 1978)

3) Motivar a los geotecnistas, sobre todo los jóvenes, para que continúen desarrollando e innovando métodos de proyecto y evaluación no destructiva de pavimentos, mediante investigaciones debidamente programadas entre Organismos oficiales (e.g., Instituto Mexicano del Transporte, IMT) y privados e Institutos especializados (e.g. Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, II-UNAM), con participación de empresas de consultoría y construcción

## Capítulo 2 ALCANCES

---

Son los siguientes:

1) Tratar sólo la evaluación de pavimentos del tipo flexible, como los asfálticos y no la relativa a los pavimentos rígidos (losas de concreto hidráulico como estructura resistente al tránsito, principalmente).

2) Presentar la estructuración denominada Sección Invertida, donde las propiedades del concreto hidráulico "seco" (compactado) se aprovechan en la capa de subbase y las del concreto asfáltico en la de rodamiento, con una transición de grava densa y dura como elemento friccionante y drenante que, además, evita la propagación de fisuras, amortigua el ruido de los vehículos y forma una barrera para la ascensión capilar del agua, principalmente.

3) Proponer un indicador global de la calidad del pavimento (Índice Estructural,  $I_e$ ), que sea sencillo y confiable en su aplicación, con el fin de resolver los problemas de una manera ágil y oportuna.

**Falta página**

**N°** 4

## Capítulo 3 INTRODUCCIÓN

---

### 3.1 Generalidades

Se entiende por evaluación o auscultación de pavimentos para autopistas, aeropistas o vialidades, la valoración de su comportamiento tanto superficial como estructural, con un enfoque fundamentalmente geotécnico: considerar a todas las capas del pavimento, incluyendo su cimentación, como si fueran estratos de suelo que interactúan entre sí.

De hecho, todas las fórmulas de la mecánica de suelos se aplican también a los concretos (hidráulicos y asfálticos). Puede considerarse al concreto asfáltico como un suelo que en lugar de agua contiene cemento asfáltico, cuyo peso específico relativo es similar al del agua.

Por otro lado, el conocimiento de los concretos asfálticos es mucho más complicado que el de los suelos, debido a que la temperatura tiene un efecto más acentuado en su comportamiento; por ejemplo, al aumentar la temperatura, la rigidez del concreto asfáltico disminuye apreciablemente. Los concretos asfálticos blandos generan roderas superficiales, las cuales algunas veces son de importancia; en otros casos, cuando las roderas son muy profundas, puede deberse también a deficiencias estructurales en las capas subyacentes del pavimento.

El concreto hidráulico también puede considerarse como un suelo que se endurece con el tiempo y su comportamiento también se explica con las fórmulas de la mecánica de suelos o la de rocas, es decir, de la geotécnica. De acuerdo con el Diccionario de la Lengua Española (1992), la Geotécnica (o Geotecnia) es un término geológico que se define como: ***“Aplicación de principios de ingeniería a la ejecución de obras públicas en función de las características de los materiales de la corteza terrestre”***.

### 3.2 Evaluación Superficial

La evaluación superficial de los pavimentos está íntimamente relacionada con la valoración de las irregularidades superficiales que existen desde el término de su construcción, para lo cual se recomienda utilizar un indicador que aquí denominaremos Índice de Irregularidad Internacional (III); en inglés se designa como *International Roughness Index* (IRI). Para fines prácticos, el III expresa la suma acumulada de las microvariaciones en espesor por unidad de longitud. Cuando el III es nulo, significa que el usuario de una carretera conduce sobre una mesa de billar, cuya superficie es prácticamente lisa; en cambio, si el III tiene valores de 1 a 2 mm/m (o m/km), como ocurre en las aeropistas o autopistas, quiere decir que la suma de irregularidades positivas y negativas permite transitar a los usuarios con seguridad y comodidad.

Los pilotos de aviación se quejan cuando hay brincos (valores altos de III, mayores de 2 mm/m) que causan alteraciones en los instrumentos o en algunas partes críticas de las aeronaves. Sabemos que las irregularidades provocan fuerzas dinámicas adicionales por vibración, que reducen notablemente la vida de los pavimentos y perjudican a los equipos aeronáuticos. Lo mismo ocurre con los vehículos pesados en las carreteras o calles.

Se insiste en que no debe confundirse el Índice de Irregularidad Internacional (III), llamado incorrectamente Índice de Rugosidad Internacional (IRI, por sus siglas en inglés), con el IFI (Índice de Fricción Internacional), en que interviene el coeficiente de rugosidad de la superficie del pavimento, asociada a la aspereza de su textura superficial.

En la Fig. 3.1 (Orozco-Santoyo, 1999a) se ilustra el efecto que tiene la velocidad de operación de los vehículos en la vida útil del pavimento. Para una irregularidad superficial inicial dada (punto 1), si la velocidad de operación es baja (punto 2), resultará una vida útil determinada en el pavimento (punto 3). Cuando la velocidad de operación aumenta (punto 4), habrá una reducción en su vida útil (punto 5) debido al efecto dinámico mencionado que, en general, reduce la capacidad estructural (en la parte superior) del pavimento. He ahí la importancia de la evaluación superficial de carácter geotécnico.

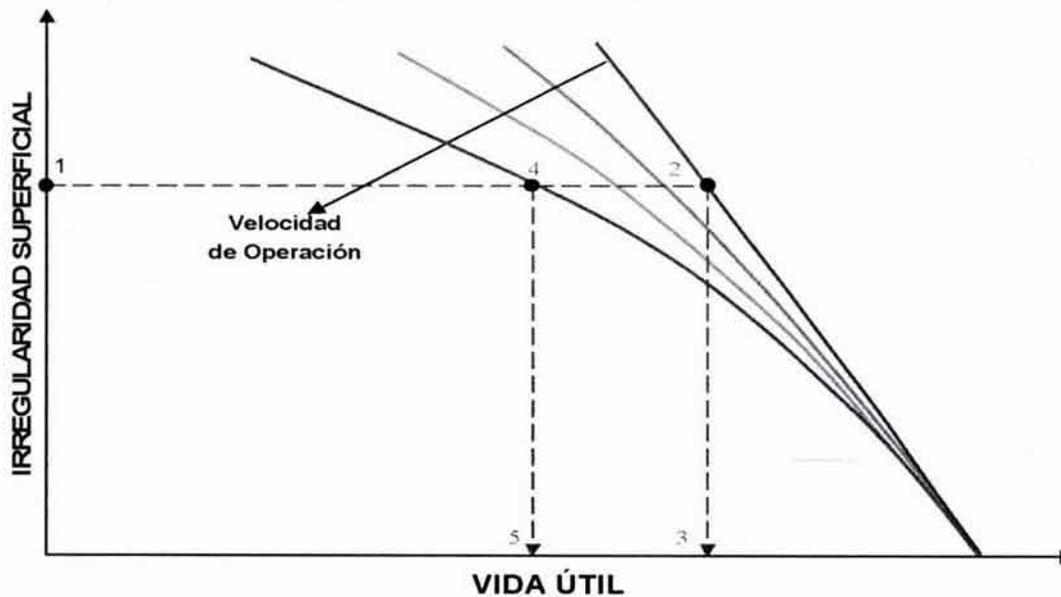


Figura 3.1 EFECTO DE LA VELOCIDAD DE OPERACIÓN EN LA VIDA DE UN PAVIMENTO (Evaluación Superficial)

En el Capítulo 10, inciso 10.1, se presenta el procedimiento para obtener el III y la profundidad de rodera, a partir respectivamente de los perfiles y de las secciones transversales continuas del pavimento, obtenidos con equipo láser (como si fuera un "barrido": una tomografía similar a la utilizada en la ciencia médica).

### 3.3 Evaluación Estructural

En el Capítulo 10, inciso 10.2, se explica el procedimiento de evaluación estructural de los pavimentos, el cual implica la valoración de la capacidad de carga de las capas que lo integran y su degradación por fatiga a través del tiempo. En la Fig. 3.2 (Orozco-Santoyo, 1999a) se ilustra el efecto de la velocidad de operación de los vehículos en la vida útil del pavimento. Para una capacidad estructural inicial dada (punto 1), si la velocidad de operación es baja (punto 2), resultará una vida útil determinada en el pavimento (punto 3). Pero, cuando la velocidad de operación aumenta (punto 4), también aumentará la vida útil (punto 5), como ocurre en los carriles de alta velocidad; es decir, el tiempo de aplicación de las cargas es menor y, por ende, la duración del pavimento será mayor, además de otros parámetros que influyen en ésta. Entre éstos, hay que tomar en cuenta que se presenta un efecto dinámico, ya que al aumentar la velocidad de tránsito se incrementa la frecuencia de vibración, la cual causa menor daño a los materiales térreos, en general; por otro lado, recuérdese que en dinámica de suelos, cuando aumenta el número de ciclos de aplicación de una carga conlleva a que la resistencia del suelo disminuya.

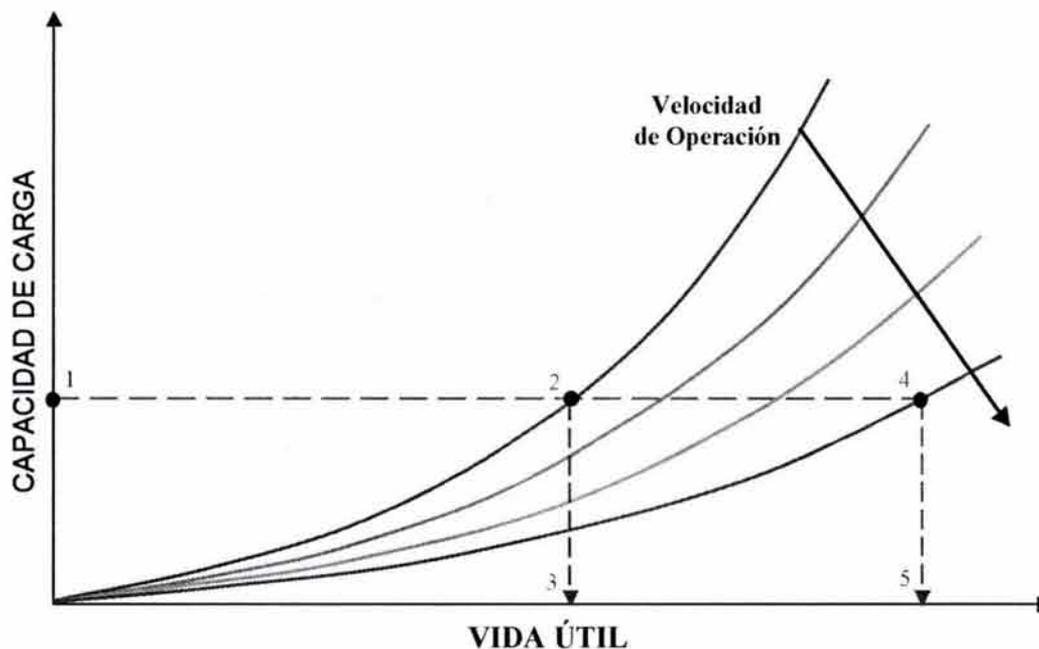


Figura 3.2 EFECTO DE LA VELOCIDAD DE OPERACIÓN EN LA VIDA DE UN PAVIMENTO (Evaluación Estructural)

**Falta página**

**N° 8**

## Capítulo 4 ANTECEDENTES

---

A grandes rasgos, se puede establecer que los pavimentos mexicanos para carreteras, aeropistas y otras vialidades han cumplido satisfactoriamente su función, acorde con las características vigentes de cada época (intensidad y frecuencia de tránsito; magnitud y repetición de carga por eje; número de ejes en los vehículos y su velocidad de operación; topografía y clima; materiales de construcción y geotécnica; ...), pero a costa de la conservación constante de las obras, porque los métodos empíricos de proyecto se han ido ajustando racionalmente para satisfacer las necesidades del usuario, con la mínima inversión posible. En otras palabras, en la mayoría de los casos han sido subdiseñados los pavimentos, tanto geométrica como estructuralmente, por lo cual se requiere su ampliación y reforzamiento para satisfacer las crecientes necesidades del tránsito moderno.

Entre los métodos utilizados para el proyecto de pavimentos flexibles (Zárate, 2003), están los basados en:

- Resistencia (California Bearing Ratio-CBR, 1925)
- Pruebas normalizadas (de placa y triaxiales, 1945)
- Análisis estructural de sistemas multicapa (Método Shell, 1950)
- Evaluación estadística de comportamiento (Método AASHTO, 1961; Método del Instituto de Ingeniería, Corro *et al*, 1999)
- Análisis mecanicistas y matizados con información experimental en forma práctica, mediante secciones estructurales típicas o métodos de catálogo (Método Español MOPU, 1989). Hay otros, como el Método Francés (LCPC, 1994)

Se hace notar que la Universidad de California, en Berkeley (Monismith, 1992), ha influido fuertemente en el desarrollo conceptual y de investigación científica dentro del campo

de los pavimentos; aunque se dice que a partir de 1962 se iniciaron los métodos analíticos para el proyecto de pavimentos, conviene establecer que hubo contribuciones importantes: el trabajo de Burmister en 1943 (Yoder *et al*, 1975); el desarrollo de un dispositivo para medir deflexiones (viga Benkelman) durante el tramo de prueba de la Western Association of State Highway Organizations (WASHO); la investigación de Hveem sobre deflexiones y fallas por fatiga; así como el tramo de prueba de la American Association of State Highway Officials (AASHO).

Cabe recordar que la viga Benkelman es muy útil durante el control de calidad de cada capa del pavimento, ya que se comparan las deflexiones reales con las de proyecto. Conviene mencionar que en Francia se desarrolló el deflectógrafo Lacroix, el cual sistematiza las mediciones realizadas con dos vigas Benkelman retráctiles, montadas en un camión especial, a fin de caracterizar un pavimento (LCPC, 1994).

Existe una herramienta más de prueba no destructiva en la caracterización de un material (o en la interfaz de dos materiales adyacentes), que se apoya en la teoría de propagación de ondas, con la cual se pueden obtener las propiedades fundamentales del material al medir la velocidad de las ondas de compresión, característica única en los métodos sísmicos (Nazarian, *et al*, 1999). Se puede establecer lo siguiente:

a) La tecnología desarrollada con estos métodos sísmicos permite la detección y localización de defectos dentro del material. Se aplica con agilidad y oportunidad en el control de calidad durante la construcción y el monitoreo de los tratamientos o procesos que se realizan durante la conservación de los pavimentos.

b) El denominado analizador sísmico portátil de pavimentos: Portable Seismic Pavement Analyzer (PSPA, por sus siglas en inglés), es un ejemplo de dispositivo fundamentado en la tecnología antes indicada, el cual se enfoca en las propiedades de la capa de un pavimento, tanto rígido como flexible. El PSPA se opera desde una computadora portátil, la cual se conecta a la unidad sensora al través de un cable. Se utilizan dos acelerómetros y una fuente de alta frecuencia. Los receptores se conectan a un sistema de concentración de datos; su recolección y procesamiento en un punto dado, se realiza en menos de 15 segundos. El PSPA mide la velocidad de las ondas de compresión de alta frecuencia, utilizada para el cálculo del módulo elástico en cada capa.

c) Por otro lado, con el PSPA se pueden realizar además pruebas de impacto (de eco), las cuales permiten detectar el grosor de la capa de un pavimento, sus defectos, fallas, roturas y zonas de deterioro

También existe el método no destructivo de análisis espectral de ondas de superficie: Spectral Analysis of Surface Waves (SASW, por sus siglas en inglés), el cual corresponde a una técnica sísmica para evaluar *in situ* los módulos elásticos, así como los espesores de las capas de un sistema estratificado, como el pavimento. El método se fundamenta en la dispersión de ondas propagadas con diferente frecuencia y velocidad, dentro de las capas de la estructura. Las ondas se originan con un impacto fuerte que es detectado con dos o más receptores (geófonos o acelerómetros), instalados a distancias específicas desde la carga. El objetivo de la prueba SASW es obtener la curva de dispersión experimental, misma que es procesada con un programa de computadora para lograr el módulo elástico de las capas, por retrocálculo ("solución del problema inverso"). Este programa corresponde a un modelo

matemático apoyado en un algoritmo de red neuronal artificial (ANN); con este sistema se asegura una opción muy confiable, que tiene aplicación tanto en el control de calidad durante la construcción del pavimento, como en el monitoreo del mismo ya construido.

Con los modelos de ANN, a partir de las curvas de dispersión sintéticas obtenidas por simulación numérica de la prueba SASW, es posible evaluar los espesores y módulos elásticos correspondientes a cada capa del pavimento. Este procedimiento es muy valioso para la evaluación de pavimentos, así como para la caracterización de sus capas (Gucunski, Abdallah y Nazarian, 2000). Esta tecnología, basada en ANN, se puede mejorar ampliándola con algoritmos genéticos y sistemas difusos, como se ha demostrado para problemas geosísmicos (Romo y García, 2003).

Otro equipo no destructivo, utilizado como herramienta para caracterizar las capas del pavimento, es el deflectómetro rodante de alta velocidad (High Speed Rolling Deflectometer, RDT), el cual dispone de 40 sensores láser montados en un camión, a lo largo de dos ejes transversales; uno de éstos se ubica a 2.5 m atrás del eje delantero del vehículo y el otro a 0.50 m detrás del eje trasero. Comparando los resultados obtenidos con el deformómetro de impacto (FWD) y con el RDT, se encuentra más efectivo el RDT para el caso de pavimentos rígidos (Andrén y Lenngren, 2002).

Conviene hacer notar que para la rehabilitación y/o reconstrucción de aeropistas y autopistas se requiere del conocimiento de los módulos elásticos de las capas del pavimento, particularmente el de la subrasante (y capas inferiores) en pavimentos flexibles. Se ha ido incrementando la investigación al respecto, mediante métodos no destructivos como el FWD, en los que se procesan los datos con cálculos de computadora y se comparan resultados con pruebas de laboratorio, como las triaxiales; sin embargo, se tiene discrepancia entre los resultados obtenidos con los métodos estáticos y los dinámicos, como consecuencia de la diferencia que existe en la aplicación de las cargas en el campo y en el laboratorio, la resistencia o rigidez de la capa subyacente, así como el espesor y la profundidad a la cual se encuentra dicha capa (Mooney, Bong y Miller, 2002).

Para obtener el módulo elástico de la capa subrasante (e inferiores), las líneas de investigación experimentales que comparan los resultados obtenidos con las pruebas triaxiales de carga y descarga, el presiómetro y las ecuaciones de regresión para los datos registrados con el FWD, llegan a una variación significativa en los resultados (como en los planos anexos); por consiguiente, es muy complejo determinar qué método es el más confiable, ya que dependerá de las condiciones de cada sitio. Sin embargo, los métodos mencionados pueden ser una aproximación de partida muy útil para el análisis de las características de las capas que conforman el pavimento (Mooney, Bong y Miller, 2002).

Recientemente, se han adoptado conceptos de mecánica tradicional para el proyecto de pavimentos, lo que da oportunidad de caracterizar los suelos lo más parecido a la realidad. Por ejemplo, para los suelos granulares de una capa de pavimento, es conveniente considerar conceptos como la anisotropía y la dirección de los esfuerzos, tomando en cuenta las condiciones de deterioro del pavimento en el campo (Seyhan y Tutumluer, 2000). A continuación se resumen algunos resultados a que han llegado estos investigadores:

a) Las características relacionadas con lo indicado anteriormente, sólo se obtienen mediante pruebas triaxiales. En la Universidad de Illinois se han hecho pruebas a diferentes tipos de materiales, determinando en el laboratorio los esfuerzos inducidos anisotrópicamente

y las propiedades elásticas, de acuerdo con la norma AASHTO T294-94; el resultado es que el módulo elástico obtenido al someter el espécimen a esfuerzos de tensión, en general, es menor al correspondiente a los de compresión

b) Cuando se trata de un módulo elástico muy bajo, el análisis mecánico supone que, en la vida de un pavimento flexible, se debe considerar principalmente el contenido de finos (que determina el alto o bajo nivel de calidad de los materiales) y su influencia en su comportamiento anisotrópico. De esta manera, para un buen material se tiene asociada una cantidad muy baja de finos. Para estados de esfuerzos a tensión, se obtiene un módulo elástico bajo y, por consiguiente, se tendrá una reducción en el buen comportamiento del pavimento

Respecto a los modelos en tercera dimensión con elemento finito (3D EF), se puede establecer lo siguiente (William y Shoukry, 2000):

a) De las experiencias obtenidas con cargas estáticas y mediante retrocálculo ("solución del problema inverso"), se llega a que se tienen variaciones en los resultados (de 1 a 13%), relativos a la estimación de la profundidad de la capa de apoyo y su efecto en la respuesta del pavimento (deflexión)

b) Se ha desarrollado un estudio con métodos mecánicos, para estimar la profundidad aparente de la capa estructuralmente de mayor resistencia, utilizando los datos obtenidos con el deformómetro de impacto (similares a los de la Fig. 6.2, Capítulo 6). Esta predicción se puede utilizar en modelos teóricos de proyecto de pavimentos, para asegurar que no se tenga un efecto irreal al estimar las deflexiones superficiales

c) Esta predicción está fundamentada en el modelo 3D EF, la cual da una mejor aproximación a las condiciones reales. Para esta simulación de la respuesta del pavimento a la carga de impacto del FWD, se considera que la naturaleza de la carga es dinámica y se toma en cuenta la geometría tridimensional de la estructura del pavimento, entre otros factores. En la Fig 4.1 se ilustra uno de los diagramas 3D EF

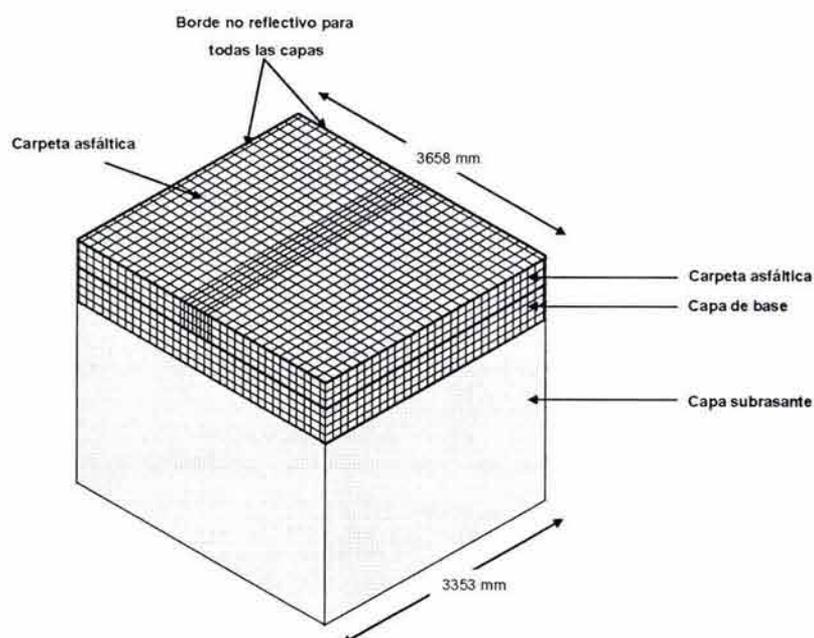


Figura 4.1 MÓDULO EN 3D DEL ELEMENTO FINITO (William, 2000)

d) La profundidad de la capa de apoyo se define como la profundidad a la cual decrecen, en la capa subrasante, los desplazamientos y los esfuerzos hasta 10%, aproximadamente, con respecto a los valores medidos en la superficie. Algunas investigaciones sobre el efecto de la respuesta de la capa subrasante, realizadas en modelos 3D EF, al estar sometida a la aplicación de una carga con el equipo HWD, revelan que al incrementar el espesor de 1 a 3.7 m, los cambios en las deflexiones superficiales son inferiores a 3%; por eso se toma una profundidad promedio de 1.8 m, para hacer menos complejo el sistema y simplificar los cálculos, ya que cualquier variación fuera del intervalo antes mencionado, sólo incrementa el tiempo de ejecución del programa y no genera efectos significativos en los resultados

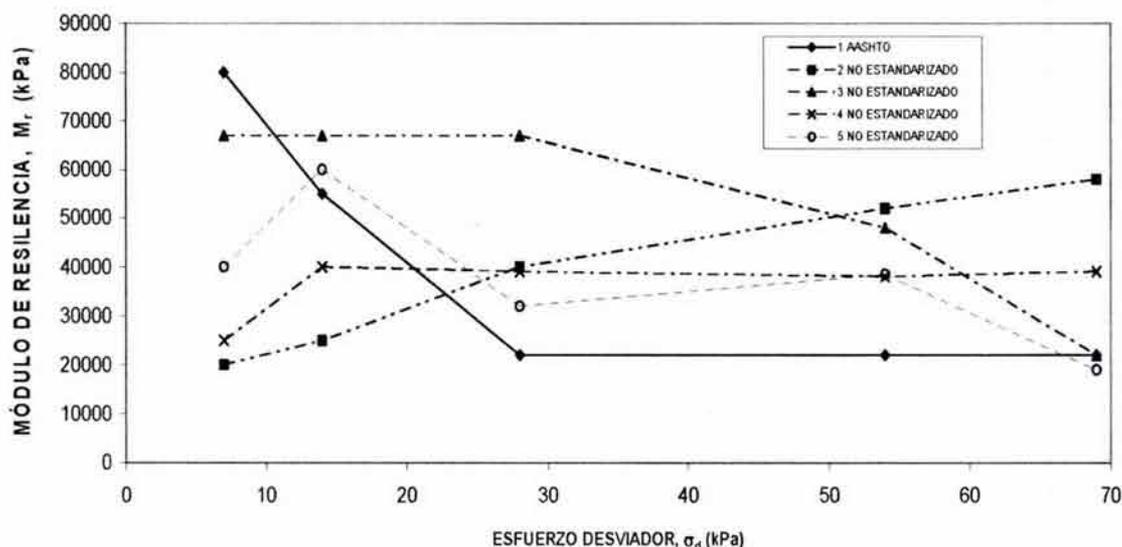
Con relación al módulo de resiliencia [ $M_r = \sigma_d / \varepsilon_r$  = relación entre el esfuerzo desviador repetido y la correspondiente deformación unitaria resiliente (recuperable)] de los suelos en la capa subrasante, a partir de pruebas realizadas con el deformómetro de impacto (FWD), se puede mencionar lo siguiente (Russell y Hossain, 2000):

a) De acuerdo con la teoría elástica, el  $M_r$  es una propiedad gobernadora para un suelo fino arcilloso y una medida de la recuperación de resistencia ante cargas pequeñas y repetidas. Se expresa en kPa y varía de 35,000 a 50,000. Además, es un parámetro necesario en los usuarios del método AASHTO para el proyecto de pavimentos flexibles

b) A partir de los resultados obtenidos con el FWD, se ha realizado una investigación con el auxilio de los programas de computadora "EVERCALC" y "DARWIN", para analizar el comportamiento del  $M_r$ . El resultado es que el punto de inflexión del esfuerzo desviador se presenta (para una carga de 46 kPa), siempre y cuando se trate (en general) de un suelo de grano fino con comportamiento lineal

c) El resultado de estas pruebas (descritas anteriormente) deberá afectarse por un factor de corrección de 1/3, en el caso de usar el  $M_r$  para el proyecto de pavimentos (según la AASHTO). Los resultados obtenidos se han corroborado con estudios anteriores, para los mismos fines establecidos por la AASHTO. Como ilustración, en la Fig. 4.2 se presenta la relación entre el módulo de resiliencia ( $M_r$ ) de un material para capa subrasante y el esfuerzo desviador correspondiente ( $\sigma_d$ )

Para probar algunas hipótesis acerca de las pruebas no destructivas mediante la aplicación del equipo FWD, se instrumentó el camino Smart de Virginia. Esto se realizó al inicio de la construcción de cada capa del pavimento (con distintos tipos de materiales) y se utilizaron cinco diferentes cargas para cada prueba, lo cual permitió una aproximación más exacta del módulo elástico para cada capa, calculado *in situ* (Nassar, Al-Qadi, Flintsch, Appea, 2000). Se han realizado investigaciones experimentales de la viscosidad no lineal de los suelos en la capa subrasante, bajo la acción de ciclos de esfuerzos inducidos. En muestras de suelo insaturado para capa subrasante, se efectuaron las simulaciones del paso de los vehículos, para los diversos ciclos de prueba en la cámara triaxial. El resultado más importante fue que el módulo elástico de las capas superficiales puede ser engañoso y, al utilizar únicamente la curva de deflexiones, puede llegarse a resultados erróneos; considerando la distancia al centroide de la curva de deflexiones, se tendrá una opción más razonable.



**Figura 4.2 RESULTADOS DE PRUEBAS PARA DETERMINAR EL  $M_r$  EN CAPA SUBRASANTE (Russell 2000)**

Con relación a la tendencia mundial en los pavimentos, se puede establecer que el proyecto, la construcción y la conservación de los pavimentos implica tomar en cuenta los avances tecnológicos presentados en recientes congresos sobre esta materia (University of Texas y University of Washington, 1997; Geo-Institute of the American Society of Civil Engineers, Denver, Colorado, 2000; University of Minho, Portugal, 2003;...), cuya tendencia se resume a continuación:

a) Modelación teórica más realista e innovadora del comportamiento de los pavimentos, que incorpore la caracterización de los materiales obtenida de pruebas no destructivas, como las resultantes del deformómetro de impacto (Orozco-Santoyo y Torres, 1994) y el perfilómetro láser (Torres, 1998). La aplicación de las redes neuronales artificiales es una técnica de análisis que recientemente se está aplicando con buenos resultados (Romo *et al*, 1998; Fontul *et al*, 2003)

b) Disponibilidad de datos altamente confiables, de campo y de laboratorio, obtenidos de Organismos oficiales e Instituciones de investigación asociadas con empresas de consultoría y construcción

c) Incorporación más efectiva de los conceptos básicos de la mecánica de suelos en el proyecto y la evaluación de pavimentos, incluyendo su cimentación

d) Aplicación necesaria de parámetros geotécnicos más significativos, para suprimir el uso generalizado de conceptos empíricos, como el CBR (California Bearing Ratio)

e) Apoyo en la evaluación de los pavimentos mediante métodos no destructivos, a partir de investigaciones en tramos de prueba a escala natural y con simuladores vehiculares pesados HVS (Fotos 4.7 a 4.10). En la foto 4.10 se observa la falla en una rodera profunda (con instrumentación), después de simular durante 3 meses el equivalente de 20 años de tránsito específico (Dynatest, 1999)

Simulador vehicular pesado (MARK IV, DYNATEST HVS)



Foto 4.7 Equipo completo



Foto 4.8 Ruedas para simulación



Foto 4.9 Rueda en proceso



Foto 4.10 Resultado final

Conviene recalcar que el simulador HVS, de carácter destructivo, ha servido para apoyar los resultados del comportamiento de pavimentos flexibles: al obtener módulos elásticos deducidos de las pruebas; al comparar resultados de laboratorio con los obtenidos por retrocálculo, a partir de las deflexiones definidas con el deformómetro de impacto (FWD o HWD); y al tomar en cuenta las medidas efectuadas directamente con el equipo auxiliar *in situ* MDD (Multi Depth Deflectometer), como se ha realizado en la Universidad de California (Ullidtz *et al*, 2000). Aparte del MDD se encuentran otros equipos auxiliares como el RSD (Road Surface Deflectometer), el HVS Laser Profiler, el CAM (Crack Activity Meter), el 3D Stress Sensor, el PAST (Pavement Strain Transducer) y el SOPT (Soil Pressure Transducer). El lector interesado en obtener información detallada sobre los equipos mencionados puede consultar el manual especializado (Dynatest, 1999).

Con relación al concreto asfáltico elaborado en caliente, en el Anexo A se presenta una breve reseña histórica.

## Capítulo 5 CARACTERÍSTICAS DEL PAVIMENTO

### 5.1 Cualidades

Las principales cualidades que conviene asignar al pavimento son: la seguridad, la rigidez, la durabilidad, la economía, la rugosidad, la flexibilidad y la comodidad, con el compromiso de balancear estratégicamente la *rigidez* y la *flexibilidad*, que son dos propiedades contrarias fundamentales que sobresalen. Desde luego que lo más importante es la seguridad del usuario y su comodidad inherente. Para lograr esto, es necesario dosificar los materiales constitutivos del pavimento para asegurar la flexibilidad, la rigidez y la rugosidad superficial necesaria, dentro de la economía bien entendida. Esto se puede lograr desplantando el pavimento sobre un apoyo firme y homogéneo, como se ilustra en la Fig. 5.1, siempre que se asegure un buen desplante en el terreno de cimentación (éste puede ser terreno natural o pavimento antiguo).

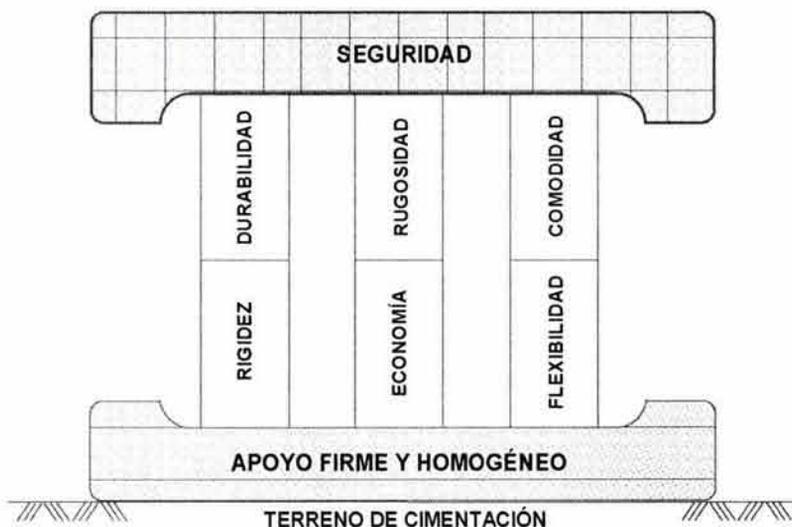


Figura 5.1 CUALIDADES DEL PAVIMENTO

La Fig. 5.1 representa un símil con un modelo de estabilidad, en que la falla o dislocamiento de cualquier elemento provoca la pérdida del equilibrio general y que no se logren las cualidades esperadas del pavimento, especialmente la seguridad para el usuario.

Se insiste en que si se concibe al pavimento como una obra ingenieril geotécnica, para asegurar lo más importante: la seguridad y la comodidad exigidas por el usuario, se requiere que la *rugosidad* de la superficie de rodamiento y la *durabilidad* implícita, dentro de la *economía* (la máxima relación beneficio/costo total actualizada), estén siempre presentes durante la vida útil de la obra.

## 5.2 Niveles de Calidad

Todas las cualidades del pavimento descritas anteriormente deben cumplir con los niveles de calidad característicos (Orozco-Santoyo, 1998a), tanto en geometría y acabados como en materiales y procedimientos constructivos, con el fin de deslindar las acciones de los responsables de la obra, como se ilustra en la Fig. 5.2 (Orozco-Santoyo, 1998b).

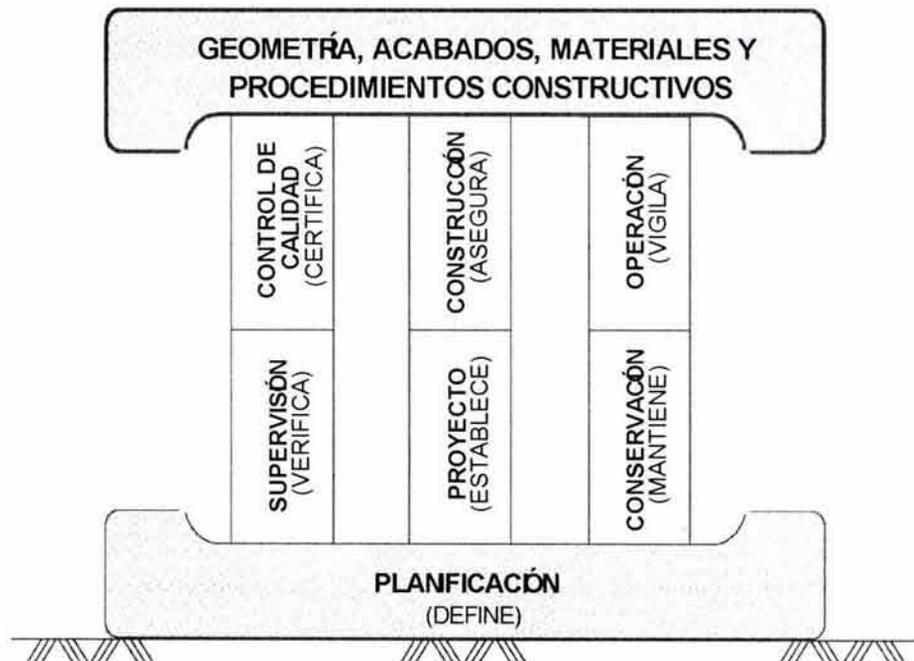


Figura 5.2 RESPONSABLES DEL NIVEL DE CALIDAD DEL PAVIMENTO

La construcción de las obras civiles de ingeniería, como los pavimentos, requiere previamente de una revisión minuciosa de los planos y las especificaciones de proyecto, así como de una eficiente supervisión y un cuidadoso control de calidad, con el fin de lograr que tales obras cumplan con su propósito (Orozco-Santoyo, 1998a a 2004), como se ilustra en la Foto 5.1.



Foto 5.1 Autopista Puebla-Orizaba, Cuerpo B, antes de la ampliación a cuatro carriles, SCT/CAPUFE

Normalmente, todas las actividades de una obra: planificación, proyecto, construcción, supervisión, control de calidad, conservación y operación, se desarrollan con cierta independencia, lo cual da motivo a deficiencias y a conflictos innecesarios entre los responsables de estas actividades. Esto se evita con un sistema integrado de acciones de retroalimentación constante y de actitud siempre positiva.

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

El control de calidad debe llevarse en cada una de las etapas de *previsión, acción e historia* y en todas las actividades de la obra. Además, se requiere que sea ágil y oportuno, con énfasis principal en la **Etapas de Acción** durante la construcción (Orozco-Santoyo, 1998a a 2004).

Siempre debe tenerse presente el enfoque geotécnico, el cual se considera que debe regular todo lo concerniente al proyecto, la construcción y la conservación de pavimentos (Orozco-Santoyo, 1998c, 1999 a, b y c).

### 5.3 Estructuración

Las principales capas que constituyen al pavimento son fundamentalmente: *rodamiento* (concreto asfáltico o hidráulico), *base*, *subbase*, *subrasante* y *subyacente*, como se ilustra en la Fig. 5.3. En ésta se indican los materiales idóneos, que se pueden combinar, para asegurar la capacidad estructural de las capas del pavimento, así definido en este trabajo.

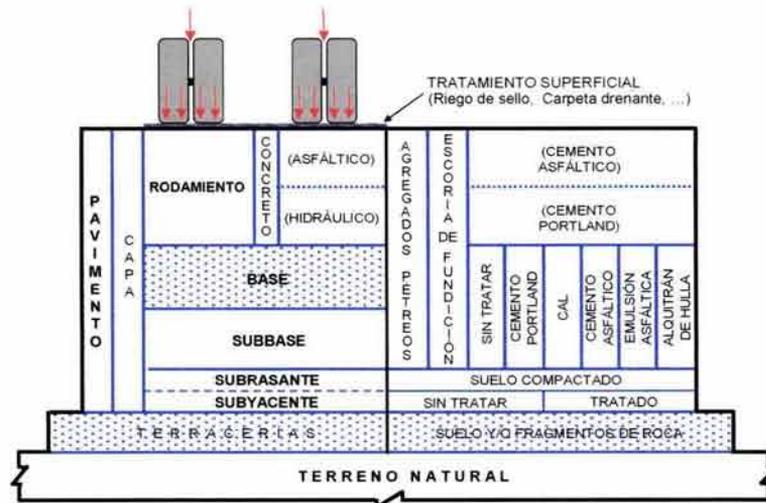


Figura 5.3 ESTRUCTURACIÓN DE PAVIMENTOS

Cualquier opción para proyecto, rehabilitación y/o reconstrucción de un pavimento deberá tomar en cuenta el aspecto económico completo; es decir, la relación beneficio/costo total actualizada, para la vida útil (o económica) que se asigne. Los aforos sistemáticos son indispensables para el seguimiento de actividades debidamente programado y la retroalimentación continua necesaria e indispensable para el proyecto (Foto 5.2). Esto debe establecerlo claramente el proyectista, desde un inicio, para que los demás responsables durante la conservación y la operación actúen de inmediato con los demás responsables involucrados [supervisión, control de calidad, construcción y operación (Orozco – Santoyo, 1998a)].



Foto 5.2 Autopista Gómez Palacio-Cuencamé-Yerbanís-Durango, aforos Servicios Técnicos, SCT, COCONAL/ACSA

# ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO CON SECCIÓN INVERTIDA

---

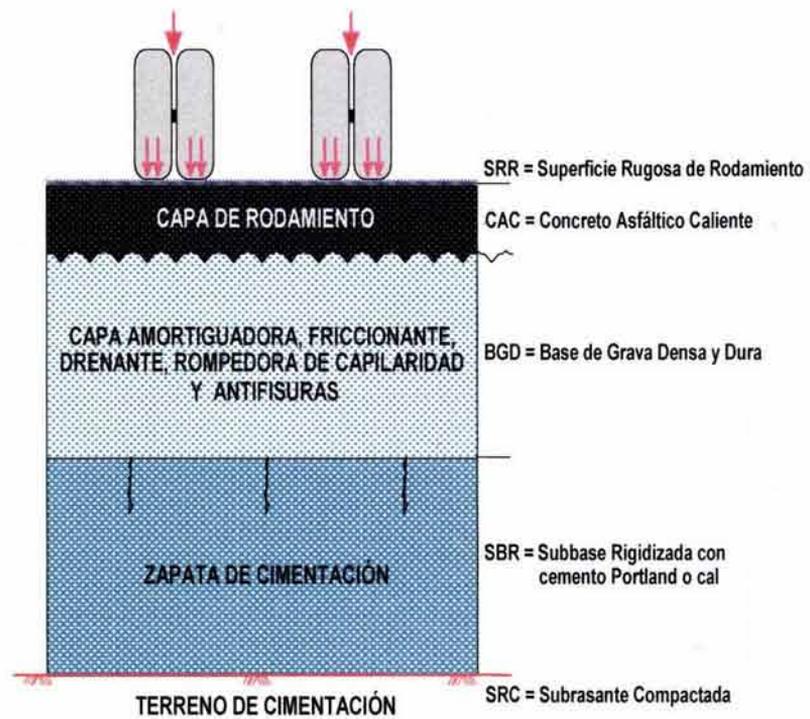
### 6.1 Generalidades

Conviene establecer que la Sección Invertida, cuya estructuración se esquematiza en la Fig. 6.1, propuesta hace más de dos décadas (Romo y Orozco-Santoyo, 1978 y 1990), se basa en el enfoque geotécnico, ya que la subbase rigidizada (SBR) cumple la función básica: **servir de zapata corrida de cimentación de la “obra”**, sobre la cual se coloca la capa de base de grava densa y dura (BGD), que cumple la misión de elemento amortiguador, friccionante, drenante, rompedor de capilaridad y antifisuras: evita la propagación de grietas y su reflexión hacia la capa de rodamiento. De preferencia, conviene que esta capa sea muy dura y densa, de tal manera que satisfaga los requisitos de calidad recomendados para aumentar su resistencia y disminuir su deformabilidad: graduación, uniformidad, compacidad y tamaño máximo (Alberro *et al*, 2002).

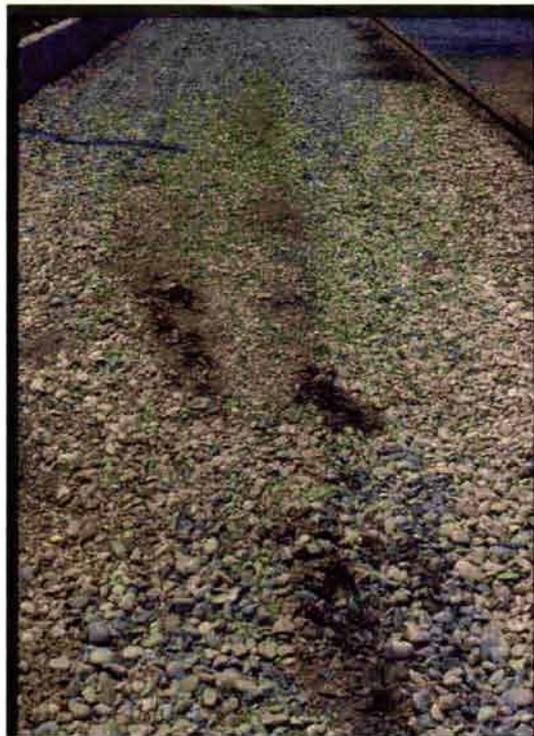
En la Sección Invertida para el pavimento del camino de acceso al P.H. Aguamilpa (CFE), en la base se utilizaron gravas del río Santiago (parcialmente trituradas para su aprovechamiento), con tamaño máximo de 2”; también se construyeron bases con grava de río en vialidades, como en las avenidas Lázaro Cárdenas y Coatzintla en Poza Rica, Ver (Foto 6.1). Los resultados han sido magníficos.

En otros casos, como en los pavimentos de las carreteras: Guadalajara-Ciudad Guzmán, Guadalajara-Zapotlanejo (Foto 6.2), México-Querétaro, México-Cuernavaca, México-Puebla, Puebla-Orizaba y vialidades en Xalapa, Ver., se ha utilizado grava principalmente basáltica (totalmente triturada), con excelentes resultados.

La capa de rodamiento, constituida por concreto asfáltico caliente (CAC), hace las veces de elemento confinante similar al del durmiente y la vía sobre el balasto (grueso) que, en los ferrocarriles, se viene utilizando en México desde hace ya más de 160 años (Foto 6.3). La capa de base, constituida por grava con partículas densas y duras (BGD), es equivalente al balasto. Esta capa puede sustituirse, si se desea, por escoria de fundición dura y seleccionada o residuos mineros gruesos y duros.



**Figura 6.1 PAVIMENTO CON SECCIÓN INVERTIDA (ENFOQUE GEOTÉCNICO)**



**Foto 6.1 Base de grava densa y dura (BGD) del río Cazones  
Av. Coatzintla, Poza Rica, Ver**

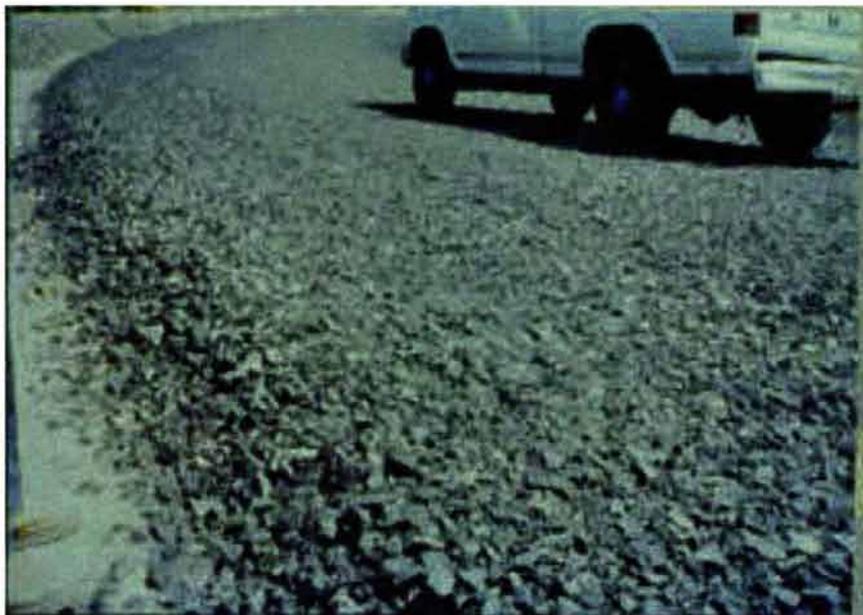


Foto 6.2 Guadalajara-Zapotlanejo, Base de Grava Basáltica Totalmente Triturada (BGT)



Foto 6.3 Balasto de Ferrocarril

Los trabajos preliminares sobre el mecanismo teórico (Romo y Orozco-Santoyo, 1978) y sus aplicaciones con el método del elemento finito, han tenido buena correlación con los resultados prácticos (Romo y Orozco-Santoyo, 1990; Romo y Torres, 1993; Orozco-Santoyo y Torres, 1994).

Por ejemplo, si la rigidez relativa entre las capas SBR y BGD es del doble (el módulo elástico de la SBR = 2 veces el módulo elástico de la BGD), los desplazamientos verticales se reducen a la mitad y la vida útil se duplica. En la Fig. 6.2 se observa que los desplazamientos verticales disminuyen en 50% (de 1.6 a 0.8 mm, aproximadamente) en el primer sensor (bajo la carga); se observa que en los sensores (en este caso: sismómetros) más alejados ( $S_5$ ,  $S_6$  y  $S_7$ ), el efecto de la carga es despreciable en los desplazamientos verticales registrados. Estas observaciones corresponden a un tramo de prueba en la Autopista Guadalajara-Colima. La estructura del pavimento está formada por una subbase rigidizada con cemento Portland (5% y 10%), una base de grava basáltica totalmente triturada de 15 cm de espesor y tamaño máximo de 2", cubierta por 10 cm de concreto asfáltico compactado en caliente, con un excelente comportamiento por más de 15 años.

Hay muchos otros casos donde se observan los benéficos resultados de la aplicación de conceptos asociados con la Sección Invertida en autopistas y aeropistas, en contraste con las secciones convencionales (Fotos 6.4 a 6.9).

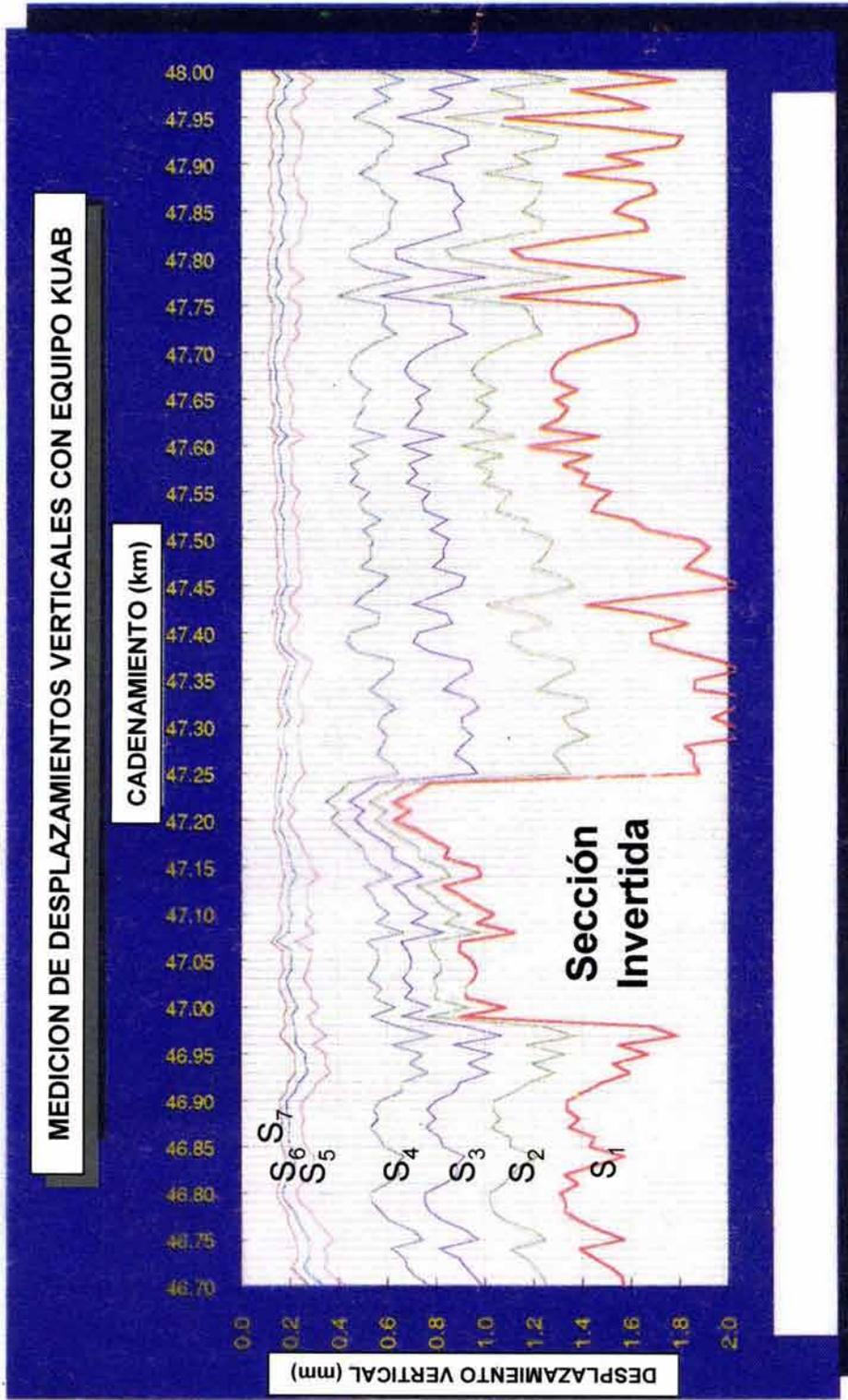
## 6.2 Comentarios

- Es muy conveniente insistir en que lo más importante para incrementar la vida útil de un pavimento, desde el punto de vista mecánico, es reducir las tensiones y los agrietamientos consiguientes en las carpetas asfálticas, motivo por el cual se ha considerado la Sección Invertida (Romo y Orozco-Santoyo, 1990), que consiste en la rigidización de las capas inferiores del pavimento para disminuir las deformaciones unitarias y los correspondientes esfuerzos en las diversas capas compactadas del pavimento. Esto conduce a mucho menores desplazamientos y deflexiones en la superficie de rodamiento, en comparación con las estructuras convencionales. Lo anterior conlleva al menor agrietamiento por tensión, menor fatiga y, por ende, mayor vida útil. Los costos de construcción se reducen debido a que se evitan los riegos de impregnación y de liga en la capa de base densa y dura (BGD) y el agua de compactación (que no se requiere), además de evitar mezclas innecesarias con otros suelos para alojar el material resultante dentro de una zona granulométrica prefijada.
- La justificación teórica de la Sección Invertida, así como su comparación convencional (comportamiento de los materiales, número de ciclos de carga para alcanzar la falla, efecto estructural de la carpeta asfáltica y tramos de prueba), fueron presentados en la XV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos (Romo y Orozco-Santoyo, 1990). Se hace notar que la estructura para proyectar, rehabilitar y/o reconstruir pavimentos más reciente corresponde a la Sección Invertida.



TESIS DOCTORAL DE MECÁNICA DE SUELOS  
M.I. RAÚL VICENTE OROZCO SANTOYO

AUTOPISTA: GUADALAJARA-COLIMA  
TRAMO: ACATLAN-COLIMA  
CUERPO B, CARRIL DE BAJA



PROMEDIO DE CARGA: 6,103 kg

(S = Sismómetro)

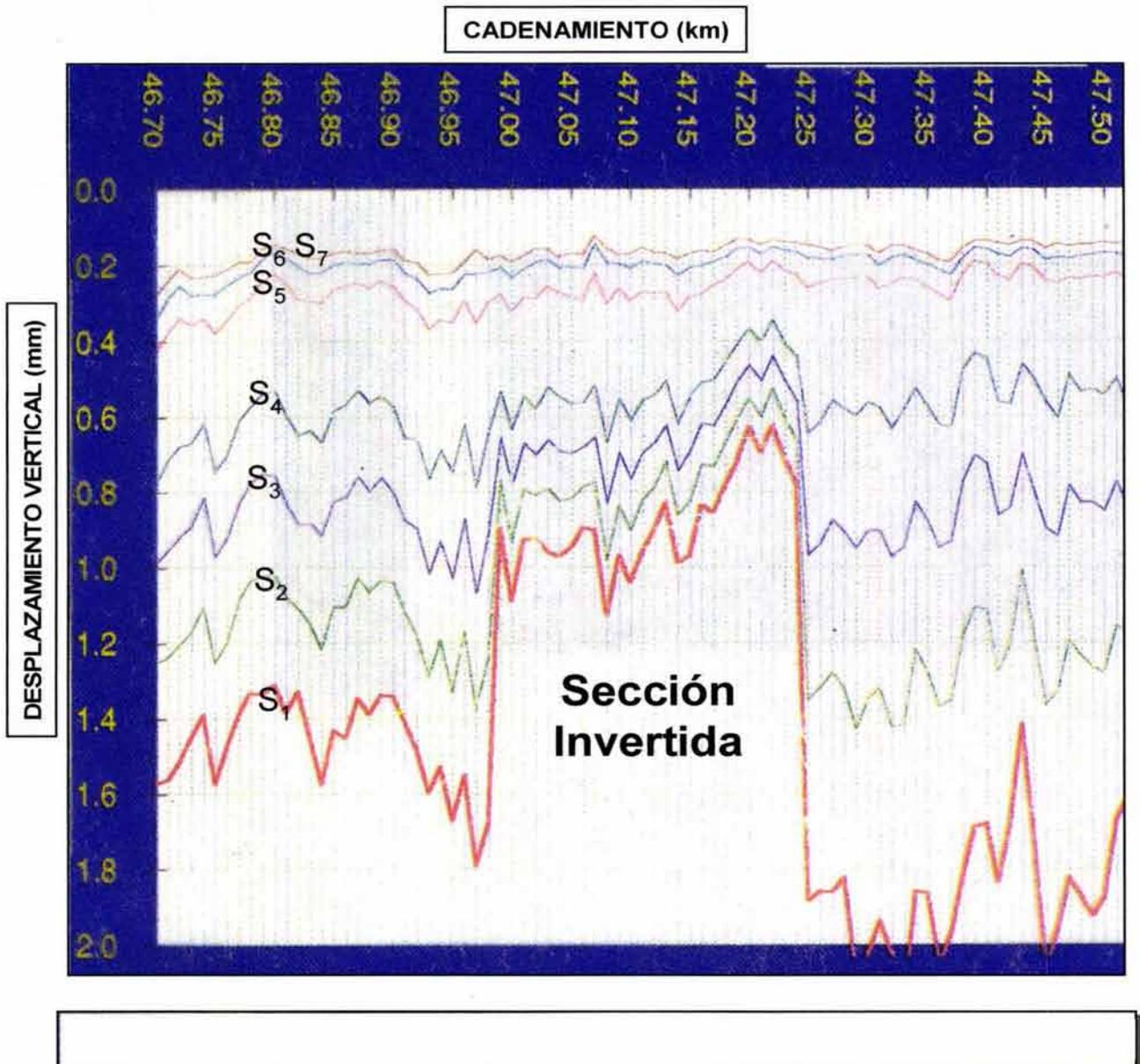
Figura 6.2a EFECTO DE LA SECCIÓN INVERTIDA EN LOS DESPLAZAMIENTOS VERTICALES

AUTOPISTA: GUADALAJARA-COLIMA  
 TRAMO: ACATLAN-COLIMA  
 CUERPO B, CARRIL DE BAJA



TESIS DOCTORAL DE MECÁNICA DE SUELOS  
 M.I. RAÚL VICENTE OROZCO SANTOYO

**MEDICION DE DESPLAZAMIENTOS VERTICALES CON EQUIPO KUAB**



(S=Sismómetro)

**Figura 6.2b EFECTO DE LA SECCIÓN INVERTIDA EN LOS DESPLAZAMIENTOS VERTICALES**  
 (Ampliación de la Fig 6.2a)

## Autopista México-Puebla, Tramo: Puebla-Acatzingo



Foto 6.4 Cuerpo antiguo (B). Base triturada de gravas gruesas calizas, sin finos arcillosos como matriz. Excelente resultado en más de 30 años



Foto 6.5 Cuerpo nuevo (A). Base triturada de gravas chicas andesíticas, con mucha arcilla como matriz. Pésimo resultado en menos de 4 años

## Autopista México-Puebla. Tramo Puebla-Acatzingo

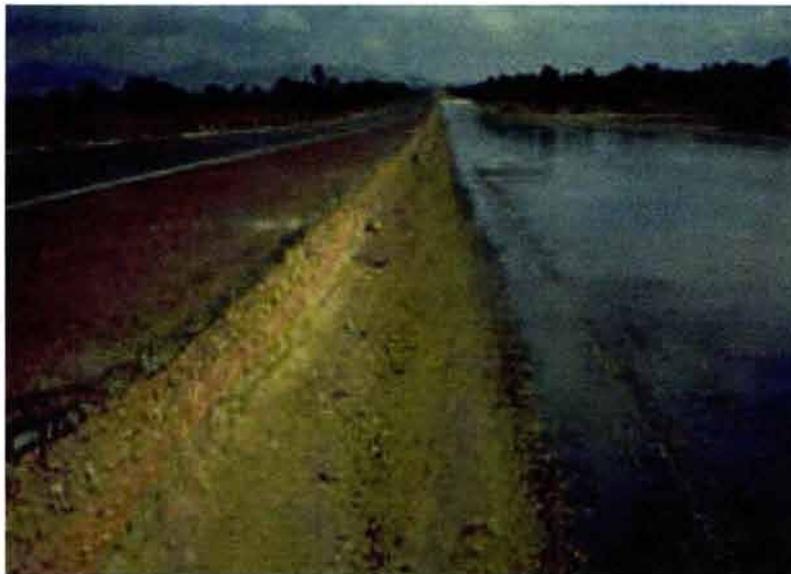


Foto 6.6 Cuerpo antiguo (B). Lado izquierdo con buen comportamiento y amplios acotamientos  
Cuerpo nuevo (A). Lado derecho con mal comportamiento y prácticamente sin acotamientos

Aeropuerto Durango, Dgo.  
Sustitución de pavimento arcilloso por Sección Invertida en plataforma



Foto 6.7 Retiro y desperdicio de la base arcillosa



Foto 6.8 Base totalmente triturada de 3" de tamaño máximo (BGT), apoyada en subbase rigidizada con cemento Portland (SBR)

Aeropuerto Durango, Dgo. (Plataforma de Operaciones)



Foto 6.9 Las grietas de reflexión se interrumpieron al sustituir el pavimento arcilloso con la Sección Invertida de grava triturada sin finos

## Capítulo 7 DETERIORO DEL PAVIMENTO

---

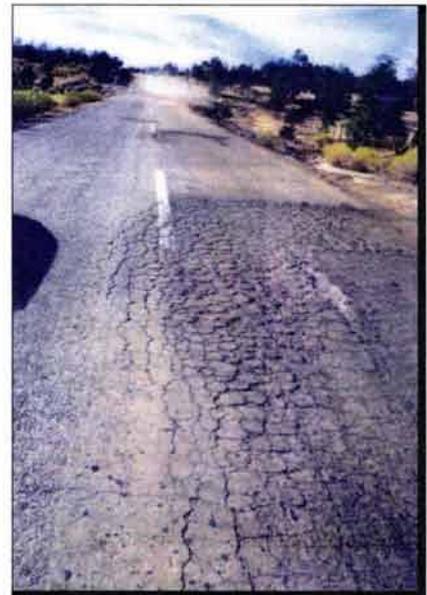
### 7.1 Factores básicos que influyen

Para que no ocurran las deficiencias que se presentan en las Fotos 7.1 y 7.2, es preciso reconocer que las causas del deterioro en el pavimento se deben fundamentalmente a las condiciones *ambientales* (sol, lluvia, viento, etc.), de *tránsito* (intensidad y frecuencia de aplicación de cargas) y de *capacidad estructural* de las capas (repetición de esfuerzos y deformaciones, desplazamientos verticales (deflexiones) y horizontales, variaciones de humedad, etc.), como se ilustra en la Fig. 7.1.

Foto 7.2 "Bache sobre bache"



Foto 7.1 Deterioro extremo del pavimento



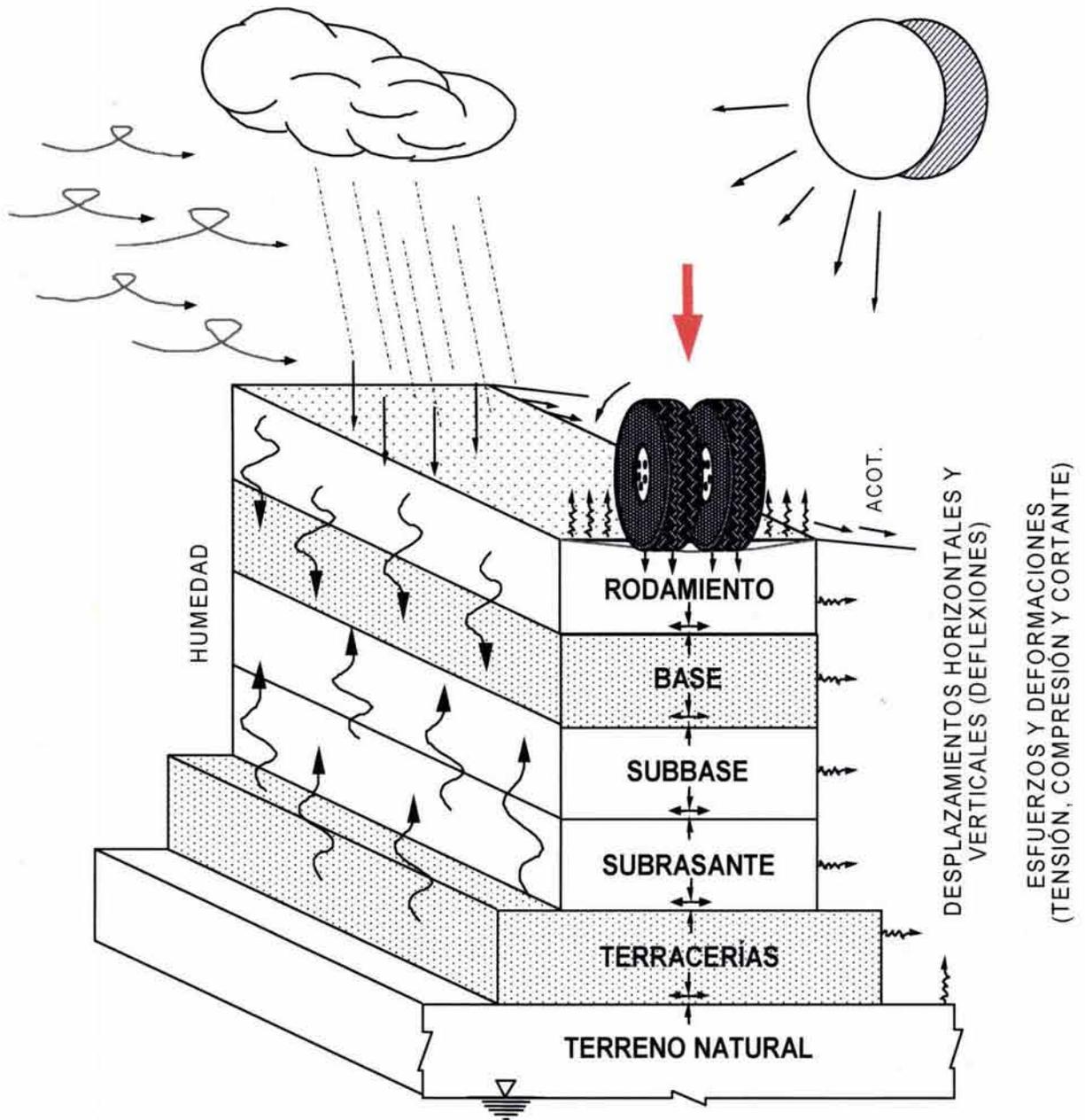
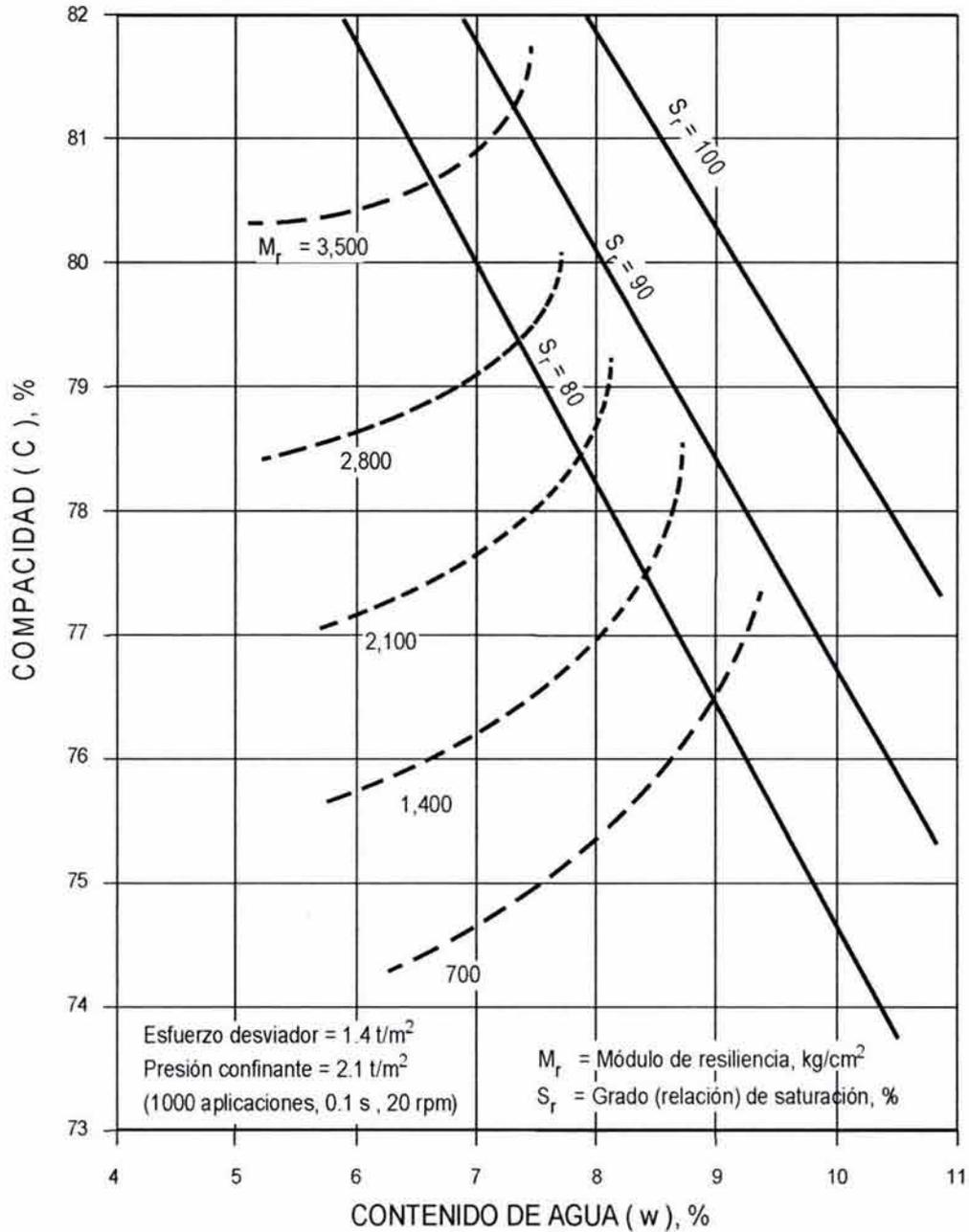


Figura 7.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL DETERIORO DEL PAVIMENTO

Todos estos factores deben considerarse en las diversas épocas del año, ya que, en algunos materiales, las propiedades interrelacionadas de **resistencia-deformabilidad-permeabilidad-tiempo** son susceptibles a los cambios de temperatura, humedad, etc. Por ejemplo, el módulo de resiliencia ( $M_r$ ) en suelos con finos arcillosos disminuye para una misma compactación (volumen de sólidos/volumen total) al aumentar el contenido de agua, según se presenta en las curvas **isocaracterísticas** del diagrama CAS (Orozco-Santoyo, 1978 y 1986), como se ilustra en la Fig. 7.2 (adaptación de datos; Monismith, 1992).



**Figura 7.2 DIAGRAMA “CAS” – CURVAS ISOCARACTERÍSTICAS DEL MÓDULO DE RESILIENCIA (Modificado de Monismith, 1992)**

### 7.2 Principal deterioro

En forma general, puede establecerse que el principal deterioro del pavimento se divide en *primario* (deformaciones-ondulamientos-agrietamientos) y *secundario* (deficiencias superficiales), según se presenta en la Fig. 7.3.



Figura 7.3 PRINCIPAL DETERIORO DEL PAVIMENTO

Para el deterioro *primario* deberán tomarse en cuenta aspectos como:

- La inestabilidad de taludes en el terraplén, que generalmente son fijos (1.5:1), independientemente de su altura y las propiedades de los materiales constitutivos
- La propagación gradual ascendente de grietas o fisuras que, algunas veces, es descendente (como en el caso de regiones con fuertes gradientes térmicos descendentes)
- El envejecimiento prematuro del asfalto, muchas veces por falta de uso (amasado)
- El enfriamiento brusco e intenso o calentamiento del concreto (asfáltico o hidráulico)
- La inestabilidad volumétrica de los suelos finos arcillosos (expansión/contracción), muchas veces compactados de más, por ignorancia, al transformar un suelo noble en conflictivo (expansivo)
- La consolidación irregular de las capas del pavimento que, en el caso de ser más rígidas, podría producir el efecto de "bombeo". Esto ocurre también, en ciertos casos, cuando la rigidez de la carpeta asfáltica es incompatible con las rigideces de las capas de apoyo

- g) La incapacidad estructural de las capas del pavimento, que puede inducir a la formación de roderas. En ocasiones, éstas se forman por el exceso en el espesor de las carpetas asfálticas
- h) Los movimientos diferenciales exagerados que, a veces, se debe al efecto heterogéneo provocado por las raíces de árboles aledaños (e.g., eucaliptos)
- i) El corrimiento de la carpeta asfáltica, por su falta de adherencia con la superficie de apoyo o por reblandecimiento general

En la Fig. 7.4 se indican en más detalle las causas de algunas deficiencias en los pavimentos, al tomar en cuenta los efectos del clima, los materiales y el tránsito. Por ejemplo:



\* A veces descendente

\*\* Por raíces de árboles, en ocasiones

**Figura 7.4 DETERIORO PRIMARIO DEL PAVIMENTO**

a) La inestabilidad volumétrica (Orozco-Santoyo, 1978) de los suelos finos arcillosos es generada por las variaciones cíclicas de humedad (fuertes lluvias e intensa evaporación), motivadas por los grandes cambios estacionales de temperatura en la región

b) La consolidación irregular está íntimamente ligada a la desviación espacial del espesor, la compacidad y/o a la humedad iniciales de las capas; cuando se infiltra el agua por las fisuras y/o se tiene un subdrenaje deficiente, se produce el reblandecimiento de los materiales subyacentes, con o sin pérdida de finos, lo cual da lugar al "bombeo" y a la consiguiente ruptura progresiva de las capas rigidizadas superiores

c) La incapacidad estructural del pavimento está relacionada con la insuficiencia en los espesores y en las rigideces relativas de las capas, lo cual da lugar al fenómeno de fatiga por la repetición de las cargas del tránsito, sobre todo cuando son de gran intensidad y/o frecuencia

d) Los movimientos diferenciales exagerados son motivados por los cambios de rigideces en estructuras u obras inducidas

e) El corrimiento de las carpetas asfálticas normalmente se debe al exceso de cemento asfáltico (reblandecimiento) o a la falta de liga (adherencia) entre capas

Es importante hacer notar que el agrietamiento de los pavimentos se puede calificar, además de los recorridos a pie, con el auxilio de los sistemas de reconocimiento óptico de agrietamientos, como el uniANALIZE, que parte de imágenes almacenadas en video digital (Foto 7.3), para medir el agrietamiento de la superficie del pavimento (EIOCSA, 2003). Este sistema se complementa con otros, como el uniSURVEY (imágenes de video digital y datos recopilados en un teclado especial y ligados a la lectura de un odómetro digital de alta precisión), para hacer una inspección del deterioro superficial. El uniAMS pertenece al sistema de administración de pavimentos de Samsung SDS, el cual incluye un programa de cómputo para el manejo del banco de datos numéricos y del sistema de información geográfica (véase el Anexo D).



Foto 7.3 Equipo de video digital para determinar el deterioro superficial de pavimentos

Lo más importante para el deterioro *secundario* (Fig. 7.3) es considerar el alisado y el desgranamiento de la superficie de rodamiento. El alisado propicia el derrapamiento o el efecto de acuaplaneo durante las lluvias (Orozco-Santoyo, 1998). En la Fig. 7.5 se presentan las principales causas de las deficiencias superficiales con más detalle, como se indica a continuación:

- El alisado se debe fundamentalmente al desgaste excesivo de los agregados o al alto grado de saturación ( $S_r$ ) del cemento asfáltico (Orozco-Santoyo, 1986)
- El desgranamiento se puede deber a la escasa adherencia entre los agregados y el aglutinante (Foto 7.4) o al bajo grado de saturación del cemento asfáltico (Orozco-Santoyo, 1986)



**Figura 7.5 DETERIORO SECUNDARIO DEL PAVIMENTO**

Autopista México-Puebla. Tramo: Esperanza-Cd. Mendoza, zona de acotamiento

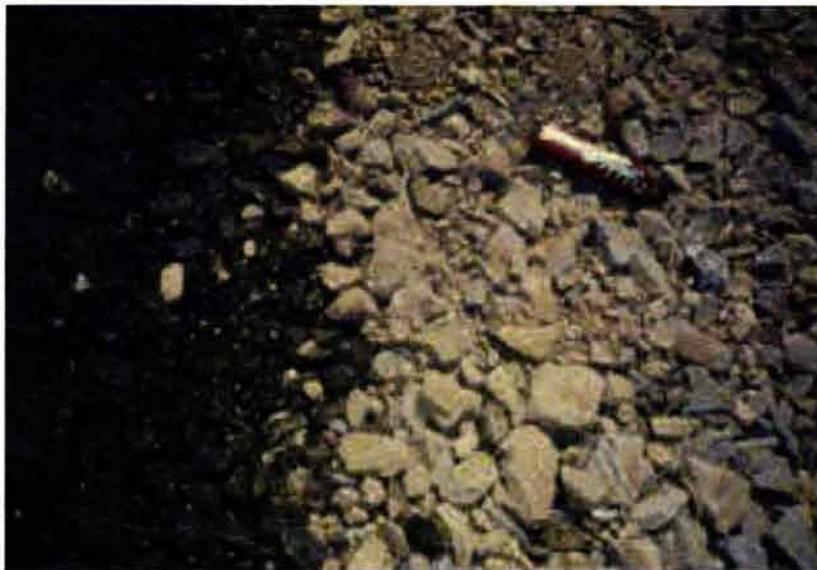


Foto 7.4 En todos los casos deben analizarse láminas petrográficas de los agregados, para conocer su buena adherencia con el cemento asfáltico y evitar sorpresas por la falta de afinidad; la foto se refiere a la Sección Invertida

El acuaplano (patinamiento sobre una lámina delgada de agua en la superficie de un pavimento) casi se evita con la inclusión de una carpeta asfáltica drenante (“graduación abierta” de agregados), efectivamente porosa y resistente, construida además sobre una carpeta asfáltica impermeable (Orozco-Santoyo, 1998).

Conviene hacer notar que el mejor proyecto de una mezcla asfáltica densa corresponde al que tiene un grado (relación) de saturación ( $S_r$ ) comprendido entre 75 y 85 %, para un Módulo Marshall de 400 a 600  $\text{kg/cm}^2$  en carreteras y de 700 a 1000  $\text{kg/cm}^2$  en aeropistas (Orozco-Santoyo y Torres, 1986). El Módulo Marshall (Estabilidad/flujo/espesor) lo estableció el suscrito al observar que el módulo elástico obtenido con los datos de la prueba Marshall es un indicador sencillo del nivel de calidad, en cuanto al comportamiento mecánico de las carpetas asfálticas bajo el efecto del tránsito, ya que relaciona esfuerzos con deformaciones (Orozco – Santoyo, *et al* 1986). El criterio de la prueba Marshall no funciona (Estabilidad mínima: 700 a 1000 kg y flujo de 2 a 4 mm). Recuérdese que en la tecnología del concreto asfáltico se utiliza todavía la prueba Marshall (desde la época de la segunda guerra mundial), que consiste en ensayar diametralmente especímenes de 4” de diámetro por 2.5” de altura, elaborados por impacto en sus dos caras con un pisón y una altura de caída determinada, para dar la energía específica que se estipule.

## **PREVENCIÓN DE LA FATIGA EN LOS PAVIMENTOS**

---

La capacidad de carga (o estructural) en cada una de las capas del pavimento es función, entre otros factores, del número de repeticiones de carga en las mismas, además de su intensidad. Estas capas sufren un deterioro serio al no tomar en cuenta el nivel inadmisibles que requiere reconstrucción costosa, cuando ocurre el “deterioro crítico por fatiga” (Foto 8.1).

Según se ilustra en la Fig. 8.1, es preferible proceder oportunamente a la etapa de rehabilitación para reforzar (mejorar) la capacidad estructural de las capas del pavimento, dentro del nivel admisible recomendado, a partir de las pruebas de campo y de laboratorio programadas ex profeso. Obsérvese en la Fig. 8.1 cómo va decayendo la capacidad de carga en la estructura del pavimento, a medida que aumenta el número de repeticiones de carga.

Conviene decir aquí que para evaluar la capacidad de carga relativa, en esta tesis se propone un procedimiento para calificar el pavimento en una forma práctica, mediante el Índice Estructural ( $I_e$ ). Se considera que el  $I_e$  es un indicador muy útil para estimar dicha capacidad de carga relativa del pavimento, a fin de compararla con los niveles de calidad definidos como admisible e inadmisibles, según se ilustra en la Fig. 8.1; la Calificación estructural ( $C_e$ ) también se propone en esta tesis, a partir de  $I_e$ . Estos conceptos están “avalados” con el comportamiento real de pavimentos observado por el autor durante más de 15 años y se explican con más detalle en el Capítulo 10, inciso 10.2.

Cabe mencionar que lo más reciente en el ámbito internacional para mejorar la capacidad estructural de las carpetas asfálticas, tanto en aeropistas como en autopistas, consiste en el refuerzo a tensión logrado con las rejillas de fibra de vidrio adheridas sobre el pavimento deteriorado (con o sin fisuras), sobre las cuales se coloca una carpeta delgada de concreto asfáltico polimerizado (6Dsolutions, 2004).

## Carretera México-Oaxtepec, Tramo: Nepopoalco-Tlayacapan



Foto 8.1 Por negligencia se ha llegado a transitar fuera del camino

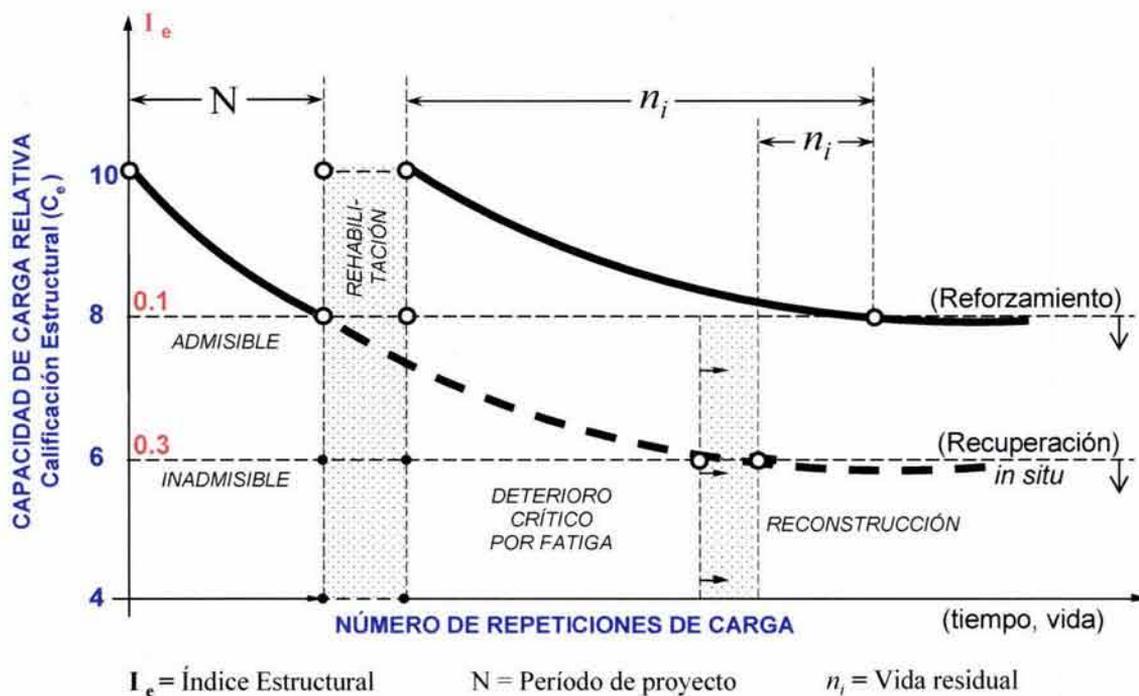


Figura 8.1 PREVENCIÓN DE LA FATIGA EN PAVIMENTOS

Es muy importante insistir en que debe conocerse bien el efecto de la repetición de las cargas en la disminución de la capacidad de carga de las capas, con el fin de tomar decisiones oportunas para la rehabilitación y/o la reconstrucción del pavimento, al mínimo costo.

## Capítulo 9

# CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES QUE CONSTITUYEN LAS CAPAS DEL PAVIMENTO

Para prevenir la fatiga en las capas del pavimento, es muy importante conocer los módulos elásticos de los materiales constitutivos, cuya caracterización se presenta en la Tabla 9.1. Es importante establecer que dicho **módulo elástico** corresponde al módulo elástico "dinámico" resultante del efecto debido a los deformómetros de impacto (FWD y HWD)

MATERIAL		MÓDULO ELÁSTICO (E), kg/cm <sup>2</sup>		RELACIÓN DE POISSON ( $\mu$ )
		RECOMENDADO	OBTENIDO *	
CONCRETO	ASFÁLTICO	30,000 a 40,000	5,000 a 60,000	0.35
	HIDRÁULICO	250,000 a 400,000	150,000 a 450,000	0.15 a 0.20
	COMPACTADO	70,000 a 120,000	40,000 a 100,000	0.25 a 0.35
SUELOS GRUESOS	BASES	3,000 a 5,000	1,500 a 4,000	0.40
	SUBBASES	2,000 a 4,000	700 a 2,000	
SUELOS FINOS	SUBRASANTE Y CAPAS INFERIORES	300 a 1,500	70 a 1,000	0.45

\* A partir de mediciones con el "deformómetro de impacto" (FWD y HWD)

**Tabla 9.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES PARA PAVIMENTOS**

A partir de mediciones efectuadas con deformómetros de impacto (Fotos 9.1 a 9.4), se han logrado obtener módulos elásticos en diferentes casos de la república mexicana (cerca de 60 mil km-carril estudiados).

## Deformómetros de Impacto

Aeropuerto Durango, Dgo.



Foto 9.1 FWD (Falling Weight Deflectometer)  
KUAB

Autopista México-Querétaro



Foto 9.2 HWD (Heavy Weight Deflectometer)  
DYNATEST



Foto 9.3 Placas de carga para aeropistas  
(45 cm) y carreteras (30 cm), KUAB

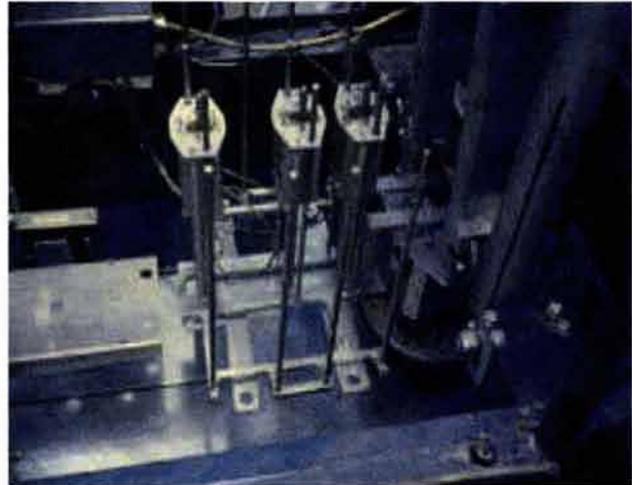


Foto 9.4 Sismómetros cercanos a la placa de  
carga, antes de abrir la compuerta de medición  
de desplazamientos verticales (KUAB)

En las Figs. 9.1 y 9.2 se presentan las cuencas de desplazamiento vertical (deflexión) obtenidas, donde se observa que los valores disminuyen a medida que se alejan los sensores de la zona de aplicación de la carga. A mayor desplazamiento vertical bajo la carga aplicada ( $\delta_1$ ) y más cercanía del punto de inflexión ( $p_i$ ), menor capacidad de carga se tendrá en las capas; a la inversa, a menor  $\delta_1$  y mayor  $p_i$ , más capacidad de carga habrá en las mismas; por eso se debe tomar en cuenta la importancia de dichos puntos de inflexión ( $p_i$ ) en la rigidez de las capas, ya que, a mayor rigidez de éstas, mayor alejamiento de  $p_i$  con respecto al centro de carga (Fig. 9.2). Precisamente, la relación  $(\delta_1/p_i) \times 100$  es un indicador adimensional muy útil (Índice Estructural,  $I_e$ ), el cual se propone en esta tesis y se describe en el Capítulo 10, inciso 10.2.

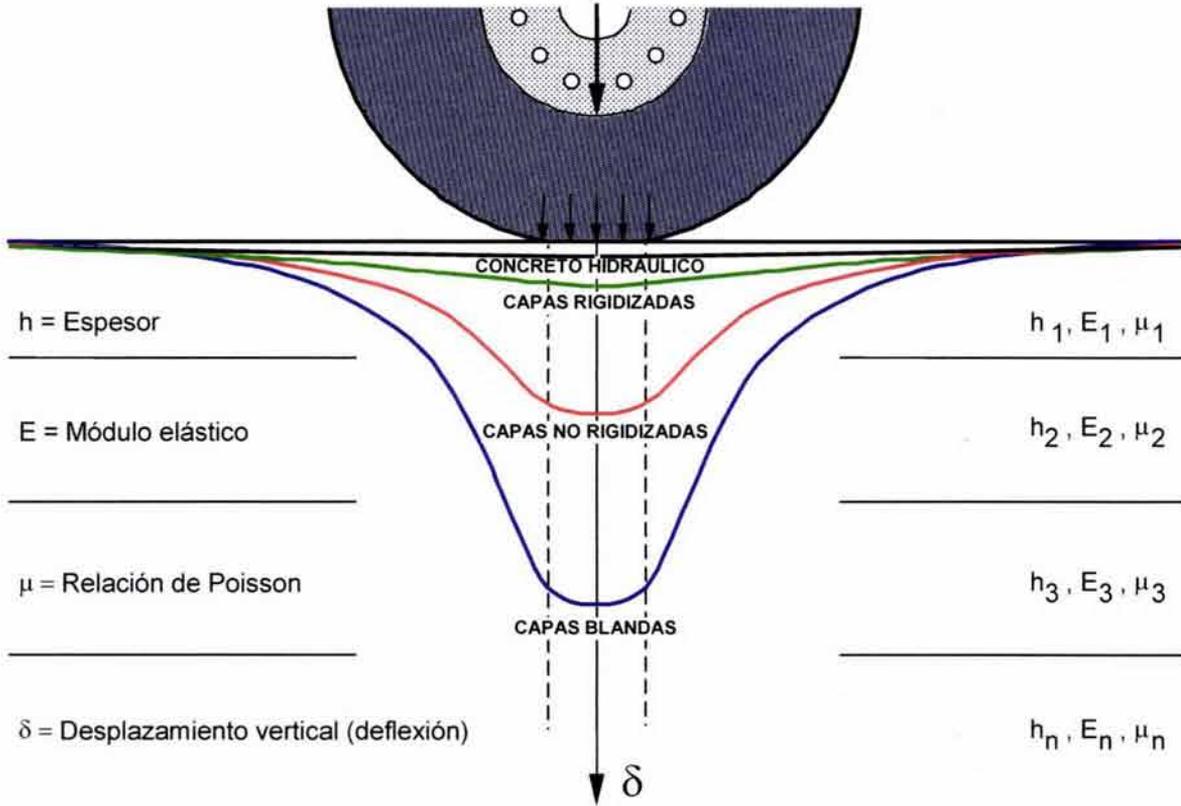


Figura 9.1 CUENCAS DE DESPLAZAMIENTO VERTICAL TÍPICAS

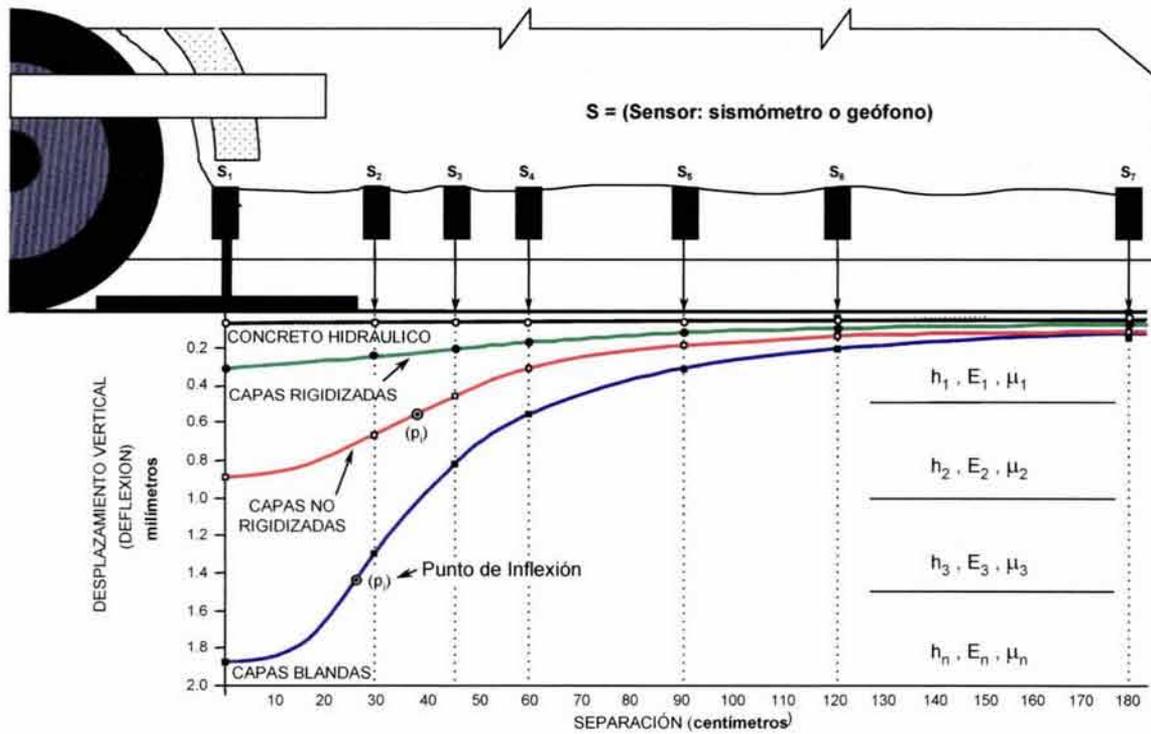
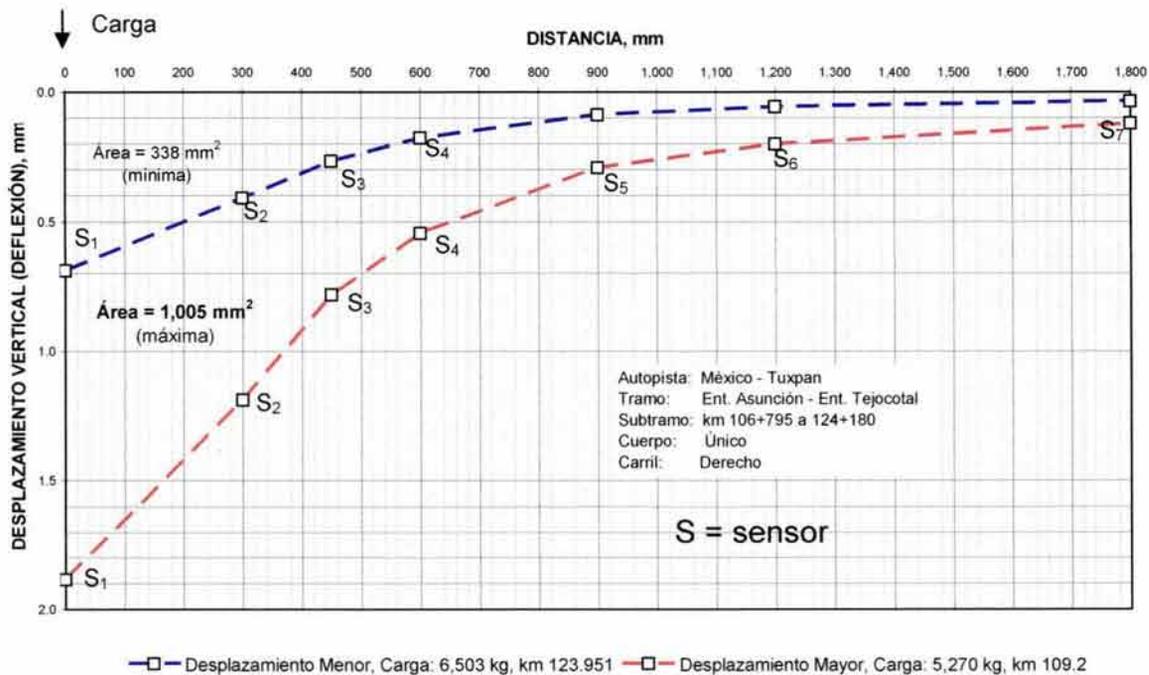


Figura 9.2 CUENCAS DE DESPLAZAMIENTO VERTICAL OBTENIDAS CON EL DEFORMÓMETRO DE IMPACTO

Los perfiles reales obtenidos con el deformómetro de impacto son, en general, similares a los ilustrados en la Fig. 9.3; se requiere ajustar los puntos medidos a la curva teórica para obtener los puntos de inflexión ( $p_i$ ), según se explica en el Capítulo 10, inciso 10.2. Es muy recomendable que en la zona comprendida entre los sensores  $S_1$  y  $S_2$  se coloque otro más, para delimitar mejor la cuenca de desplazamientos verticales y lograr mayor precisión en la ubicación de  $p_i$ .



**Figura 9.3 PERFILES REALES DE DESPLAZAMIENTOS VERTICALES OBTENIDOS CON EL DEFORMÓMETRO DE IMPACTO**

Conviene hacer notar que existen muchos equipos que permiten evaluar los pavimentos en forma no destructiva y, por ende, caracterizar los materiales constitutivos, como el deflectógrafo Lacroix (dos vigas Benkelman retráctiles montadas en un camión especial) y otros. Entre ellos destaca el Deformómetro Rodante (RWD, Rolling Weight Deflectometer), con mediciones continuas (a partir de cuatro rayos láser que detectan instantáneamente la cuenca de deflexiones), que simulan un comportamiento más parecido a la realidad, tanto para aeropistas como carreteras (Foto 9.5), pero únicamente con el efecto de “rebote elástico” (que refleja la recuperación que experimenta un pavimento después del paso de las cargas) y no con el de impacto (como el que producen las ruedas de los camiones o aviones). El FWD o HWD sí simulan el efecto de impacto referido.

Considero que conviene disponer de los equipos mencionados, para tomar en cuenta los dos efectos: “rebote elástico” (en forma continua) e impacto (de manera puntual), con el fin de caracterizar mejor las capas del pavimento; esto es motivo de investigaciones adicionales para correlacionar los dos efectos mencionados.

## Deformómetro Rodante

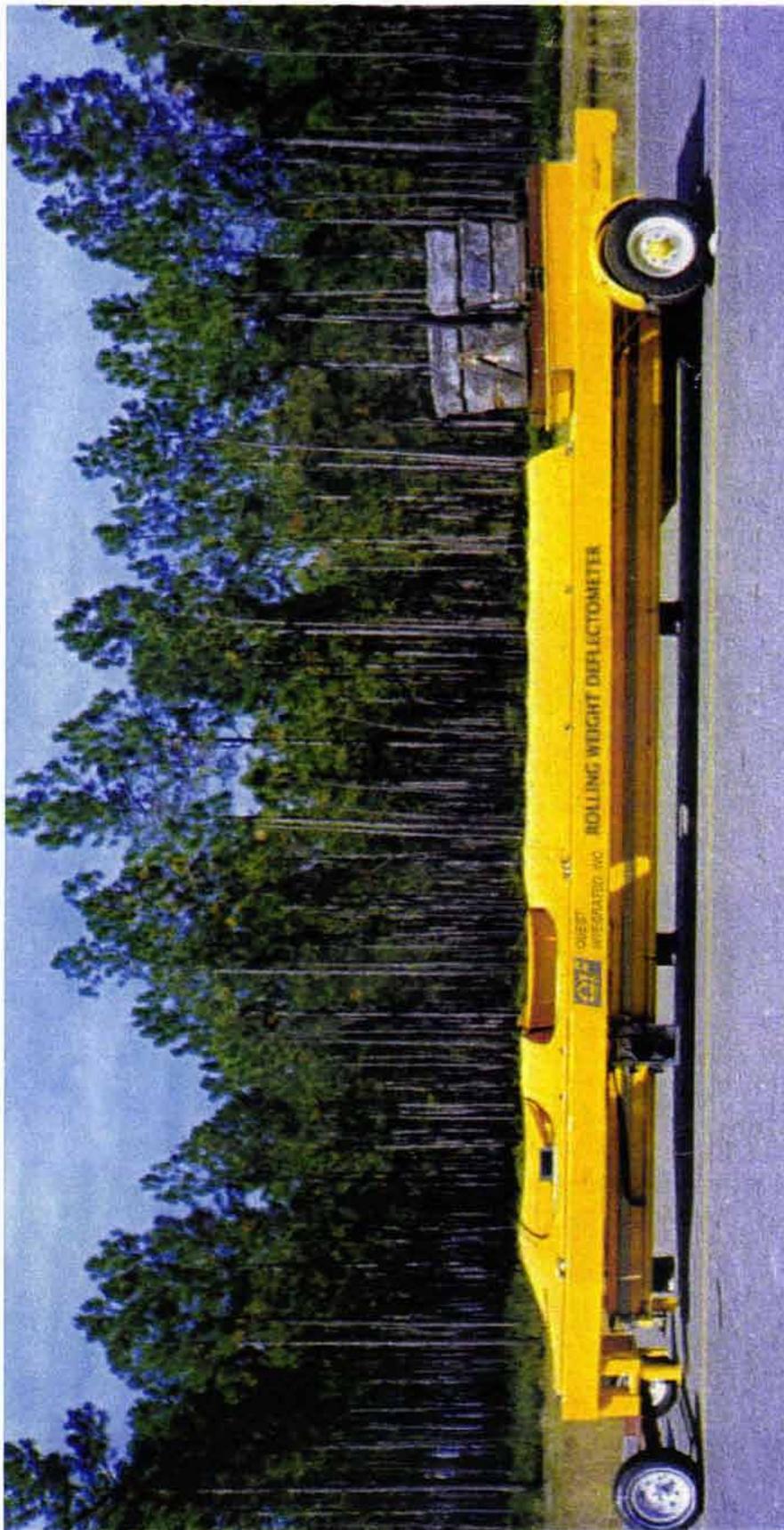


Foto 9.5. El RWD para aeropuertos prueba tanto pavimentos rígidos como flexibles, con cargas por rueda simple hasta de 50 mil lb. El que se utiliza en carreteras llega a cargas hasta de 18 mil lb

**Falta página**

**N°** 44

## Capítulo 10

# EVALUACIÓN DEL PAVIMENTO

---

### 10.1 Evaluación Superficial

Como ya se describió en capítulos anteriores, además del levantamiento directo (a pie) del deterioro del pavimento, se están efectuando mediciones con equipos no destructivos (sistemas óptico y láser), con el fin de coadyuvar en la evaluación superficial de pavimentos, como se presenta enseguida:

#### 10.1.1 Índice de Irregularidad Internacional (III)

La medición de la irregularidad de la superficie de rodamiento (véase la definición en el Capítulo 3, inciso 3.2) se está efectuando mediante un equipo de alto rendimiento (Clase 1), para luego calcular el III y obtener la profundidad de rodera (RVO y Cía, 2001), como se indica a continuación:

- El perfilómetro láser 5051 RSP 5.2 (Dynatest) es un sistema de dispositivos de medición instalados en una camioneta tipo "van", cuyo objetivo es obtener un diagnóstico de las irregularidades en la superficie de rodamiento de una vialidad (carretera, aeropista o calle), transitando a altas velocidades (hasta de 110 km/h). No se requieren dispositivos de seguridad especiales, como vehículos de escolta, bandereros, etc. Sin embargo, el equipo tiene una torreta ámbar y dos señalamientos luminosos que advierten al usuario de su presencia (véase Resumen, Fotos 1 y 2).

El diagnóstico se efectúa a través del perfil longitudinal (en ambas trayectorias de los neumáticos, denominadas "rodadas"), las secciones transversales, la profundidad de rodera y el cálculo del III.

Por la precisión de los dispositivos y sesgo de las mediciones del equipo, se cataloga como Clase 1, según las Normas ASTM E 950-94.

En México se han medido más de 120 mil km-carril con este equipo.

- El denominado "sistema láser" está formado por cinco emisores láser y sus correspondientes fotocaptore. Los sensores láser se encuentran alojados en una barra de aluminio (2.9 m de largo), la cual está montada en la defensa delantera de la camioneta (véase Resumen, Foto 1).

La función del "sistema láser" es obtener la sección transversal del carril de circulación. Para medir la sección en todo lo ancho del carril, los sensores láser de los extremos están colocados en forma angulada para tener una cobertura de 3.6 m (véase Resumen, Foto 2).

Durante el recorrido de la camioneta, los cinco fotocaptore van tomando lecturas a cada 10 cm. Esta información es enviada a un procesador y, posteriormente, a una computadora portátil, que están instalados en el vehículo.

- Para obtener el perfil longitudinal en ambas "rodadas" del carril, el equipo tiene dos acelerómetros de alta precisión, cuya función es determinar la aceleración vertical del vehículo en movimiento.

A partir del perfil longitudinal se calcula el III (Capítulo 3, inciso 3.2). El modelo físico que se sigue es el propuesto por el Banco Mundial, también conocido como "cuarto de coche" (Torres, 1998). Este modelo trata de reproducir el comportamiento de un vehículo que circula a una velocidad determinada y sigue las irregularidades de la superficie. Dicho movimiento es medido en forma de aceleración por los acelerómetros arriba mencionados (masas móviles).

Coloquialmente, es fácil escuchar que el III es el movimiento vertical acumulado en decímetros de la masa superior (que simula el asiento del conductor) al avanzar 100 m el modelo. Sin embargo, el III resulta algo más complejo de calcular, ya que estrictamente es la sumatoria o integral del valor absoluto de la diferencia de velocidades verticales de las masas superior e inferior (suspensión), para un recorrido determinado y en las condiciones determinadas (cuarto de coche), y todo dividido por el número de intervalos menos uno y por la velocidad del cuarto de coche (80 km/h).

Como puede verse, el III está concebido para cierta velocidad; sin embargo, el algoritmo del equipo permite que el perfil sea medido no sólo con una velocidad determinada, sino también a velocidades variables, sin afectar esto al cálculo del III.

- Como se mencionó en el inciso anterior, la velocidad de recorrido es fundamental para el correcto cálculo del III, por lo que el equipo está provisto de un dispositivo óptico que permite conocer la velocidad de circulación. En la rueda derecha del eje delantero del vehículo está instalado un transductor óptico que mide la velocidad de circulación y la distancia recorrida.
- El equipo recorre y recaba la información de los carriles de circulación que se escojan en la vialidad. Cabe mencionar que no se trabaja en condiciones de lluvia o con encharcamientos severos.

- Con la finalidad de manejar ágilmente la información que se genera, como producto se obtiene una base de datos en archivo tipo texto, que contiene la información del III a cada 20 m, así como su promedio por kilómetro.

Los resultados se ilustran en la Fig. 10.1. En ésta se representan los valores del III para cada rodada (derecha e izquierda) en los diferentes cadenamientos medidos, para la carretera Villahermosa – Cd. del Carmen (RVO y Cía., 2001).

### **10.1.2 Profundidad de rodera**

Se obtiene directamente de las secciones transversales, a partir de los mismos cinco puntos de medición indicados en el inciso anterior. Los resultados se ilustran en la Fig. 10.2, en la que se observan algunos valores altos de la carretera Villahermosa – Cd. del Carmen (RVO y Cía., 2001).

En general, si la profundidad de rodera es inferior a 5 mm, no se considera tratamiento alguno; si es mayor a 15 mm, sí hay necesidad de renivelar desbistar o fresar; si está comprendida entre 5 y 15 mm se tiene la zona de corrección, en que se puede re proyectar el pavimento.

### **10.1.3 Levantamiento de deterioro**

A fin de conocer el estado actual del pavimento por auscultar y obtener el levantamiento detallado de su deterioro, se efectúan varios recorridos a pie para llevar al cabo la inspección visual y detectar el grado de severidad de los daños más representativos. Estos se presentan en forma ordenada, para identificar, ubicar y agrupar los tipos de defecto, así como su severidad. Esto se ilustra en la Fig. 10.3, en que indica el deterioro típico: agrietamiento tipo "piel de cocodrilo", grieta de reflexión, rodera, exudación de asfalto, bache (reparado o abierto), desgaste y grieta longitudinal o transversal, en la carretera Villahermosa – Cd. del Carmen (RVO y Cía., 2001).

En el Anexo E se presentan los resultados obtenidos para cuatro carreteras (RVO y Cía., 2001), a partir de los datos ilustrados en los Planos 1, 3, 5 y 7.

## **10.2 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL**

Complementando lo descrito en capítulos anteriores, a continuación se presenta el proceso seguido para la evaluación estructural del pavimento, a partir de métodos de prueba no destructivos:

### **10.2.1 Medición de desplazamientos verticales**

La utilización del deformómetro de impacto (FWD: Falling Weight Deflectometer o HWD: Heavy Weight Deflectometer) permite la simulación del efecto producido al pavimento por el paso del tránsito vehicular, mediante la acción de caída libre (a diferentes alturas) de un peso controlado sobre una placa apoyada en la superficie de rodamiento, para transmitir así una carga específica a la estructura del pavimento (Fotos 9.1 y 9.2). La carga aplicada para autopistas varía de 2 a 8 t sobre una placa de 30 cm de diámetro; para aeropistas, de 3 a 15 t sobre una placa de 45 cm. Las placas de carga se ilustran en la Foto 9.3.



TESIS DOCTORAL EN MECÁNICA DE SUELOS  
M.I. RAÚL VICENTE OROZCO SANTOYO

Carretera: Villahermosa - Cd. Del Carmen  
Tramo: Villahermosa - Zacatal  
Subtramo: km 30 al 160  
Cuerpo: Único  
Carril: Derecho

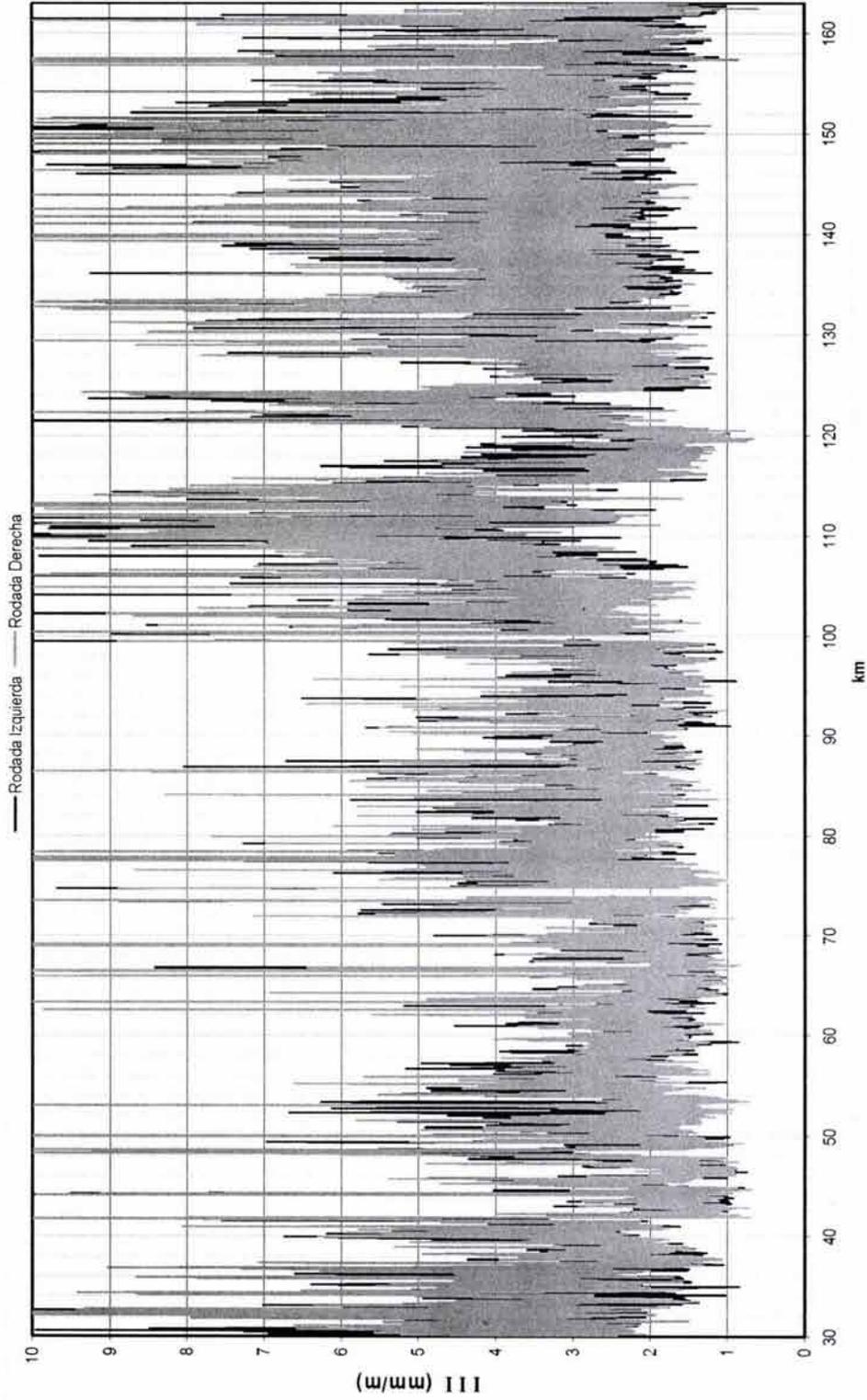


Figura 10.1 EVALUACIÓN SUPERFICIAL  
ÍNDICE DE IREGULARIDAD INTERNACIONAL (III)



TESIS DOCTORAL EN MECÁNICA DE SUELOS  
M.I. RAÚL VICENTE OROZCO SANTOYO

Carretera: Villahermosa - Cd. Del Carmen  
Tramo: Villahermosa - Zacatal  
Subtramo: km 30 al 160  
Cuerpo: Único  
Carril: Derecho

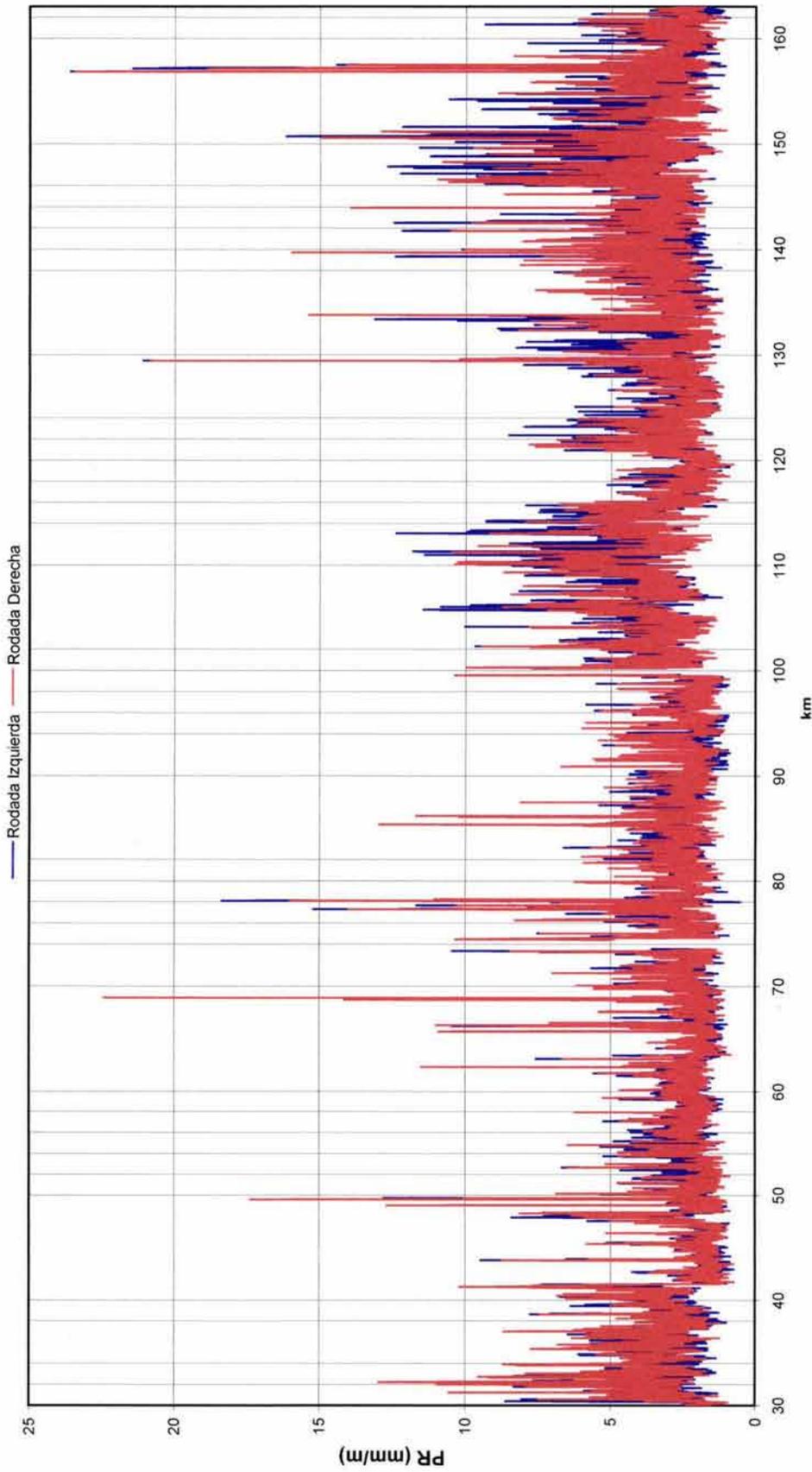
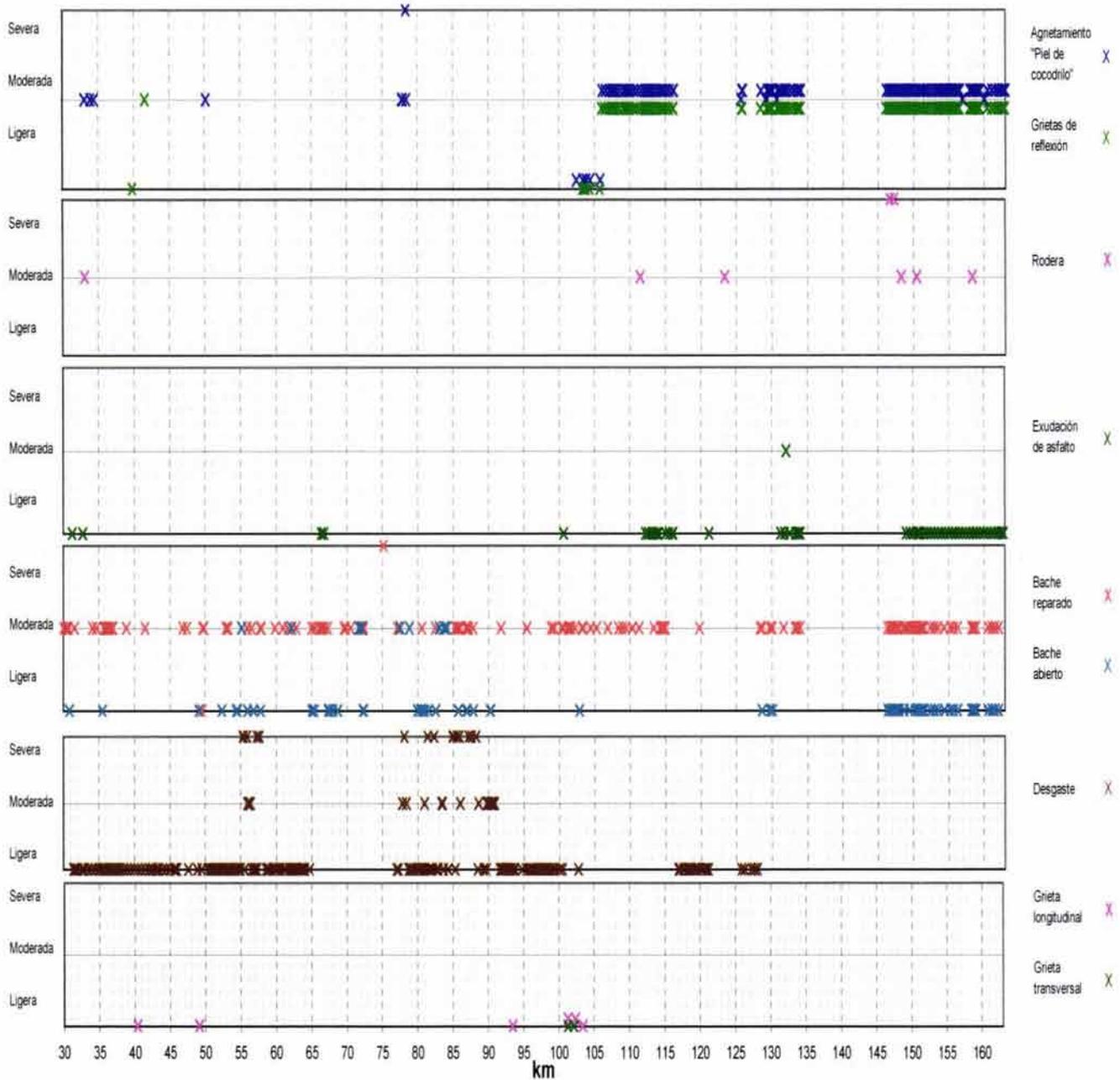


Figura 10.2 EVALUACIÓN SUPERFICIAL PROFUNDIDAD DE RODERA (PR)

Carretera: Villahermosa - Cd. Del Carmen  
 Tramo: Villahermosa - Zacatal  
 Subtramo: km 30 al 160  
 Cuerpo: Único  
 Carril: Derecho



TESIS DOCTORAL EN MECÁNICA DE SUELOS  
 M.I. RAÚL VICENTE OROZCO SANTOYO



**Figura 10.3 EVALUACIÓN SUPERFICIAL  
 LEVANTAMIENTO DE DETERIORO**

Los desplazamientos verticales debidos al efecto del impacto y sus tiempos de ocurrencia correspondientes, se registran por medio de 7 sensores espaciados a 30, 45, 60, 90, 120 y 180 cm (por ejemplo), a partir del sensor localizado bajo la carga, como se ilustra en la Fig. 9.4.

Para efectuar la medición de desplazamientos verticales (a cada 50 ó 100 m, o en "tresbolillo"), generalmente se selecciona la "rodada" derecha de los carriles del tramo en estudio.

Conviene mencionar que uno de los principales objetivos de las mediciones con el deformómetro de impacto es conocer la variación de los desplazamientos verticales a lo largo de una vialidad (carretera, aeropista o calle), para determinar los parámetros o indicadores que rigen el comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales constitutivos del pavimento. Un indicador directo e inmediato de la capacidad estructural de un pavimento es su respuesta (en forma de desplazamiento vertical) a la aplicación de una carga dinámica. En la Fig. 10.4 se presenta un ejemplo típico de resultados obtenidos en la carretera Villahermosa – Cd del Carmen (RVO y Cía., 2001), para los 7 sensores utilizados.

### 10.2.2 Índice Estructural ( $I_e$ )

Para cada prueba efectuada con el deformómetro de impacto, a partir de la cuenca de desplazamientos verticales (deflexiones), cuya influencia está asociada a la capacidad estructural del pavimento, se procede a obtener el Índice Estructural ( $I_e$ ), como se define en el párrafo siguiente. En la Fig. 10.5 se ilustran los resultados típicos obtenidos para las cuencas de desplazamientos verticales (carretera Villahermosa – Cd. del Carmen)

Después de efectuar varios ensayos y correlaciones entre diferentes variables aleatorias independientes e indicadoras de la respuesta estructural del pavimento, se propuso el siguiente parámetro adimensional:

$$I_e = \frac{\delta_1}{p_i} \times 100 \quad (10.2.1)$$

donde:

$I_e$  = Índice Estructural, adimensional

$\delta_1$  = desplazamiento vertical (deflexión) medido bajo el punto de aplicación de la carga (sensor 1,  $S_1$ ), en mm

$p_i$  = abscisa o distancia entre el eje vertical bajo la carga (sensor 1,  $S_1$ ) y el punto de inflexión obtenido de la curva (cuenca) ajustada de desplazamientos verticales, en mm

Como ejemplo, en las Figs. 10.6 a 10.8 se ilustran algunas curvas modeladas con apoyo en la ecuación de Boussinesq, correspondientes a los valores máximos observados para cinco casos de carreteras (RVO y Cía, 2001 y 2004). Ahí mismo, se presentan las características más importantes de cada curva: ( $\delta_i$ ,  $\rho_i$  y  $A$ ), así como el  $I_e$  correspondiente. La ecuación analizada es la siguiente:

$$\Delta = \frac{\delta_1}{1 + (5\lambda)^c} \quad (10.2.2)$$

donde:

$\Delta$  = deflexión calculada a cualquier distancia ( $r$ ), en mm

$\delta_1$  = deflexión medida en el punto de aplicación de la carga, en mm

$\lambda$  = relación de distancias, adimensional

$$\lambda = \frac{r}{R} \quad (10.2.3)$$

$r$  = distancia al punto de aplicación de la carga aplicada, en mm

$R$  = distancia al último sensor (sensor 7,  $S_7$ ) = 1800 mm

$$c = \left( \frac{\delta_1}{\delta_7} \right)^{0.26} \quad (10.2.4)$$

$c$  = factor de forma, adimensional

$\delta_7$  = deflexión medida en el sensor 7 (el más alejado de la carga aplicada), en mm

Para los mismos casos estudiados, en las Figs. 10.9 a 10.13 se presentan los valores completos (puntuales y promedio) de  $\bar{I}_e$ . En estas figuras, se muestran los valores medios de ( $\bar{I}_e$ ) por subtramos. Las correlaciones entre  $\delta_1$  y  $\rho_1$  se presentan en las Figs. 10.14 a 10.18, también para las carreteras consideradas en este trabajo, con las ecuaciones de regresión e indicadores de dispersión respectivos.



TESIS DOCTORAL EN MECÁNICA DE SUELOS  
M.I. RAÚL VICENTE OROZCO SANTOYO

Carretera: Villahermosa - Cd. del Carmen  
Tramo: Villahermosa - Zacatal  
Subtramo: km 30 al 160  
Cuerpo: Único  
Carril: Derecho

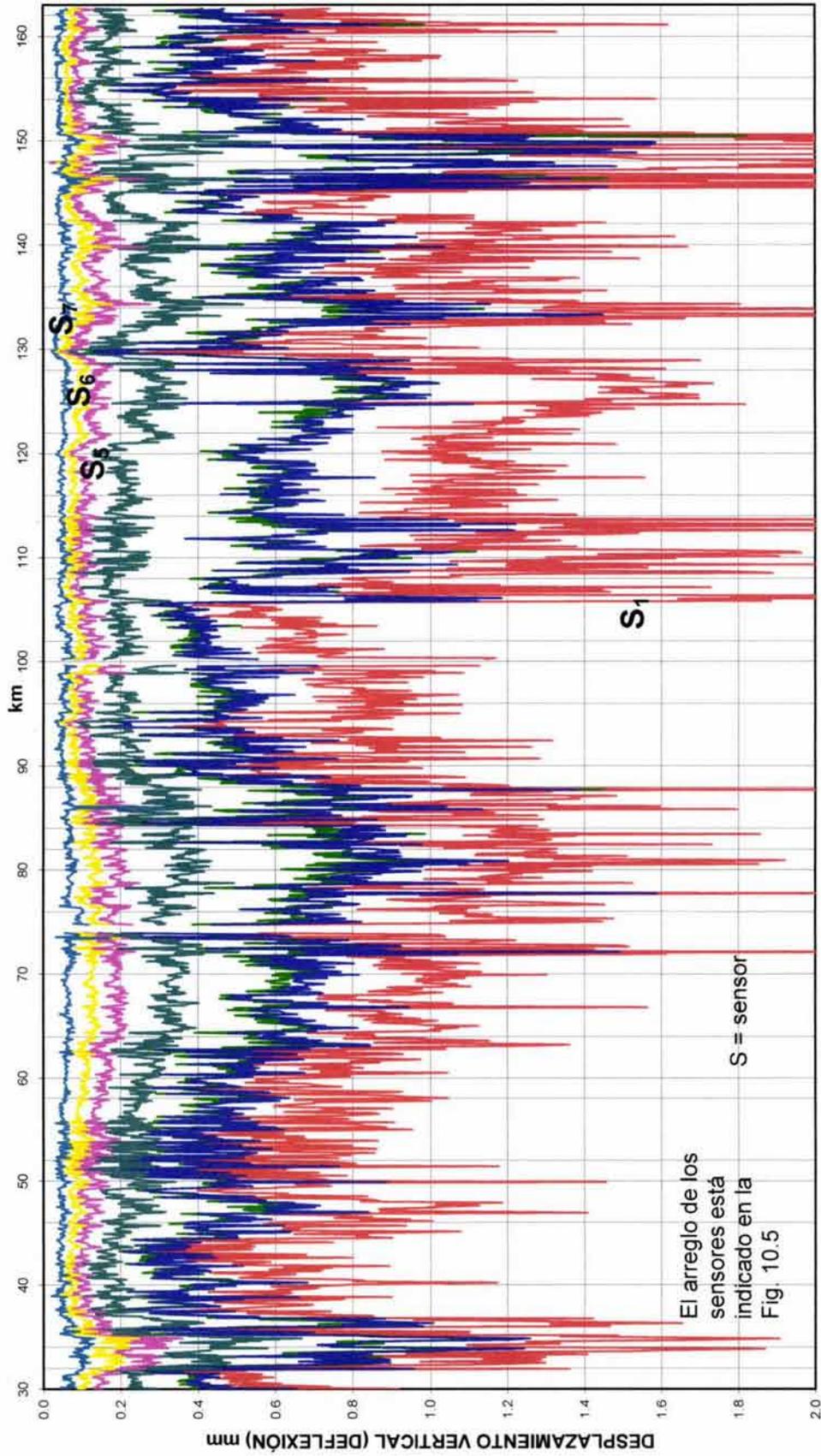


Figura 10.4 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL  
DESPLAZAMIENTOS VERTICALES



Carretera: Villahermosa - Cd. del Carmen  
 Tramo: Villahermosa - Zacatal  
 Subtramo: km 30 al 160  
 Cuerpo: Único  
 Carril: Derecho

TESIS DOCTORAL EN MECÁNICA DE SUELOS  
 M.I. RAÚL VICENTE OROZCO SANTOYO

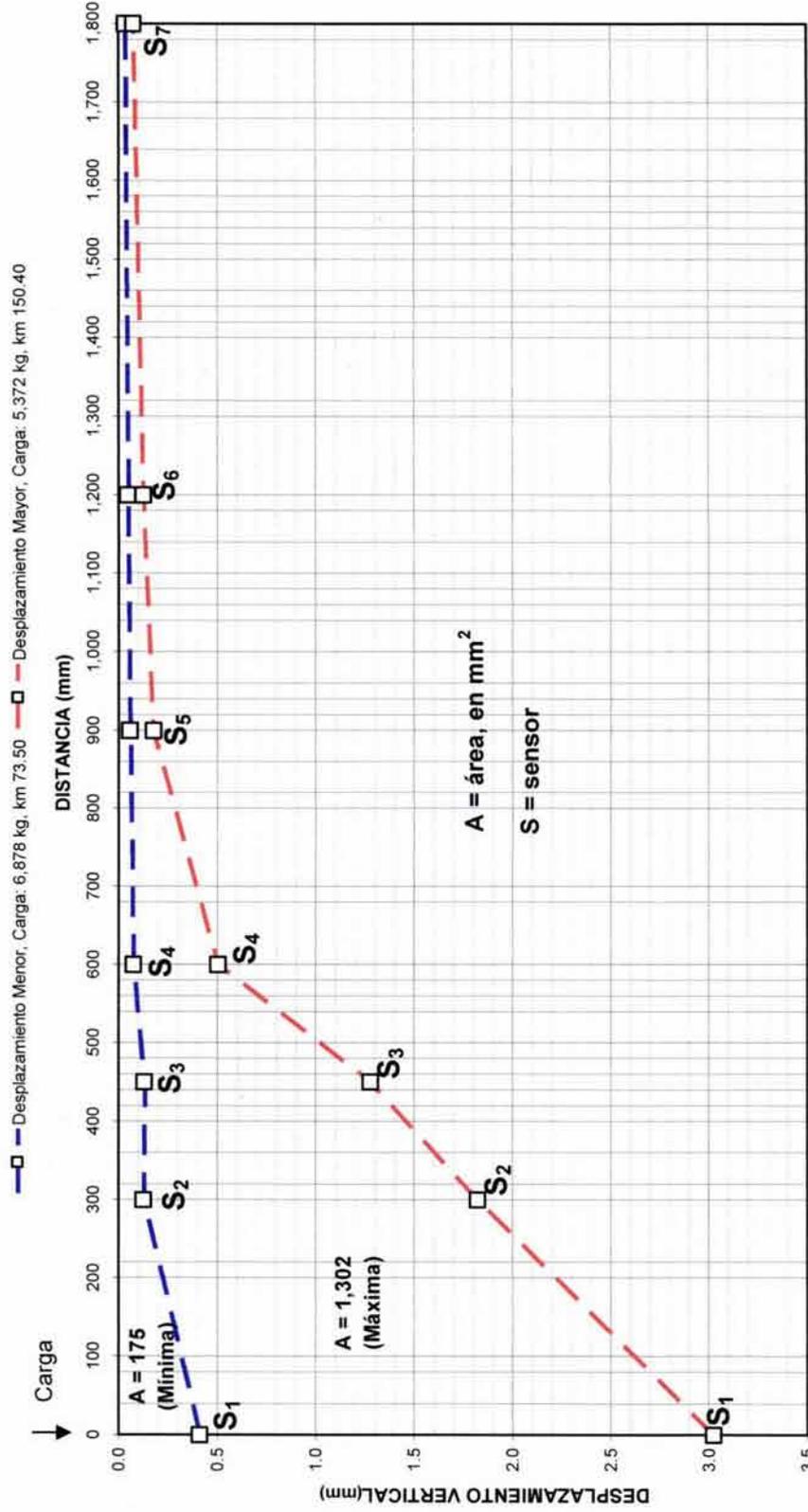


Figura 10.5 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL CUENCAS TÍPICAS DE DESPLAZAMIENTOS VERTICALES

$$\Delta = \frac{\delta_1}{1 + (5\lambda)^c}$$

- $\Delta$ : deflexión calculada a cualquier distancia, en mm
- $\delta_1$ : deflexión medida en el punto de aplicación de la carga, en mm
- $\delta_7$ : deflexión medida en el punto del último sensor, mm
- $\lambda$ : relación de distancias, adimensional
- $c$ : factor de forma, adimensional

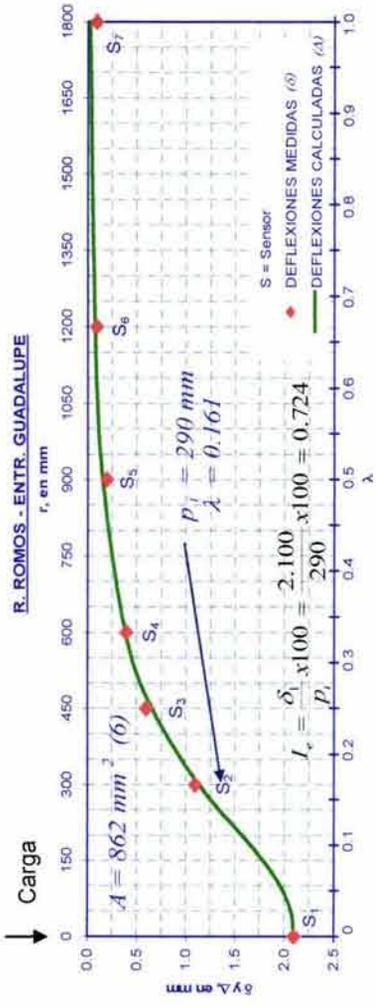
$$\lambda = \frac{r}{R}$$

- $r$ : distancia al punto de aplicación de la carga aplicada, en mm
- $R$ : distancia al último sensor ( $S_7$ ) = 1800, mm
- $A$ : área entre la curva calculada y el eje de las abscisas

**CASO 1**

**AGUASCALIENTES - RINCÓN DE ROMOS**

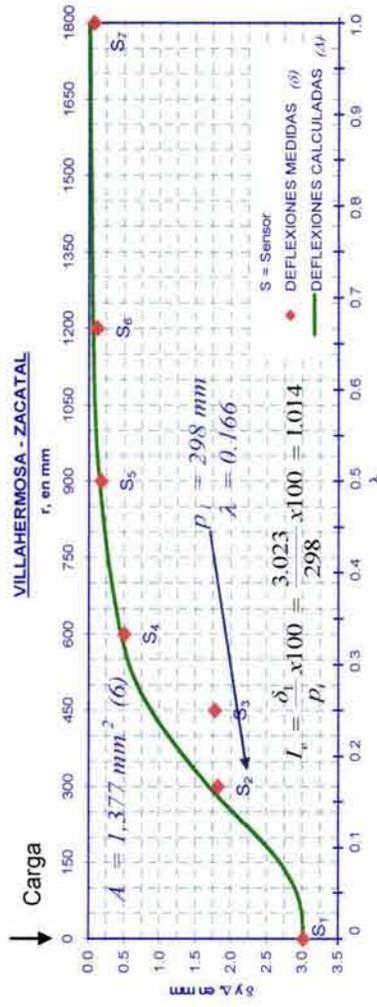
r (mm)	$\delta_1$ medida (mm)	c (adimensional)	$\lambda$ (adimensional)	$\Delta$ (mm)
0	2.100	2.207	0.00	2.100
50	-	2.207	0.03	2.068
100	-	2.207	0.06	1.960
150	-	2.207	0.08	1.785
200	-	2.207	0.11	1.571
300	1.100	2.207	0.17	1.136
450	0.600	2.207	0.25	0.656
600	0.400	2.207	0.33	0.388
900	0.200	2.207	0.50	0.160
1200	0.100	2.207	0.67	0.080
1800	0.100	2.207	1.00	0.029



**CASO 2**

**VILLAHERMOSA - ZACATAL**

r (mm)	$\delta_1$ medida (mm)	c (adimensional)	$\lambda$ (adimensional)	$\Delta$ (mm)
0	3.023	2.606	0.00	3.023
50	-	2.606	0.03	3.002
100	-	2.606	0.06	2.899
150	-	2.606	0.08	2.690
200	-	2.606	0.11	2.390
300	1.822	2.606	0.17	1.692
450	1.779	2.606	0.25	0.883
600	0.505	2.606	0.33	0.462
900	0.178	2.606	0.50	0.155
1200	0.127	2.606	0.67	0.067
1800	0.076	2.606	1.00	0.019



- S = sensor
- $p_i$  = abscisa al punto de inflexión, en mm
- $\delta_1$  = desplazamiento vertical (deflexión) bajo la carga ( $S_1$ ), en mm
- $A$  = área entre la curva y los ejes cartesianos

Figura 10.6 ECUACIÓN MODELADA DE LA CUENCA DE DEFLEXIONES (Boussinesq)

$$\Delta = \frac{\delta_1}{1 + (5\lambda)^c}$$

$\Delta$ : deflexión calculada a cualquier distancia, en mm

$\delta_1$ : deflexión medida en el punto de aplicación de la carga, en mm

$\delta_7$ : deflexión medida en el punto del último sensor, en mm

$\lambda$ : relación de distancias, adimensional  
 $c$ : factor de forma, adimensional

$$\lambda = \frac{r}{R}$$

$r$ : distancia al punto de aplicación de la carga aplicada, en mm

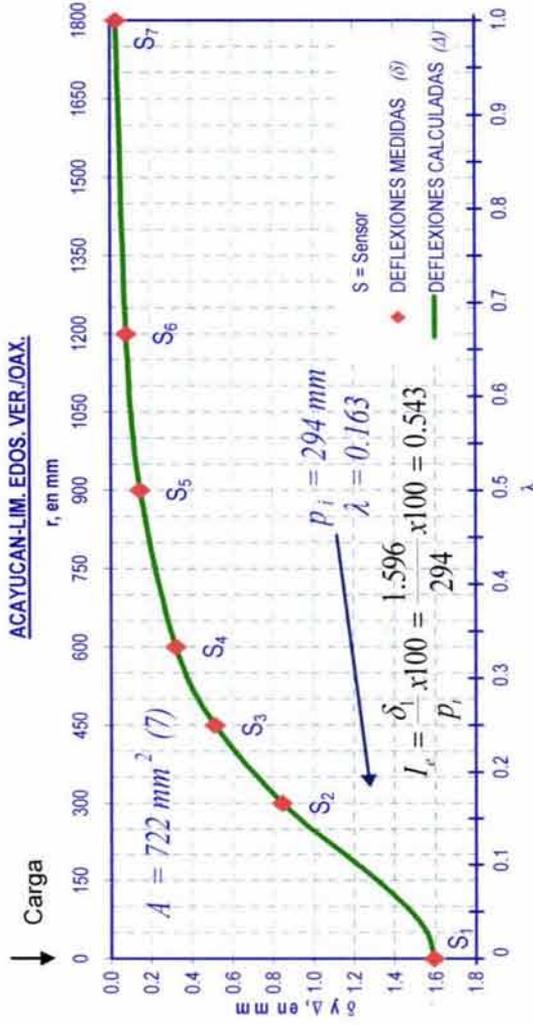
$R$ : distancia al último sensor ( $S_7$ ) = 1800 mm

$A$ : área entre la curva calculada y el eje de las abscisas

**CASO 3**

**ACAYUCAN-LIM. EDOS. VER./OAX.**

r (mm)	$\delta$ medida (mm)	c (adimensional)	$\lambda$ (adimensional)	$\Delta$ (mm)
0	1.596	1.995	0.00	1.596
50	-	1.995	0.03	1.559
100	-	1.995	0.06	1.459
150	-	1.995	0.08	1.316
200	-	1.995	0.11	1.155
300	0.643	1.995	0.17	0.847
450	0.473	1.995	0.25	0.516
600	0.370	1.995	0.33	0.325
900	0.238	1.995	0.50	0.149
1200	0.175	1.995	0.67	0.081
1800	0.112	1.995	1.00	0.032



S = sensor

$p_i$  = abscisa al punto de inflexión, en mm

$\delta_1$  = desplazamiento vertical (deflexión) bajo la carga ( $S_1$ ), en mm

$A$  = área entre la curva y los ejes cartesianos

**Figura 10.7 ECUACIÓN MODELADA DE LA CUENCA DE DEFLEXIONES (Boussinesq)**

$r$ : distancia al punto de aplicación de la carga aplicada, en mm  
 $R$ : distancia al último sensor ( $S_7$ ) = 1800 mm  
 $A$ : área entre la curva calculada y el eje de las abscisas

$$\lambda = \frac{r}{R}$$

$\Delta$ : deflexión calculada a cualquier distancia, en mm  
 $\delta_1$ : deflexión medida en el punto de aplicación de la carga, en mm  
 $\delta_7$ : deflexión medida en el punto del último sensor, en mm

$\lambda$ : relación de distancias, adimensional

$c$ : factor de forma, adimensional

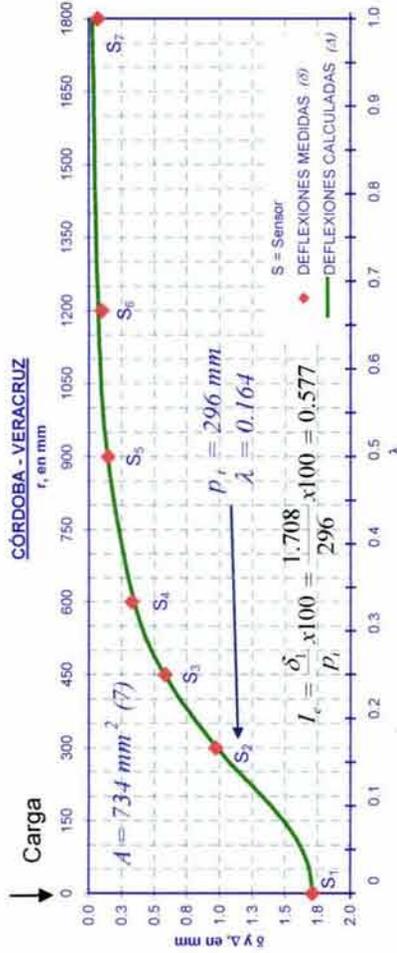
$$c = \left( \frac{\delta_1}{\delta_7} \right)^{0.26}$$

$$\Delta = \frac{\delta_1}{1 + (5\lambda)^c}$$

**CASO 4**

**CÓRDOBA - VERACRUZ**

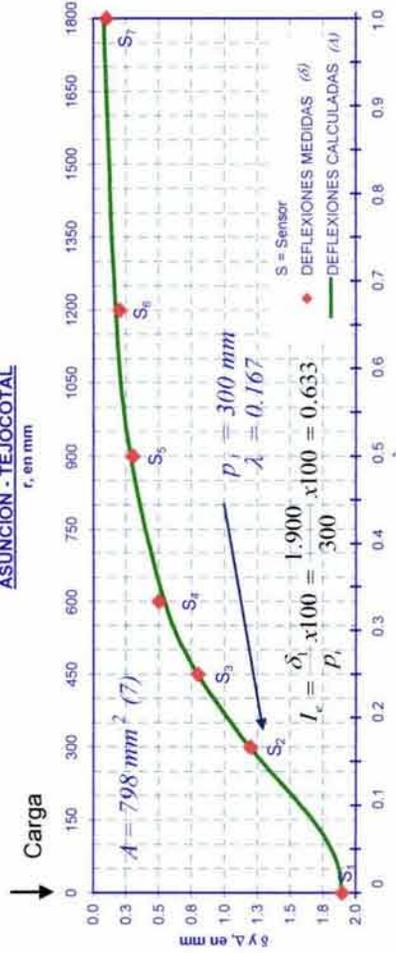
r (mm)	$\delta$ medida (mm)	$\lambda$ (adimensional)	c (adimensional)	$\Delta$ (mm)
0	1.708	0.00	2.312	1.708
50	-	0.03	2.312	1.689
100	-	0.06	2.312	1.616
150	-	0.08	2.312	1.490
200	-	0.11	2.312	1.328
300	0.904	0.17	2.312	0.981
450	0.538	0.25	2.312	0.579
600	0.328	0.33	2.312	0.347
900	0.149	0.50	2.312	0.147
1200	0.122	0.67	2.312	0.075
1800	0.068	1.00	2.312	0.028



**CASO 5**

**ASUNCIÓN - TEJOCOTAL**

r (mm)	$\delta$ medida (mm)	$\lambda$ (adimensional)	c (adimensional)	$\Delta$ (mm)
0	1.900	0.00	2.150	1.900
50	-	0.03	2.150	1.876
100	-	0.06	2.150	1.797
150	-	0.08	2.150	1.673
200	-	0.11	2.150	1.519
300	1.200	0.17	2.150	1.194
450	0.800	0.25	2.150	0.800
600	0.500	0.33	2.150	0.546
900	0.300	0.50	2.150	0.287
1200	0.200	0.67	2.150	0.173
1800	0.100	1.00	2.150	0.082



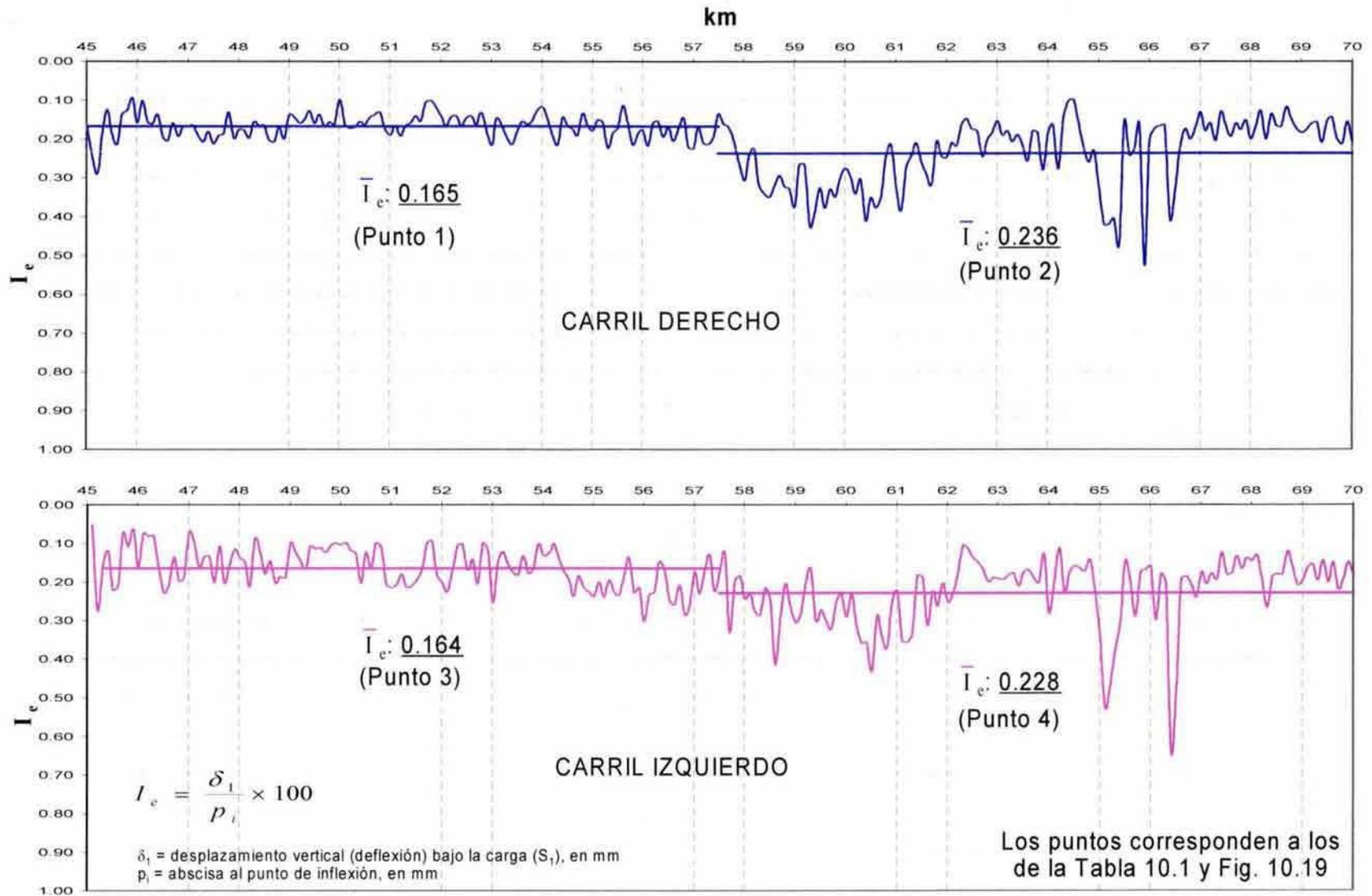
S = sensor

$p_1$  = abscisa al punto de inflexión, en mm

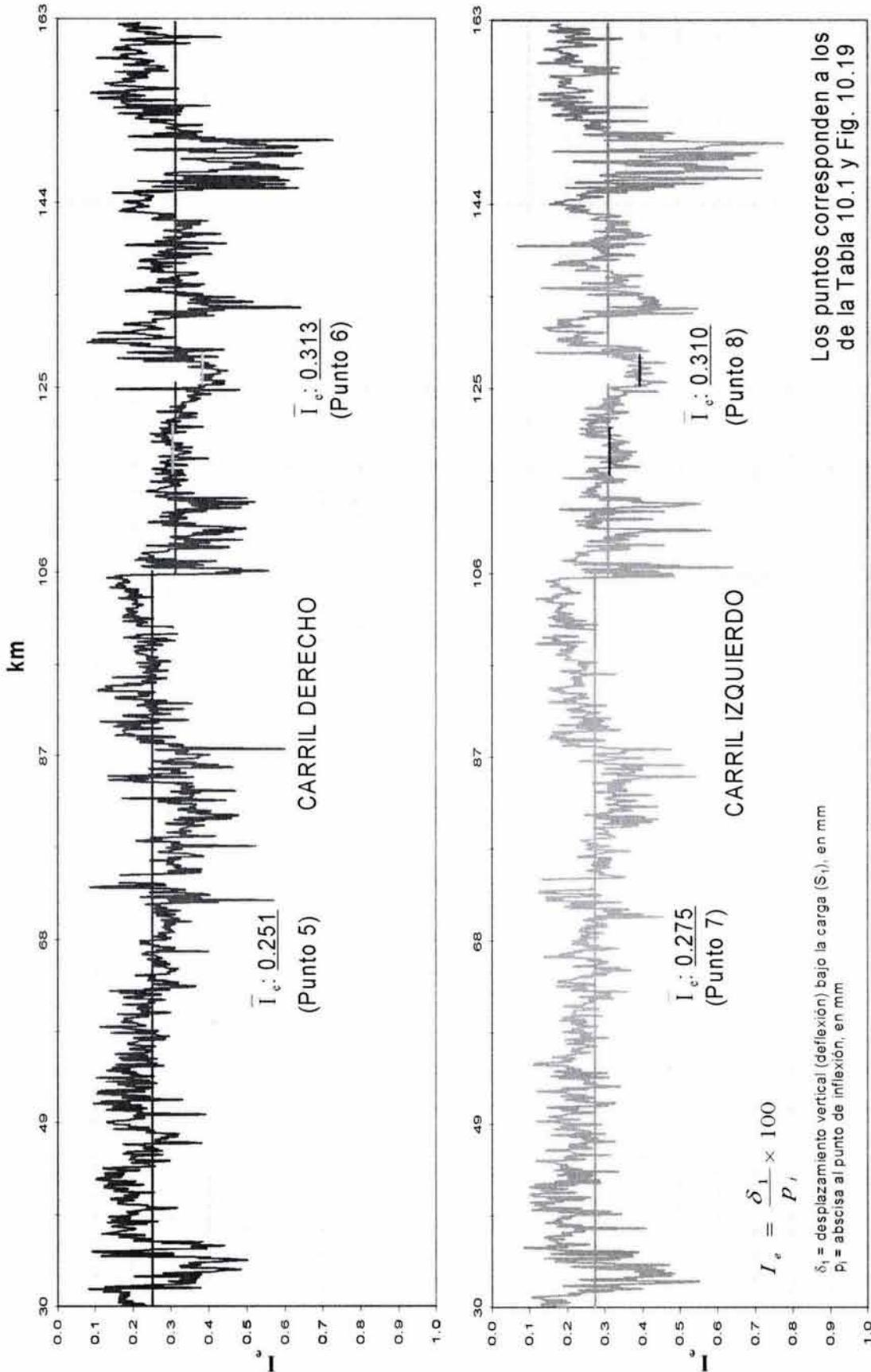
$\delta_1$  = desplazamiento vertical (deflexión) bajo la carga ( $S_1$ ), en mm

A = área entre la curva y los ejes cartesianos

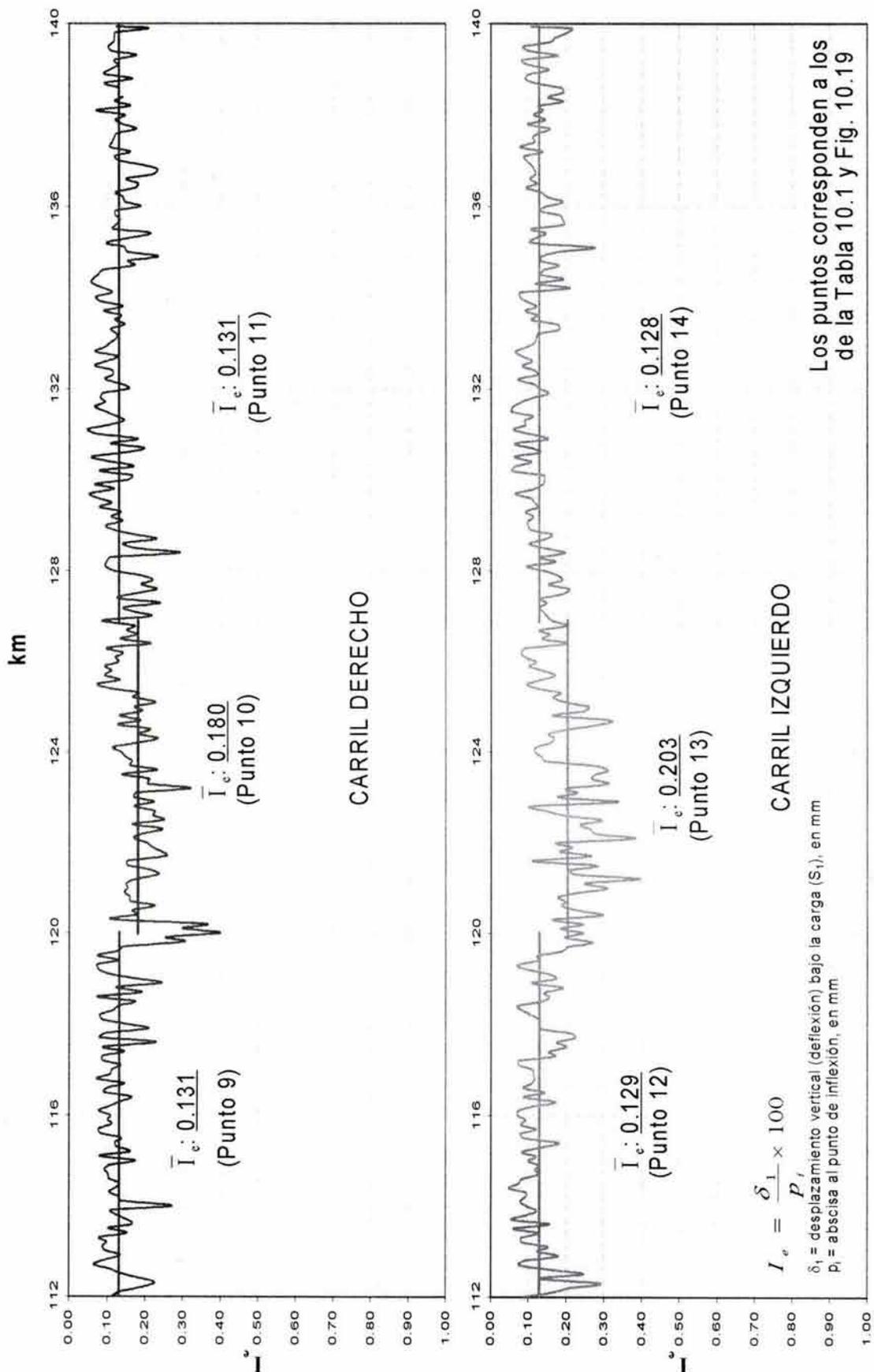
Figura 10.8 ECUACIÓN MODELADA DE LA CUENCA DE DEFLEXIONES (Boussinesq)



**Figura 10.9 ÍNDICE ESTRUCTURAL PUNTUAL ( $I_e$ ) Y PROMEDIO ( $\bar{I}_e$ ) PARA LA CARRETERA:  
RINCÓN DE ROMOS-ENTRONQUE GUADALUPE, CUERPO ÚNICO**



**Figura 10.10** ÍNDICE ESTRUCTURAL PUNTUAL ( $I_e$ ) Y PROMEDIO ( $\bar{I}_e$ ) PARA LA CARRETERA: VILLA HERMOSA-ZACATAL, CUERPO ÚNICO



**Figura 10.11 ÍNDICE ESTRUCTURAL PUNTUAL ( $I_e$ ) Y PROMEDIO ( $\bar{I}_e$ ) PARA LA CARRETERA: ACAYUCAN-LIM. EDOS. VER.-OAX., CUERPO ÚNICO**

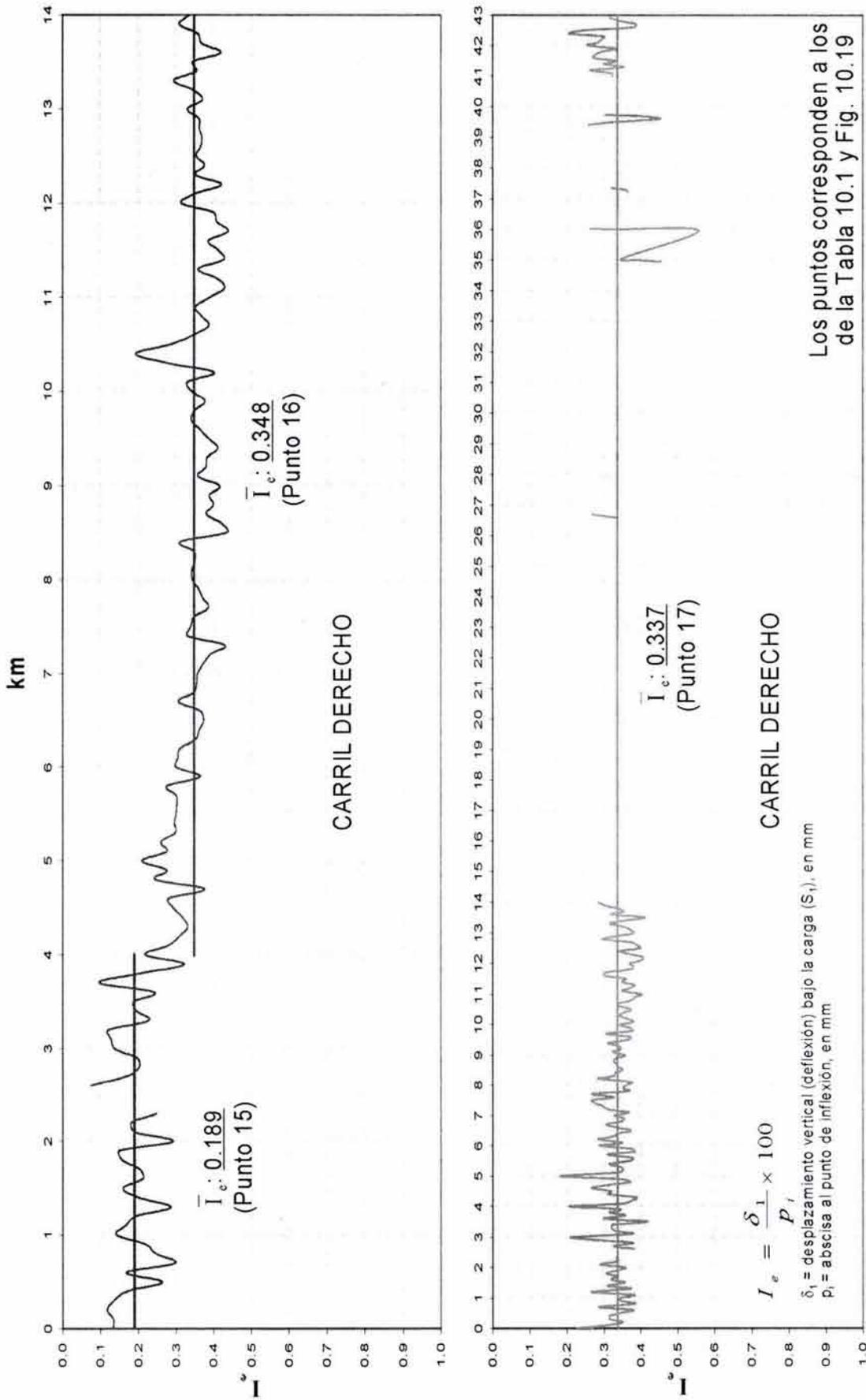
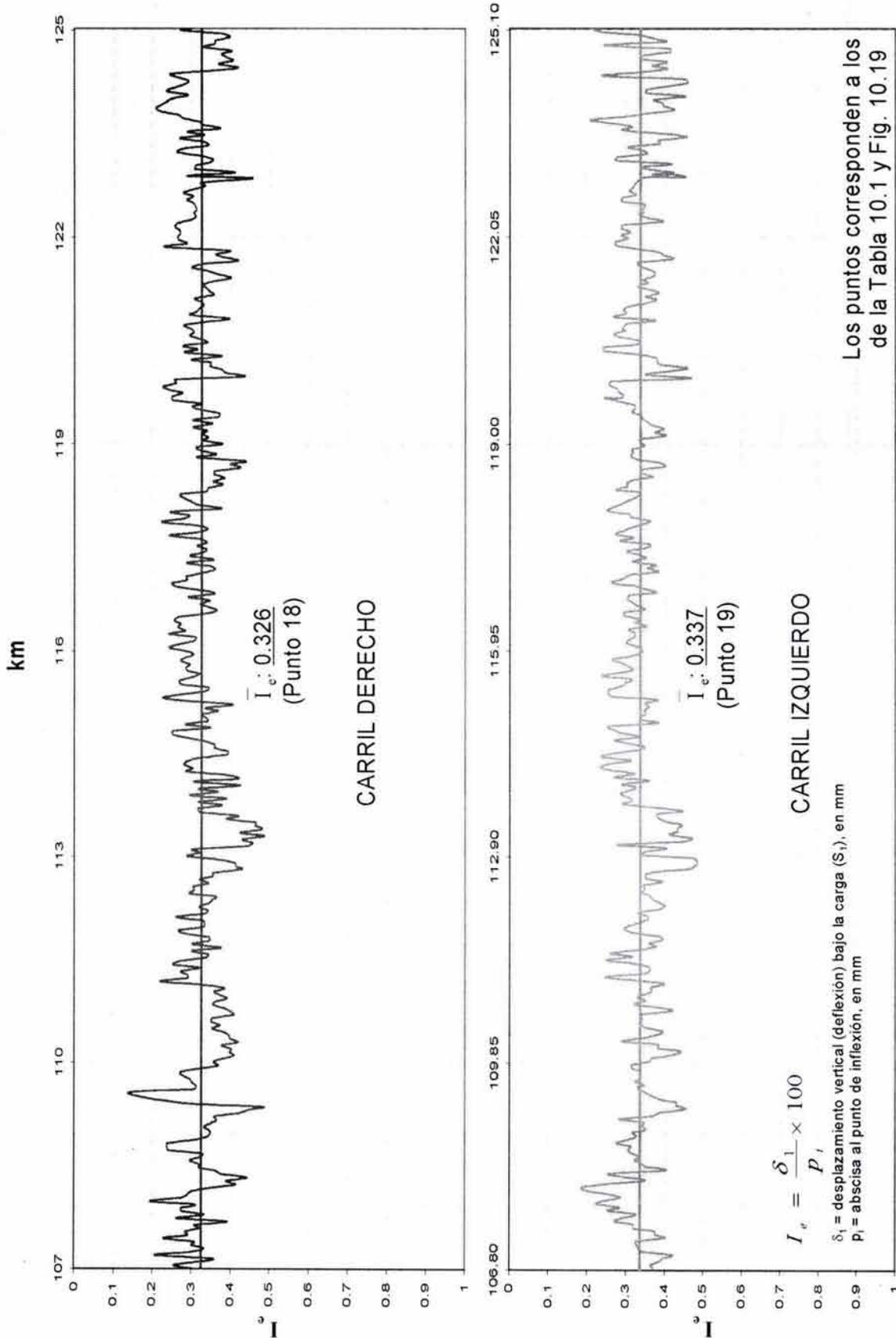


Figura 10.12 ÍNDICE ESTRUCTURAL PUNTUAL ( $I_e$ ) Y PROMEDIO ( $\bar{I}_e$ ) PARA LA CARRETERA: CORDOBA-VERACRUZ, CUERPOS A Y B



**Figura 10.13** ÍNDICE ESTRUCTURAL PUNTUAL ( $I_e$ ) Y PROMEDIO ( $\bar{I}_e$ ) PARA LA CARRETERA: ENTRONQUE ASUNCIÓN-ENTRONQUE TEJOCOTAL, CUERPO ÚNICO

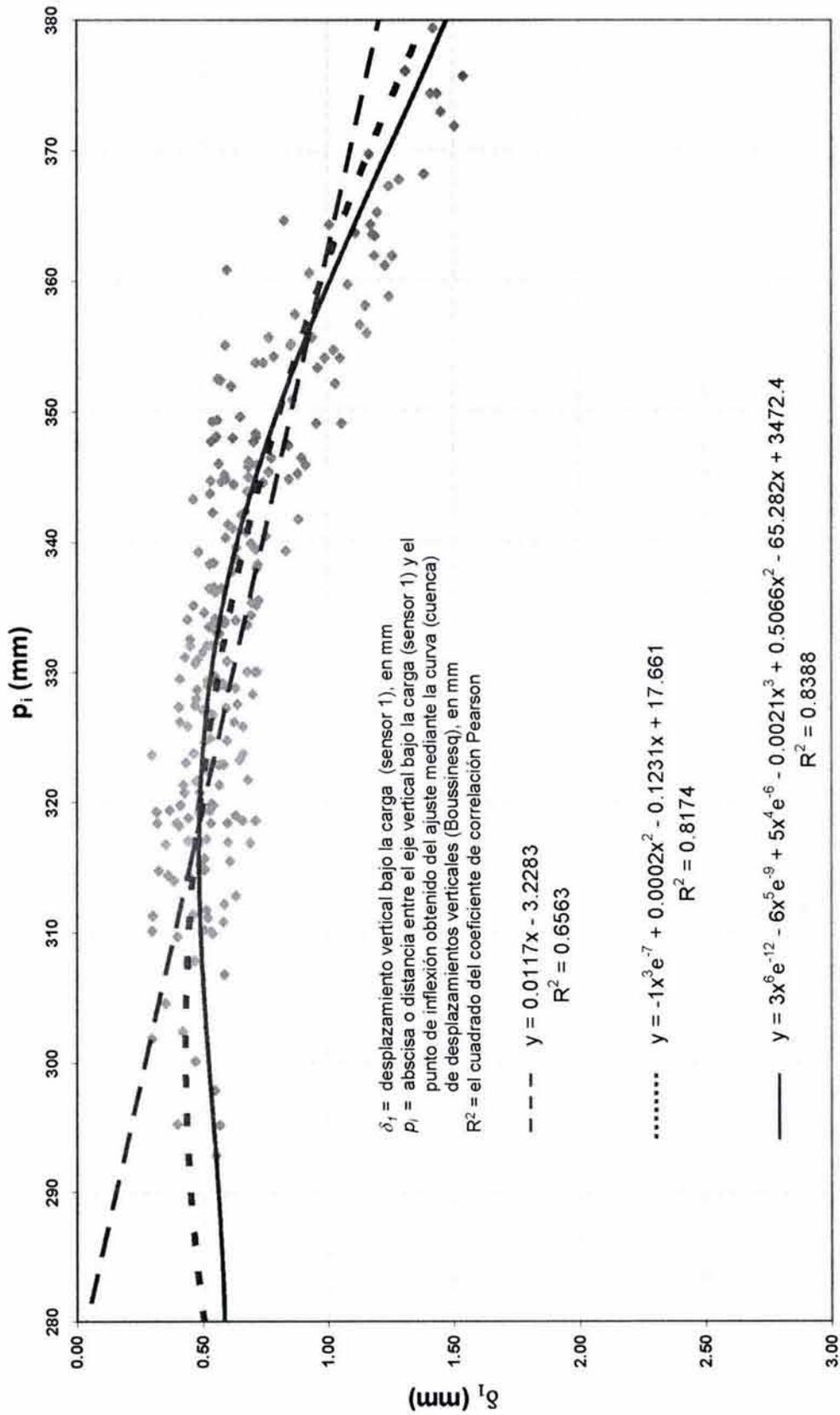


Figura 10.14a CORRELACIÓN ENTRE  $\delta_1$  Y  $P_1$  PARA LA CARRETERA: RINCÓN DE ROMOS-ENTRONQUE GUADALUPE, CUERPO ÚNICO, CARRIL DERECHO

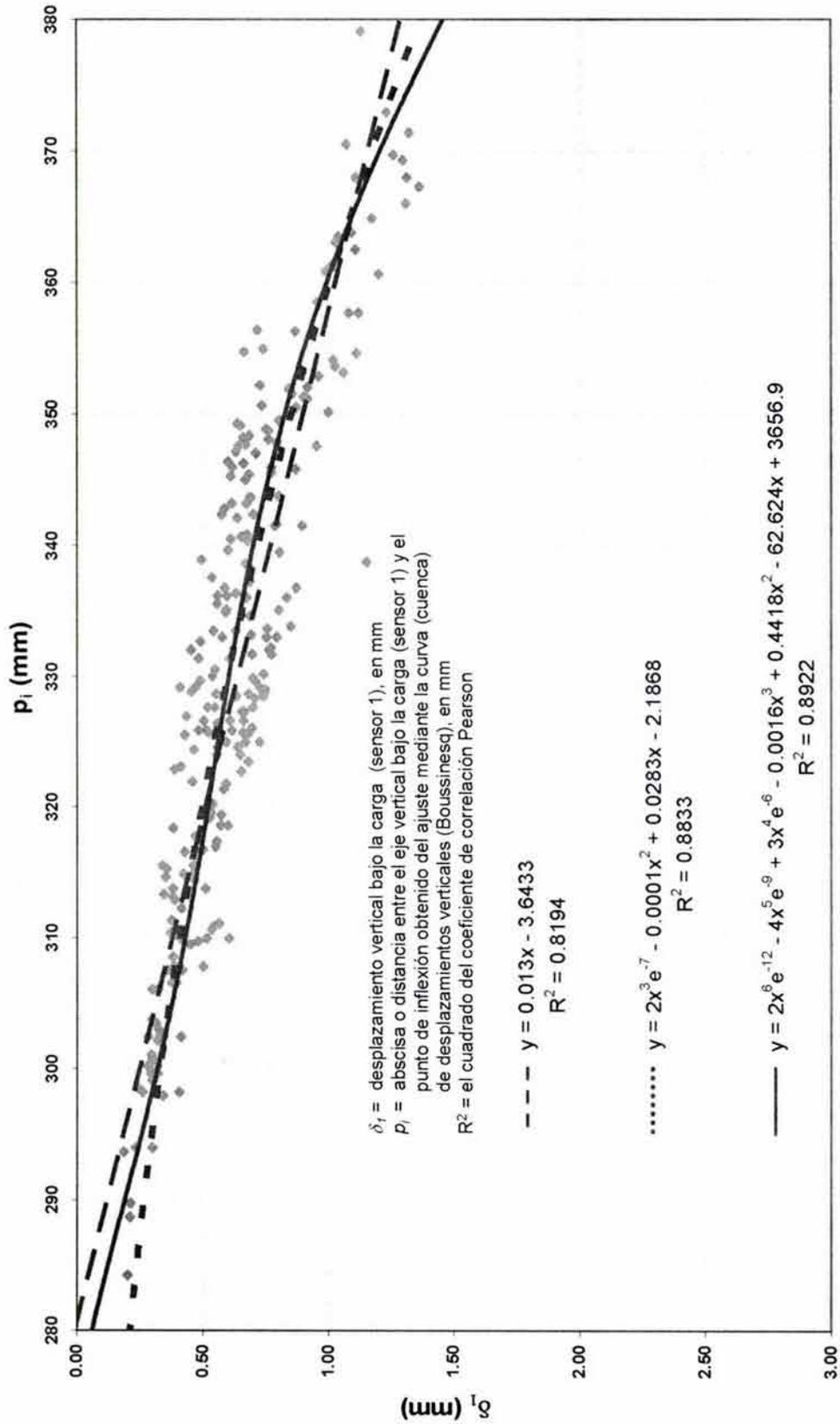


Figura 10.14b CORRELACIÓN ENTRE  $\delta_1$  Y  $p_1$  PARA LA CARRETERA: RINCÓN DE ROMOS-ENTRONQUE GUADALUPE, CUERPO ÚNICO, CARRIL IZQUIERDO

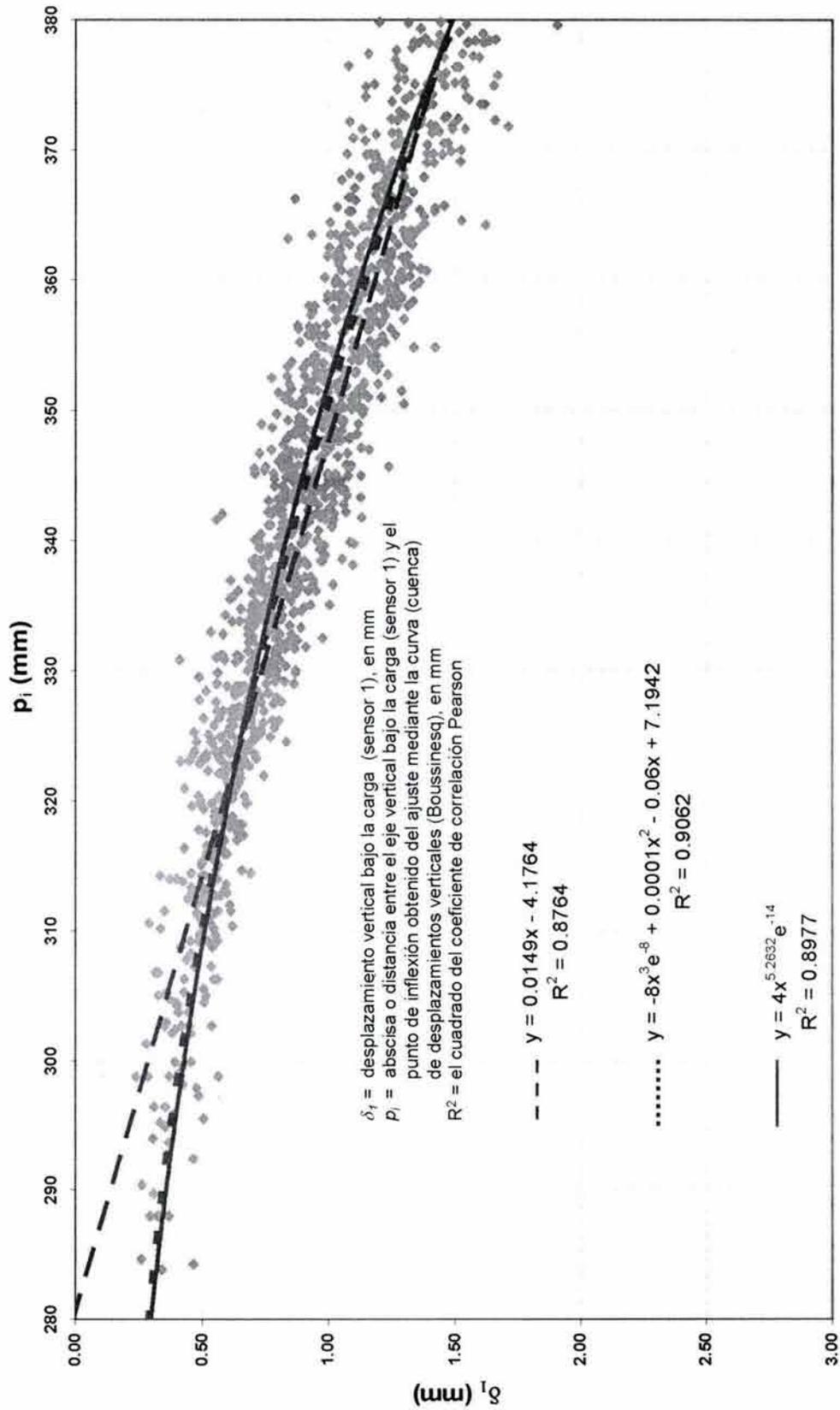


Figura 10.15a CORRELACIÓN ENTRE  $\delta_1$  Y  $p_1$  PARA LA CARRETERA: VILLAHERMOSA-ZACATAL, CUERPO ÚNICO, CARRIL DERECHO

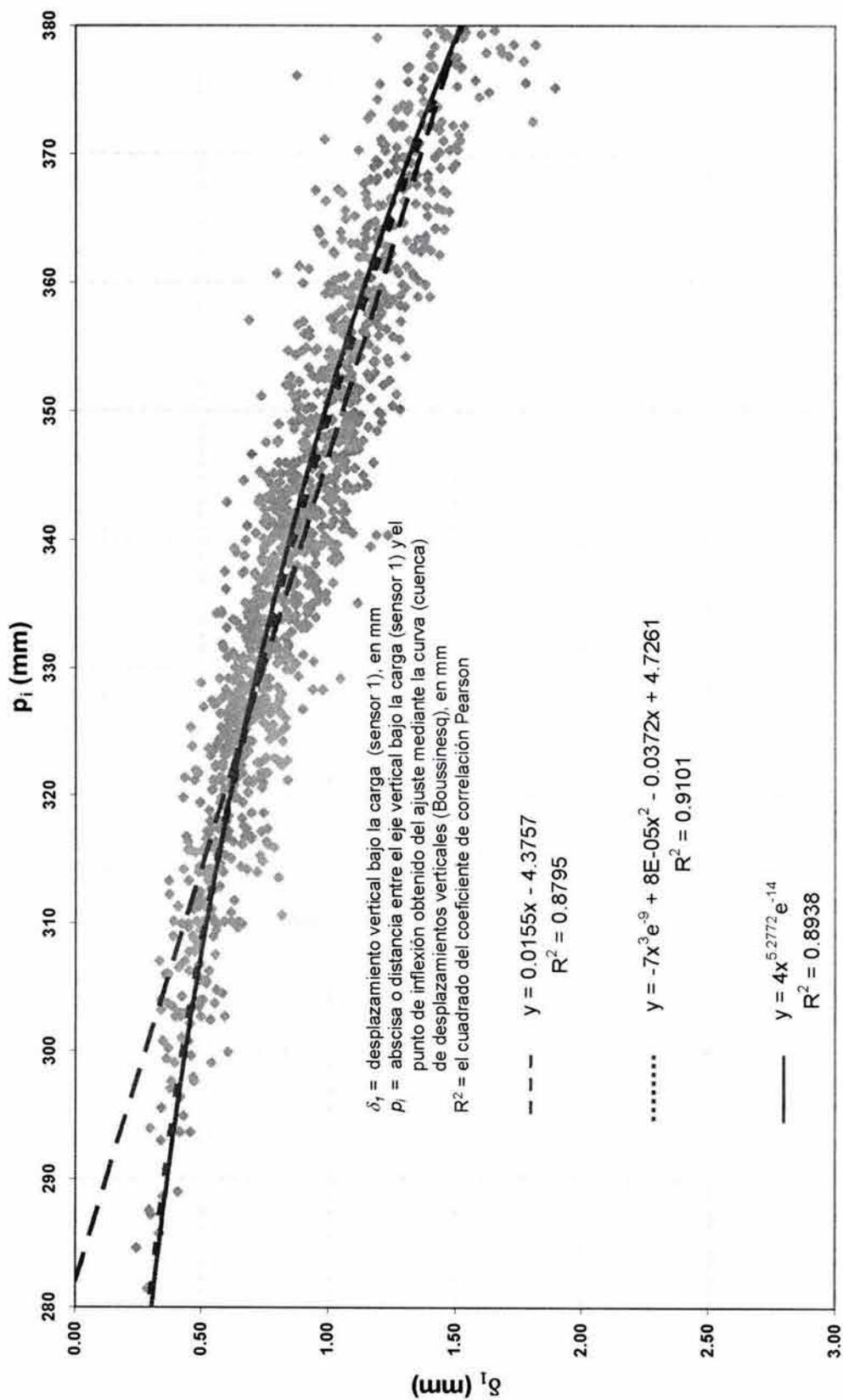


Figura 10.15b CORRELACIÓN ENTRE  $\delta_1$  Y  $p_1$  PARA LA CARRETERA: VILLAHERMOSA-ZACATAL, CUERPO ÚNICO, CARRIL IZQUIERDO

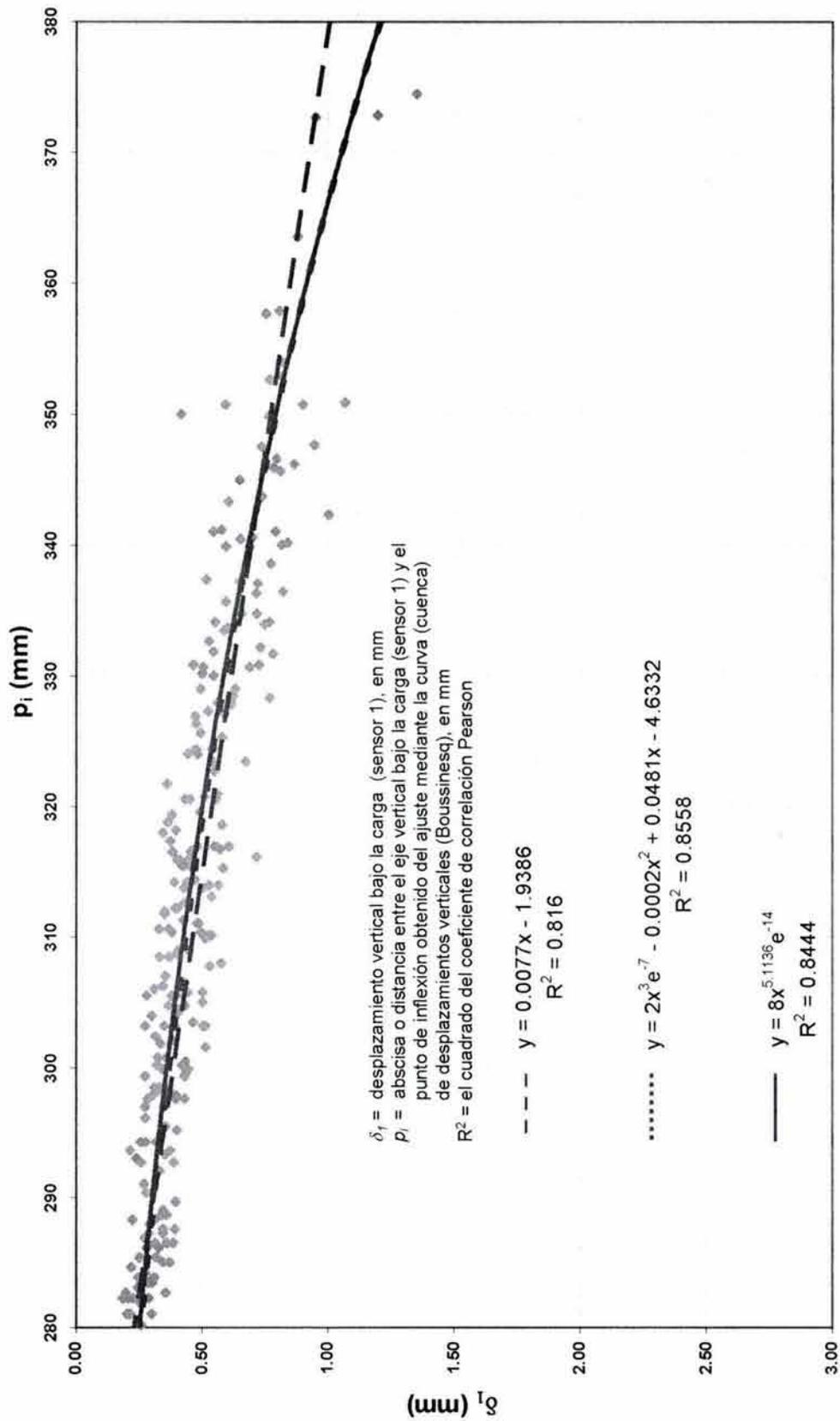


Figura 10.16a CORRELACIÓN ENTRE  $\delta_1$  Y  $p_i$  PARA LA CARRETERA: ACAYUCAN-LIM.EDOS. VER.-OAX., CUERPO ÚNICO, CARRIL DERECHO

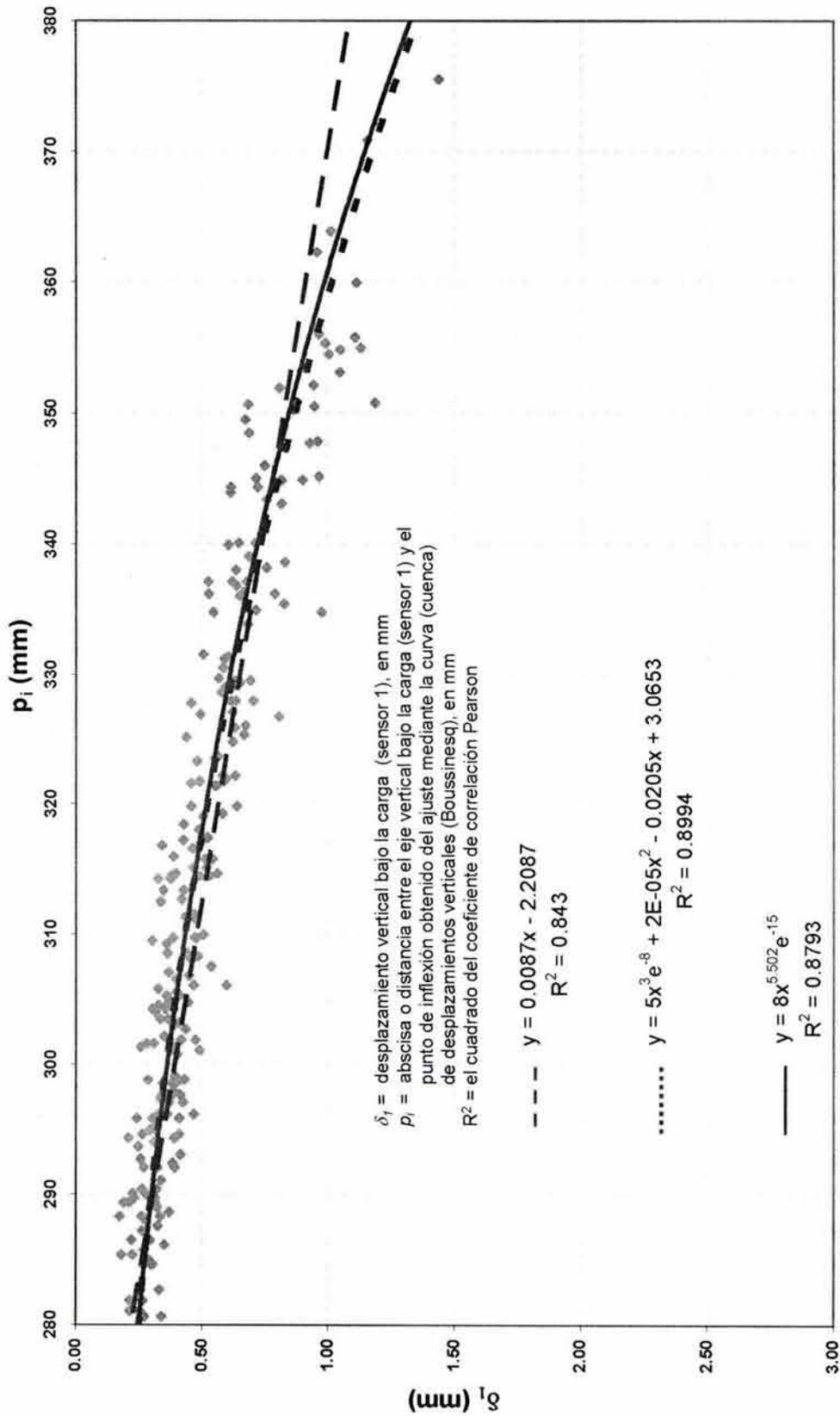


Figura 10.16b CORRELACIÓN ENTRE  $\delta_1$  Y  $p_1$  PARA LA CARRETERA:  
 ACAYUCAN-LIM.EDOS. VER.-OAX., CUERPO ÚNICO, CARRIL IZQUIERDO

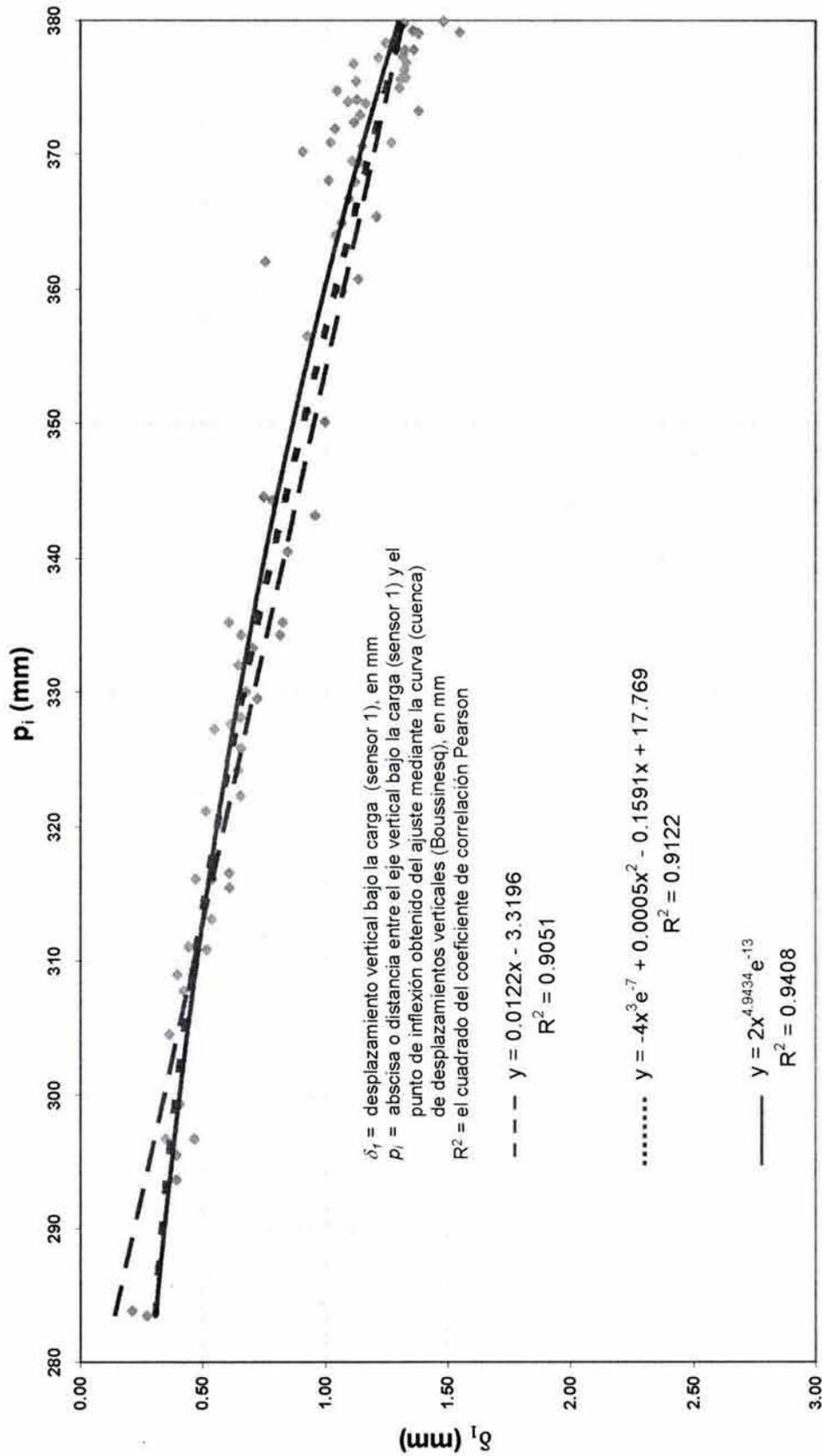


Figura 10.17a CORRELACIÓN ENTRE  $\delta_1$  Y  $p_1$  PARA LA CARRETERA: CORDOBA-VERACRUZ, CUERPO A, CARRIL DERECHO

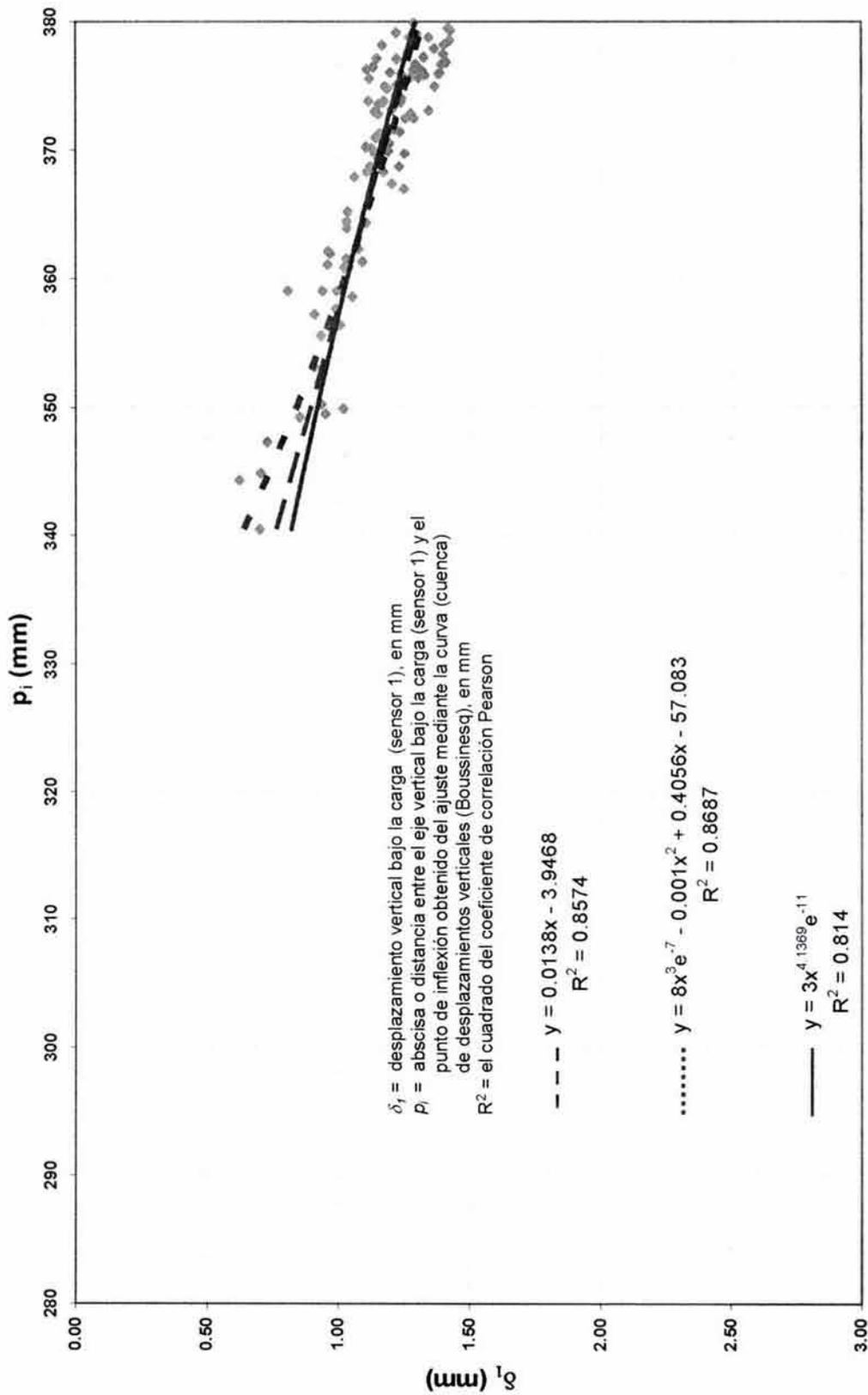


Figura 10.17b CORRELACIÓN ENTRE  $\delta_1$  Y  $p_i$  PARA LA CARRETERA: CORDOBA-VERACRUZ, CUERPO B, CARRIL DERECHO

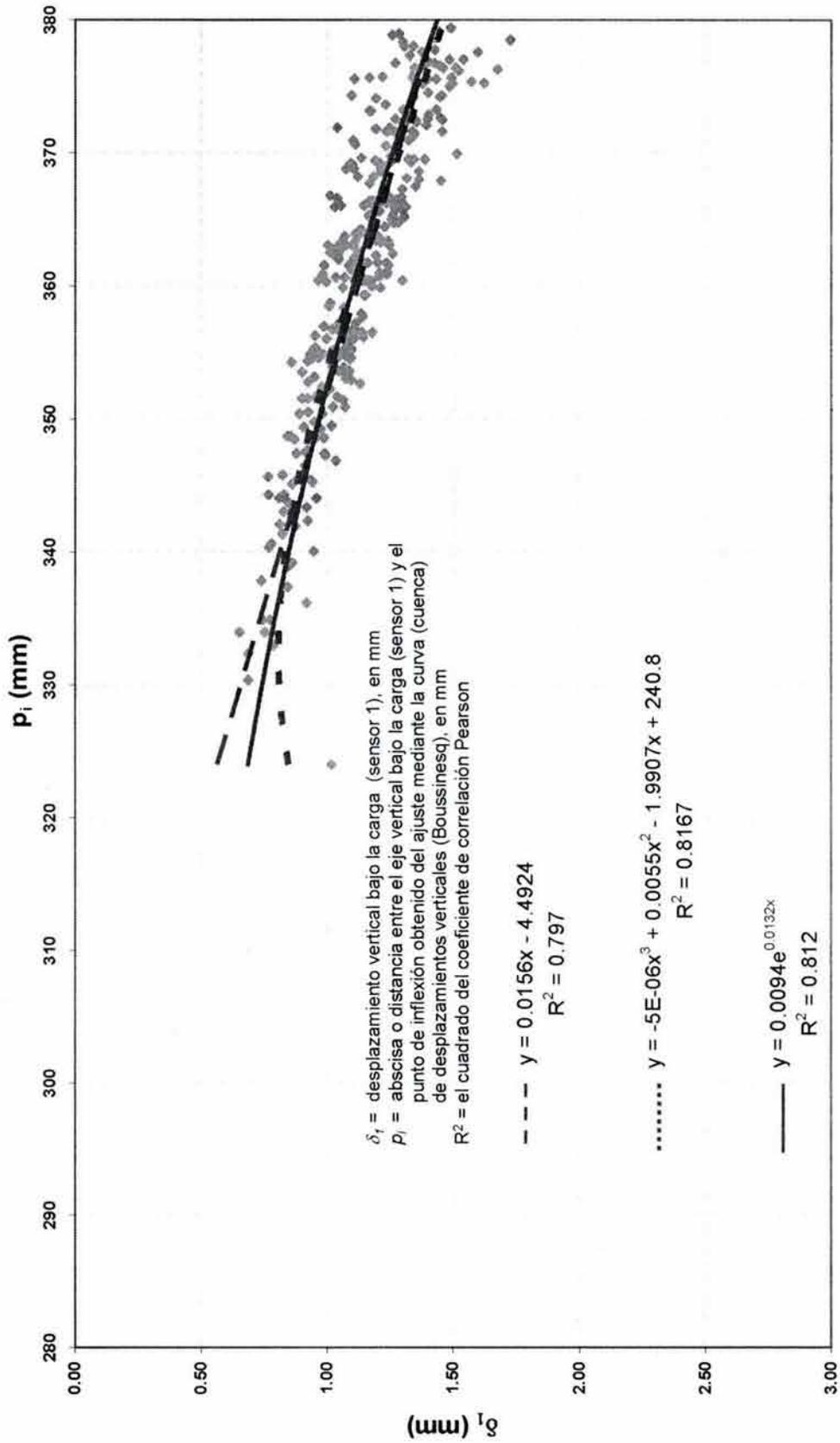


Figura 10.18a CORRELACIÓN ENTRE  $\delta_1$  Y  $p_1$  PARA LA CARRETERA: ENTRONQUE ASUNCIÓN-ENTRONQUE TEJOCOTAL, CUERPO ÚNICO, CARRIL DERECHO

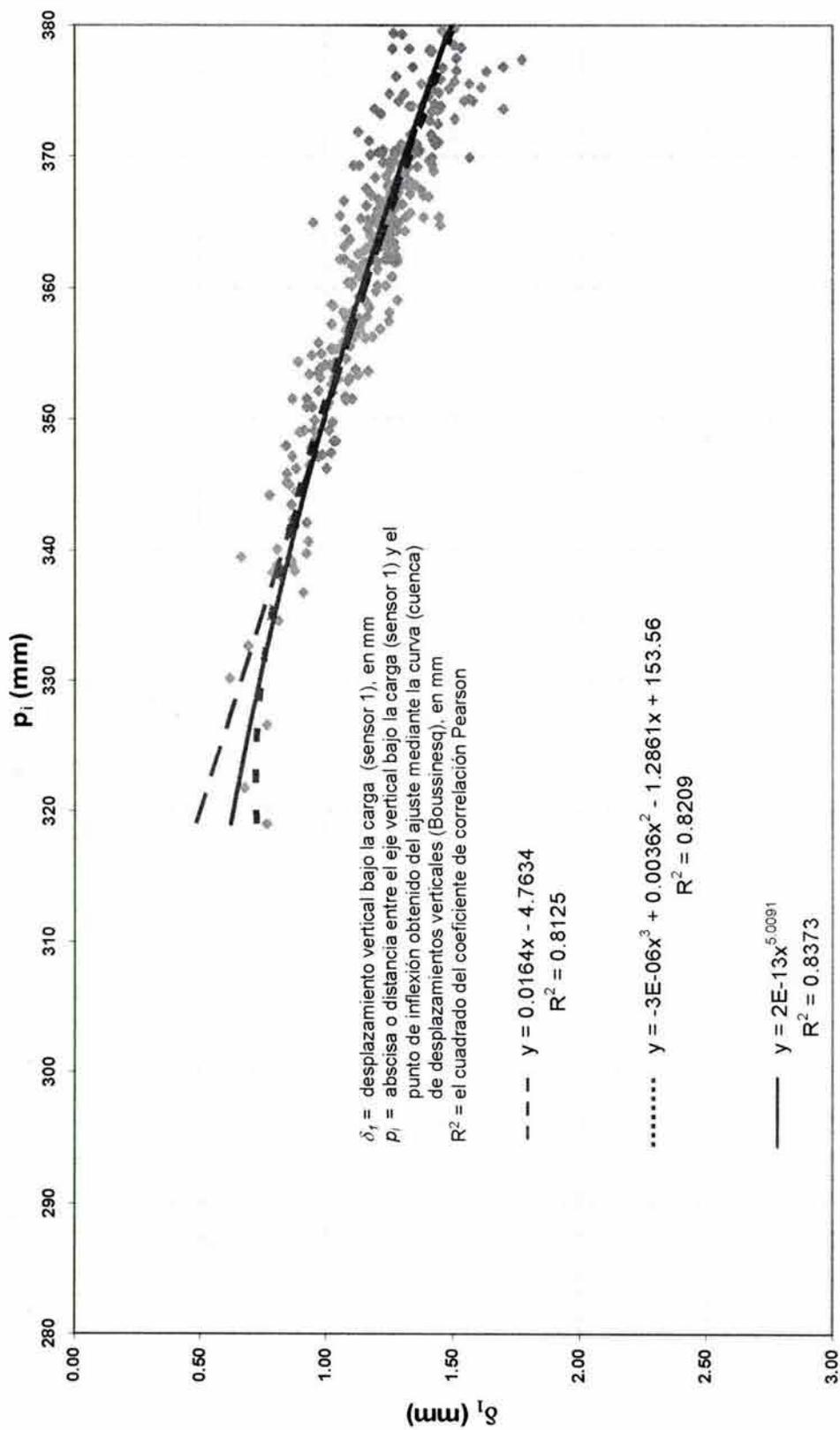


Figura 10.18b CORRELACIÓN ENTRE  $\delta_1$  Y  $p_1$  PARA LA CARRETERA: ENTRONQUE ASUNCIÓN-ENTRONQUE TEJOCOTAL. CUERPO ÚNICO. CARRIL IZQUIERDO

Como se expresó anteriormente, el valor de  $I_e$  se ha considerado como un indicador muy útil para conocer la condición estructural del pavimento. A mayor  $I_e$ , mayor Calificación Estructural ( $C_e$ ). En este sentido, se toman en cuenta todos los desplazamientos verticales registrados por los sensores y se considera la respuesta producida por las capas que forman el pavimento, asociada a su comportamiento real.

Con el fin de introducir el concepto de  $I_e$  en casos reales, se elaboró la Tabla 10.1, donde se presentan las características generales de los casos estudiados en esta tesis, aclarando que la Calificación Estructural ( $C_e$ ) corresponde a la definida inicialmente por el autor, a partir de las áreas de las cuencas de desplazamiento vertical (deflexión), de acuerdo con el criterio presentado en la Tabla 10.2

En la Tabla 10.1 se observa que el Índice Estructural medio ( $\bar{I}_e$ ) sí tiene muy buena correlación con el tratamiento principal considerado en los casos reales, no así la Calificación Estructural ( $C_e$ ), definida con el criterio antiguo (Tabla 10.2), debido a su reducido intervalo de variación (7.5 a 8.5); esto se ilustra también en la Fig. 10.19.

Lo anterior condujo a la revisión de la escala de calificaciones (5 a 10). Pues bien, la nueva propuesta de la Calificación Estructural ( $C_e$ ), a partir del Índice Estructural ( $I_e$ ), así como la principal solución a considerar para la rehabilitación y/o reconstrucción de un pavimento, sería la indicada en la Tabla 10.3 e ilustrada en la Fig. 10.20.

Lo expresado anteriormente quiere decir que, de un modo sencillo y confiable, es posible dar la solución más recomendable para luego analizarla en más detalle. Esto está comprobado en casos históricos de la práctica rutinaria del suscrito. Si  $I_e > 0.3$ , definitivamente lo mejor es la recuperación *in situ* para la rehabilitación de un pavimento, no así cuando  $I_e$  está comprendido entre 0.1 y 0.3, en que se requiere un reforzamiento con capas nuevas; cuando  $I_e < 0.1$ , prácticamente con un tratamiento superficial tipo "slurry seal" o similar es suficiente.

Es muy importante insistir en que  $C_e$  e  $I_e$  están íntimamente relacionados con el comportamiento real de pavimentos observado por varios años, tomando en cuenta desde luego el clima, los materiales y el tránsito, entre otros aspectos, que afectan en mayor o menor grado la capacidad estructural del pavimento y, por consiguiente, su comportamiento y vida económica.

Por otro lado, conviene tomar en cuenta lo sugerido en la Tabla 10.4, relativo a las propuestas de solución para mejorar estructuralmente el pavimento, tomando en cuenta tanto los efectos del tránsito y su capacidad estructural, así como el grado de severidad de su agrietamiento por fatiga, mediante la magnitud de la carga/eje, la Calificación Estructural ( $C_e$ ) del pavimento y el grado de severidad en sus grietas superficiales. Dependiendo del tipo de tránsito (lento y frecuente), la capacidad estructural relativa del pavimento y el grado de severidad del agrietamiento por fatiga, la opción más prometedora para análisis se indica con el número 1, a la cual le sigue en importancia la correspondiente al número 2, luego al 3 y así sucesivamente. Esto se presenta como una información auxiliar muy útil para las simulaciones diversas que deben realizarse con la computadora.

CASO	CARRETERA	TRAMO km a km	CUERPO	CARRIL	CORRELACIÓN $I_e$ vs $C_e$		SOLUCIÓN A CONSIDERAR				VIDA ESPERADA (años)				
					PUNTO	$\bar{I}_e$	$C_e$	TRATAMIENTO PRINCIPAL		ESPESOR DE CAPA (cm)					
								SUPERFICIAL $0 < I_e < 0.1$	REFORZAMIENTO $0.1 < I_e < 0.3$	RECUPERACIÓN <i>in situ</i> $0.3 < I_e < 0.4$		F	ÚNICA	SOBRE- POSICIÓN	BASE
1	RINCÓN DE ROMOS - ENTRONQUE GUADALUPE	45 - 57.5 (Anch. de 2.4 caméras)	ÚNICO	Der.	1	0.165	8.479				5		12 a 14		
					2	0.236	8.118						5	15 (NEE)	14 a 15
					3	0.164	8.540	x					5		12 a 14
					4	0.228	8.185						5	15 (NEE)	14 a 15
2	VILLAHERMOSA - ZACATAL	30 - 106	ÚNICO	Der.	5	0.251	7.761		x		5		9		
					6	0.313	7.631			x			5	25 (EEA)	14
					7	0.275	7.709		x				5		9
					8	0.310	7.625			x			5	25 (EEA)	14
3	ACAYUCAN - LIM. EDOS. VER./OAX.	112 - 140	ÚNICO	Der.	9	0.131	8.530						9 a 11		
					10	0.180	8.187								
					11	0.131	8.664								
					12	0.129	8.614	x				5			
4	CÓRDOBA-VERACRUZ	0 - 4 4 - 14 0 - 43	A B	Der.	13	0.203	7.983						13 a 15		
					14	0.128	8.675								
					15	0.189	8.349			x				10	25 (EEA)
5	ENTRONQUE ASUNCIÓN - ENTRONQUE TEJOCOTAL	106.8 - 125.1	ÚNICO	Der.	16	0.348	7.704						9 21 19 46		
					17	0.337	7.740								
					18	0.326	7.542	*				4			34 (AST)
				lzc.	19	0.337	7.448						25 (ECP) 25 (EEA)		

$$I_e = \text{Índice Estructural} \quad I_e = \frac{\delta_1}{p_1} \times 100$$

$\delta_1$  = desplazamiento vertical (deflexión) bajo la carga (sensor 1), en mm

$p_1$  = abscisa o distancia entre el eje vertical bajo la carga (sensor 1) y el punto de inflexión obtenido del ajuste (Boussinesq) con la curva (cuenca) de desplazamientos verticales, en mm

$T_e$  = Índice Estructural medio

$C_e$  = Calificación Estructural, según el criterio antiguo (áreas, Tabla 10.2)

\* Opción analizada

AST = Actual sin tratamiento especial (sólomente superficial)

ECP = Estabilizada con cemento Portland, (recuperación *in situ*)

EEA = Estabilizada con emulsión asfáltica, (recuperación *in situ*)

F = Fresado

LCH = Losa de concreto hidráulico

RCP = Rigidizada con cemento Portland, (recuperación *in situ*)

Nota: Los puntos 1 a 19 se refieren a los cinco casos estudiados (Figs. 10.9 a 10.13)

Tabla 10.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS CASOS ESTUDIADOS Y PROPUESTAS DE REHABILITACIÓN

CALIFICACIÓN ESTRUCTURAL ( $C_e$ )		ÁREA DE LA CUENCA ( $\text{mm}^2$ )
10	Excelente	< 100
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

Tabla 10.2 CRITERIO DE CALIFICACIÓN ESTRUCTURAL ANTIGUO

CALIFICACIÓN ESTRUCTURAL ( $C_e$ )		ÍNDICE ESTRUCTURAL ( $I_e$ )	SOLUCIÓN A CONSIDERAR
10	Excelente	0 a 0.05	Tratamiento Superficial
9	Muy buena	0.05 a 0.1	
8	Buena	0.1 a 0.2	Reforzamiento
7	Regular	0.2 a 0.3	
6	Mala	0.3 a 0.4	Recuperación <i>in situ</i>
5	Pésima	> 0.4	

Tabla 10.3 CRITERIO DE CALIFICACIÓN ESTRUCTURAL A PARTIR DEL ÍNDICE ESTRUCTURAL Y SOLUCIÓN A CONSIDERAR

Con respecto a la Tabla 10.4, es muy conveniente ampliar más las propuestas de solución A y B para la rehabilitación y/o reconstrucción de pavimentos, en relación a la Sección Invertida, como se indica a continuación:

- A) Sección Invertida completa (veáse la Fig. 6.1). Rigidización
- Recuperación de 25 a 30 cm de espesor del pavimento (carpeta asfáltica más base hidráulica) con equipo especial (CMI RS 500B, Wirtgen, Caterpillar o similar), pulverización y mezclado íntimo de todos los materiales encontrados "in situ", más los colocados previamente sobre la superficie de rodamiento (grava y/o arena) para completar la graduación y abatir la plasticidad del conjunto
  - A continuación, repetir el proceso con el mismo equipo, para incorporar cemento Portland y agua en la relación **a/c** (agua de mezclado, sin la de absorción/cemento) igual a  $0.35 \pm 0.05$ . Rigidización para asegurar contenidos de cemento relativamente altos ( $8 \pm 2\%$ )

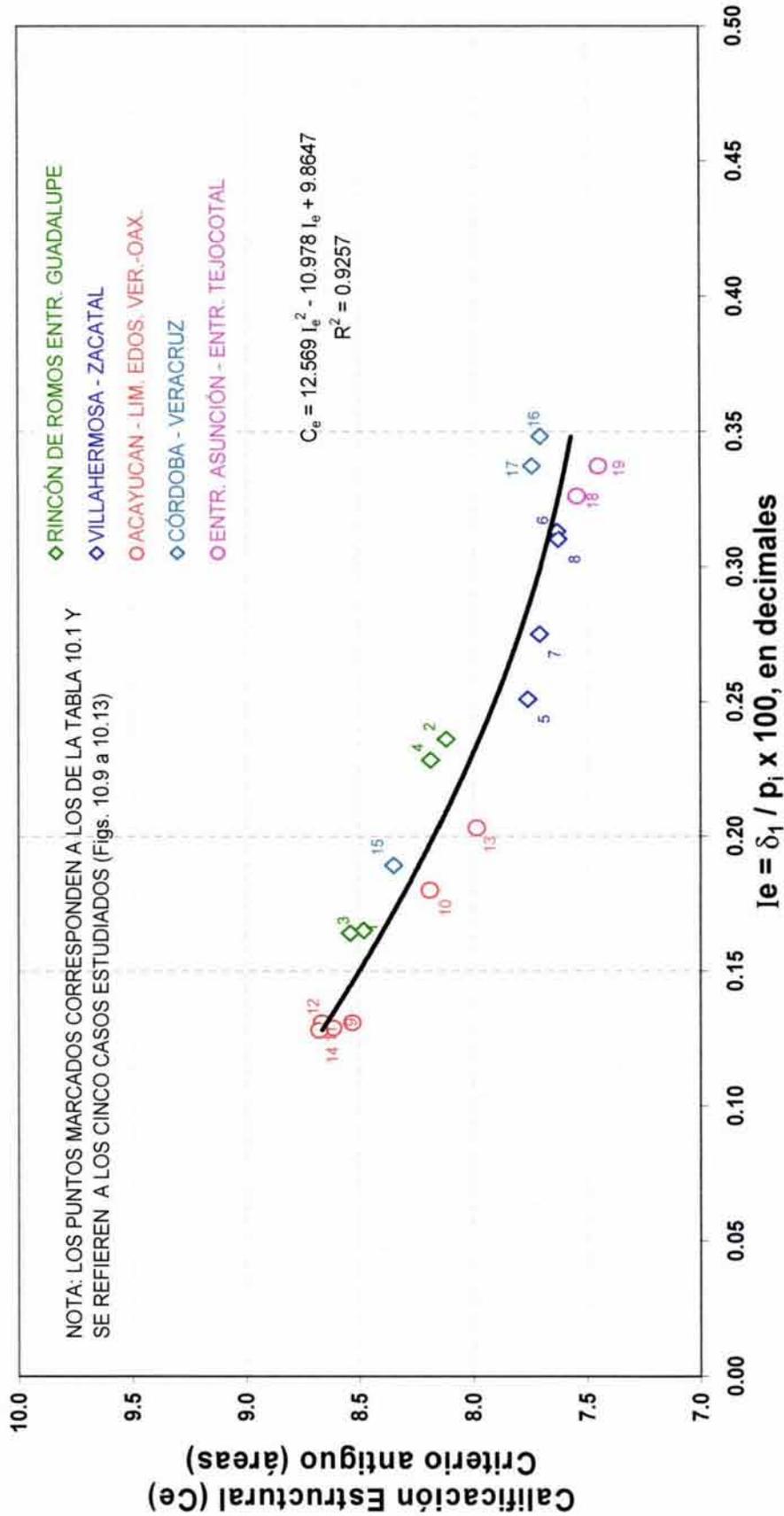


Figura 10.19 CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE ESTRUCTURAL MEDIO ( $\bar{I}_e$ ) Y LA CALIFICACIÓN ESTRUCTURAL ( $C_e$ ) ANTIGUA

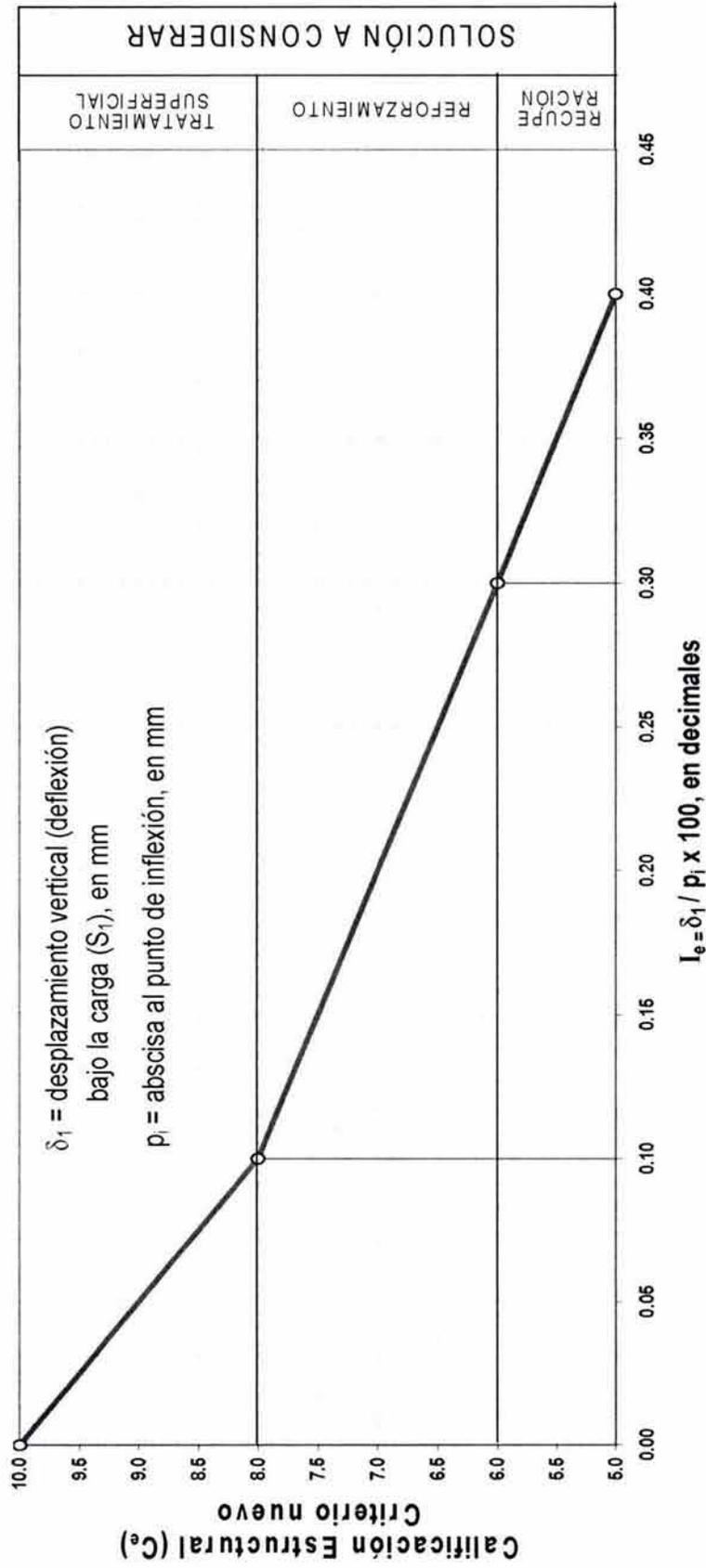


Figura 10.20 RELACIÓN PROPUESTA ENTRE EL ÍNDICE ESTRUCTURAL ( $I_e$ ) Y LA CALIFICACIÓN ESTRUCTURAL ( $C_e$ ) NUEVA

- c) Inmediatamente después, compactar con rodillo liso (CA 25 ó similar) y alta frecuencia de vibración, hasta lograr la máxima compacidad posible (volumen de sólidos / volumen total, Orozco 1978), sin romper las partículas (“no rotura de granos”)
- d) Posteriormente, aplicar riegos de agua por aspersion para coadyuvar al curado del cemento Portland y formar una membrana de curado a base de un riego de impregnación con emulsión asfáltica

#### B) Sección Invertida completa. Estabilización

- a) Recuperación de 25 a 30 cm de espesor del pavimento (carpeta asfáltica más base hidráulica) con equipo especial (CMI RS 500B, Wirtgen, Caterpillar o similar), pulverización y mezclado intimo de todos los materiales encontrados “in situ”, más los colocados previamente sobre la superficie de rodamiento (grava y/o arena) para completar la graduación y abatir la plasticidad del conjunto
- b) A continuación, repetir el proceso con el mismo equipo, para incorporar cemento Portland y agua en la relación **a/c** (agua de mezclado, sin la de absorción/cemento) igual a  $0.35 \pm 0.05$ . Estabilización para asegurar contenidos de cemento relativamente bajos ( $4 \pm 1 \%$ )
- c) Inmediatamente después, compactar con rodillo liso (CA 25 ó similar) y alta frecuencia de vibración, hasta lograr la máxima compacidad posible (volumen de sólidos / volumen total, Orozco 1978), sin romper las partículas (“no rotura de granos”)
- d) Posteriormente, aplicar riegos de agua por aspersion para coadyuvar al curado del cemento Portland y formar una membrana de curado a base de un riego de impregnación con emulsión asfáltica

Además, se sugiere tomar en cuenta también las propuestas de solución indicadas en la Tabla 10.5, para mejorar la superficie del pavimento. Aunque esto pertenece a la evaluación superficial, coadyuva al mejoramiento integral del pavimento; al igual que en la Tabla 10.4, la opción más prometedora corresponde a la indicada con el número 1.

### 10.2.3 Módulos elásticos de las capas

El equipo (perteneciente al deformómetro de impacto) almacena en una computadora los desplazamientos verticales registrados por cada uno de los sensores y, con apoyo en esta información (perfiles de desplazamientos verticales), las cargas aplicadas, así como los espesores y la naturaleza (granular o estabilizada) de las capas y con la ayuda de programas de cómputo (Uddin, W., 1998 y Dynatest, 2001), por retrocálculo (“solución del problema inverso”) se efectúa el proceso para estimar los módulos elásticos para cada capa que forma el pavimento y las capas inferiores. En el Anexo B se describen los fundamentos teóricos para obtener éstos módulos elásticos y en el Anexo E se presentan los resultados obtenidos en cinco carreteras (RVO y Cía, 2001 y 2004). Se hace hincapié en la ecuación fundamental de la teoría de la elasticidad:  $\varepsilon = 1/E [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)]$ , donde  $\varepsilon$  = deformación unitaria;  $E$  = módulo elástico;  $\mu$  = relación de Poisson;  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  = esfuerzos principales: mayor, intermedio y menor. Cabe hacer notar que los espesores y la naturaleza de las capas, obtenidos de un estudio geotécnico, se pueden complementar también con las mediciones del

Grupo	Categoría	TRÁNSITO LENTO Y FRECUENTE*			CAPACIDAD ESTRUCTURAL RELATIVA			AGRIETAMIENTO POR FATIGA			PRINCIPALES OPCIONES RECOMENDABLES PARA ANALIZAR										
		B	M	A	B	M	A	B	M	A	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
I	1	x			x			x			1	2	3	4						3	
	2	x			x				x		1	2	3	4						3	
	3	x			x					x	1	2	3	4							
	4	x				x		x			1	2	3	4			1	1		3	
	5	x				x			x		1	2	3	4			1	1	3	3	
	6	x				x				x	1	2	3	4			1	1	3		
	7	x					x	x							1		1	1			
	8	x					x		x							1	1	1	3		
	9	x					x			x						1	1	1	3		
II	10		x		x			x			1	2	3	4			1	1			1
	11		x		x				x		1	2	3	4							1
	12		x		x					x	1	2	3	4							1
	13		x			x		x			1	2	3	4			1	1			
	14		x			x			x		1	2	3	4					3		
	15		x			x				x	1	2	3	4			2		3		
	16		x				x	x							2		1	1			
	17		x				x		x						1	2					
	18		x				x			x					1	2					
III	19			x	x			x			1	2	3	4							1
	20			x	x				x		1	2	3	4							1
	21			x	x					x	1	2	3	4							1
	22			x		x		x			1	2	3	4							1
	23			x		x			x		1	2	3	4							1
	24			x		x				x	1	2	3	4							1
	25			x			x	x							1						
	26			x			x		x							1	1	1			
	27			x			x			x	2	1	3	4			1	1	1		
		Intensidad Carga/eje (t)			Calificación Estructural (C <sub>e</sub> )			Grado de Severidad			Sección invertida completa. Rigidización Sección invertida completa. Estabilización Recuperación, pulverización, mezclado y compactado. Cemento asfáltico (Base asfáltica) Carpeta asfáltica polimerizada Recuperación, pulverización, mezclado y compactado. Emulsión asfáltica (Base asfáltica). Carpeta asfáltica polimerizada Sobrecarpeta asfáltica polimerizada Fresado y reposición de carpeta asfáltica Reforzamiento con rejillas de fibra de vidrio sobre la carpeta deteriorada y protección con carpeta delgada polimerizada Carpeta delgada polimerizada, simultánea con el riego de emulsión asfáltica polimerizada Sellado de grietas y Riego de sello Mortero asfáltico ("slurry seal") Losas de concreto sobre el pavimento flexible ("whitetopping")										

Nota: El # 1 corresponde a la opción más recomendable, según sea el caso

RVOS

\* Carril de baja y en subida

Tabla 10.4 PROPUESTAS DE SOLUCIÓN PARA MEJORA ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO

ESTA TESIS NO SALE DE LA BIBLIOTECA

Grupo	Categoría	TRÁNSITO LENTO Y FRECUENTE*			IRREGULARIDAD SUPERFICIAL			PROFUNDIDAD DE RODERAS			PRINCIPALES OPCIONES RECOMENDABLES PARA ANALIZAR		
		B	M	A	B	M	A	B	M	A	A	B	C
I	1	x			x			x			-	-	1
	2	x			x				x		-	-	1
	3	x			x					x	1	1	1
	4	x				x		x			-	-	1
	5	x				x			x		-	-	1
	6	x				x				x	1	1	1
	7	x					x	x			-	-	1
	8	x					x		x		-	-	1
	9	x					x			x	1	1	1
II	10		x		x			x			-	-	1
	11		x		x				x		-	-	1
	12		x		x					x	1	1	1
	13		x			x		x			-	-	1
	14		x			x			x		-	-	1
	15		x			x				x	1	1	1
	16		x				x	x			-	-	1
	17		x				x		x		-	-	1
	18		x				x			x	1	1	1
III	19			x	x			x			-	-	1
	20			x	x				x		-	-	1
	21			x	x					x	1	1	1
	22			x		x		x			-	-	1
	23			x		x			x		-	-	1
	24			x		x				x	1	1	1
	25			x			x	x			-	-	1
	26			x			x		x		-	-	1
	27			x			x			x	1	1	1
		Intensidad Carga/eje (t)			Índice de Irregularidad Internacional (III)			Magnitud (mm)			Renivelación con mezcla asfáltica	Desbastado (rebajado) de capa de rodamiento y riego de sollo	Sobrecarpeta asfáltica delgada y polimerizada
		Bajo (30 ± 10)	Medio (60 ± 10)	Alto (80 ± 10)	Bajo (2 ± 1)	Medio (4 ± 1)	Alto (6 ± 1)	Baja (5 ± 5)	Media (10 ± 5)	Alta (15 ± 5)			

Nota: El # 1 corresponde a la opción más recomendable, según sea el caso

RVOS

\* Carril de baja y en subida

**Tabla 10.5 PROPUESTAS DE SOLUCIÓN PARA MEJORA SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO**

radar de penetración superficial (Anexo C), además de los sondeos efectuados ex profeso. En la Fig. 10.20 se ilustra la estratigrafía de las capas sondeadas, para los diferentes cadenamientos de la carretera Villahermosa – Cd. del Carmen (RVO y Cía, 2001).

Básicamente, con el programa se calculan los desplazamientos ocasionados al aplicar una carga conocida sobre la estructura del pavimento. Al inicio, en dichos programas se proponen módulos elásticos de las capas que constituyen el pavimento; con estos módulos, se calculan los desplazamientos verticales y éstos se comparan con los registrados por los sensores. Si de esta comparación resultan diferencias mayores a la tolerancia especificada, por iteraciones sucesivas se ajustan los valores de los módulos elásticos y se repite el proceso en forma iterativa. La solución al problema inverso (retrocálculo) termina cuando los valores de los desplazamientos verticales calculados son aproximadamente iguales a los valores medidos.

A manera de ilustración, en las Figs. 10.21 y 10.22 se presentan respectivamente los módulos elásticos correspondientes a: carpeta asfáltica, base hidráulica y capas inferiores (Carretera Villahermosa – Zacatal, RVO y Cía, 2001).

### **10.3 Simulación de las condiciones estructurales**

Para complementar la evaluación del pavimento y conocer la vida remanente en la condición actual del pavimento, así como la vida futura esperada para las opciones de rehabilitación y/o reconstrucción propuestas, se efectúa el análisis del comportamiento de la estructura sometida a la acción de las cargas del tránsito vehicular, con el Método del Elemento Finito MEF (programa de cómputo "TEST0"), que se describe en el Anexo B.

En el Anexo E, metodológicamente se presentan los resultados obtenidos con el programa antes mencionado, para los casos correspondientes.



TESIS DOCTORAL EN MECÁNICA DE SUELOS  
M.I. RAÚL VICENTE OROZCO SANTOYO

Carretera: Villahermosa - Cd. del Carmen  
Tramo: Villahermosa - Zacatal  
Subtramo: km 30 al 160  
Cuerpo: Único  
Carril: Derecho

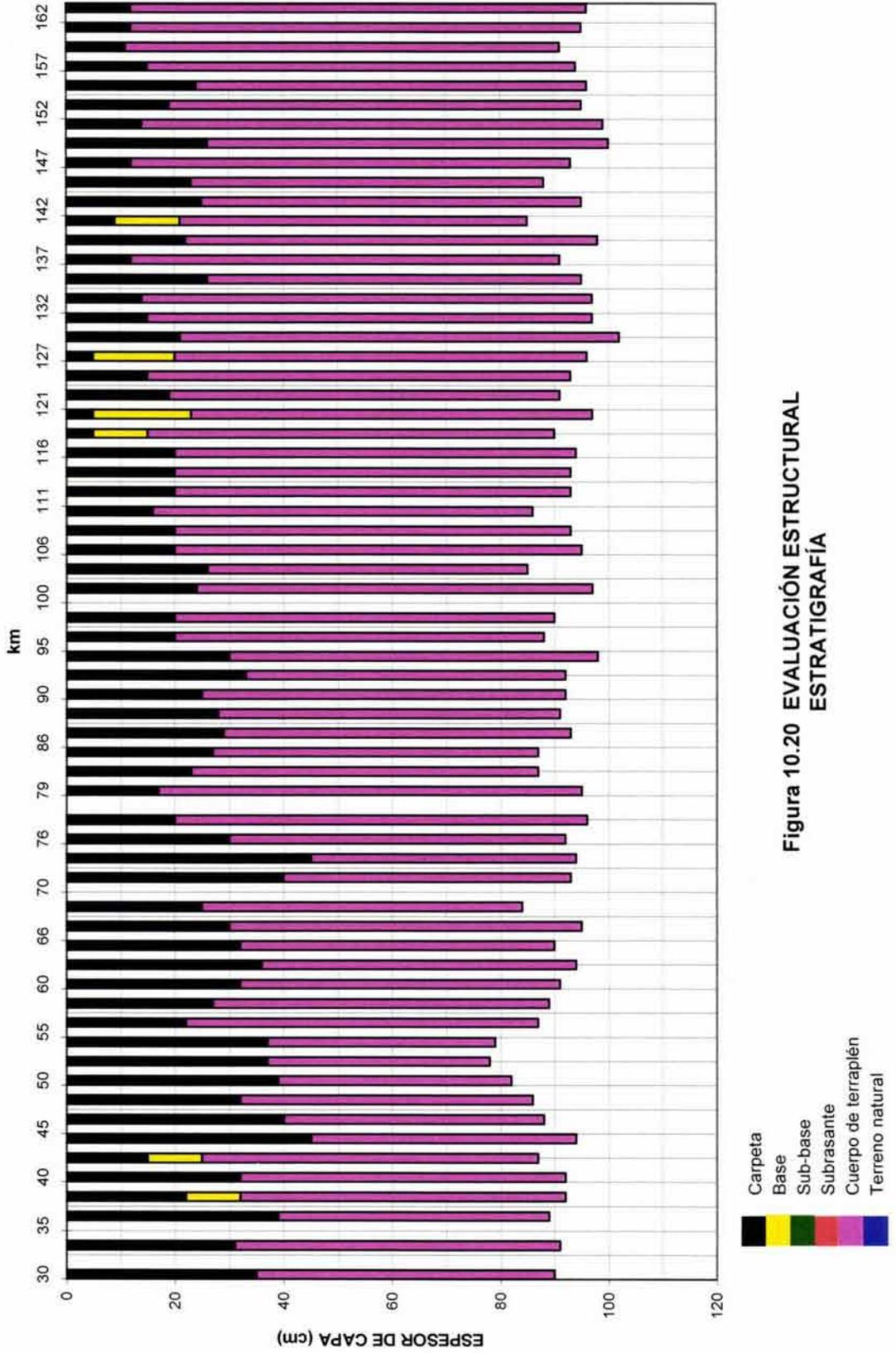


Figura 10.20 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL ESTRATIGRAFÍA



TESIS DOCTORAL EN MECÁNICA DE SUELOS  
M.I. RAÚL VICENTE OROZCO SANTOYO

Carretera: Villahermosa - Cd. del Carmen  
Tramo: Villahermosa - Zacatal  
Subtramo: km. 30 al 160  
Cuerpo: Único  
Carril: Derecho

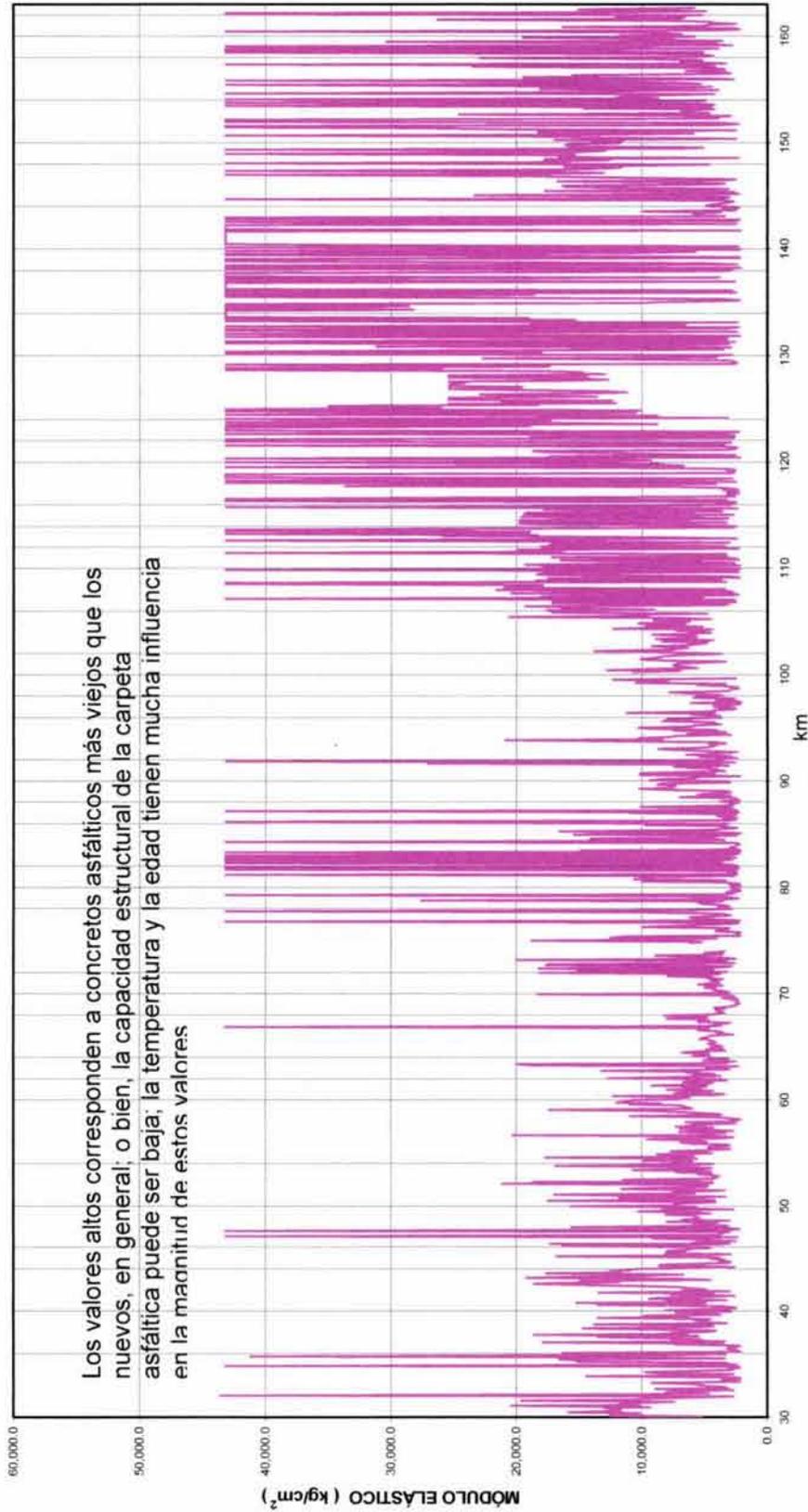
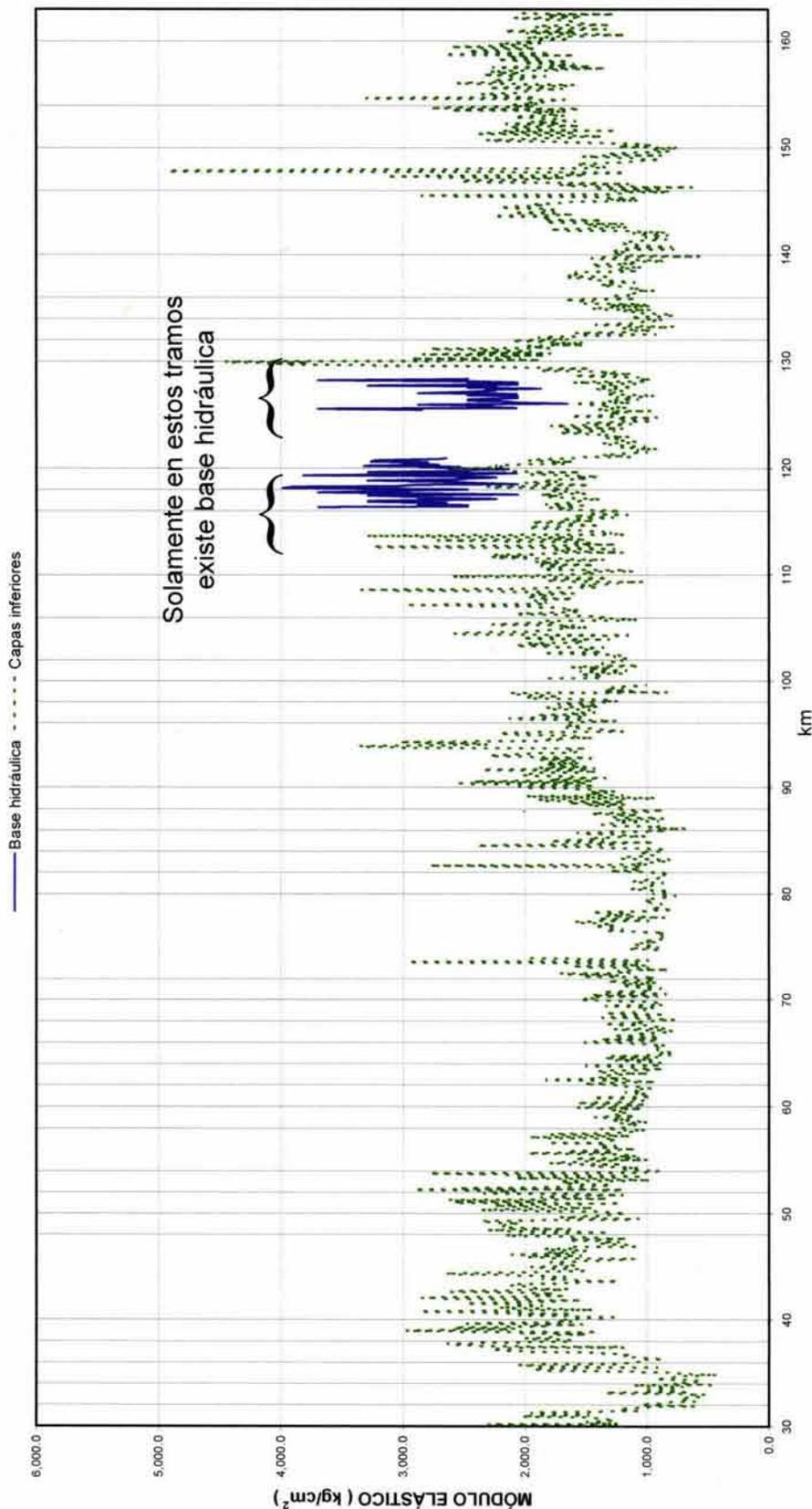


Figura 10.21 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL  
MÓDULO ELÁSTICO  
CARPETA ASFÁLTICA



TESIS DOCTORAL EN MECÁNICA DE SUELOS  
M.I. RAÚL VICENTE OROZCO SANTOYO

Carretera: Villahermosa - Cd. del Carmen  
Tramo: Villahermosa - Zacatal  
Subtramo: km 30 al 160  
Cuerpo: Único  
Carril: Derecho



**Figura 10.22 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL  
MÓDULO ELÁSTICO  
BASE HIDRÁULICA Y CAPAS INFERIORES**

## **PROPUESTA PARA ANALIZAR UN PROYECTO NUEVO, DE REHABILITACIÓN Y/O RECONSTRUCCIÓN DE UN PAVIMENTO**

---

### **11.1 Metodología**

El proceso para efectuar el análisis de un proyecto nuevo, de rehabilitación y/o de reconstrucción de un pavimento, se resume en el diagrama de flujo ilustrado en la Fig. 11.1. En este inciso se explica el significado de cada concepto.

#### **11.1.1 Proyección del tránsito**

Intensidad y frecuencia de cargas para las condiciones actual y futura. Análisis y resumen de resultados.

#### **11.1.2 Evaluación superficial**

Levantamiento visual a pie del deterioro superficial, obtención del Índice de Irregularidad Internacional (III) y la profundidad de rodera con equipo no destructivo (Perfilómetro láser: RSP) y reconocimiento óptico con video digital. Análisis y resumen de resultados.

#### **11.1.3 Evaluación estructural**

Medición de desplazamientos verticales (deflexiones) con equipos no destructivos (Deformómetros de Impacto: FWD o HWD). Obtención del Índice Estructural ( $I_e$ ) para la Calificación Estructural ( $C_e$ ), de acuerdo con lo descrito en el Capítulo 10, inciso 10.2.2. Análisis y resumen de resultados.

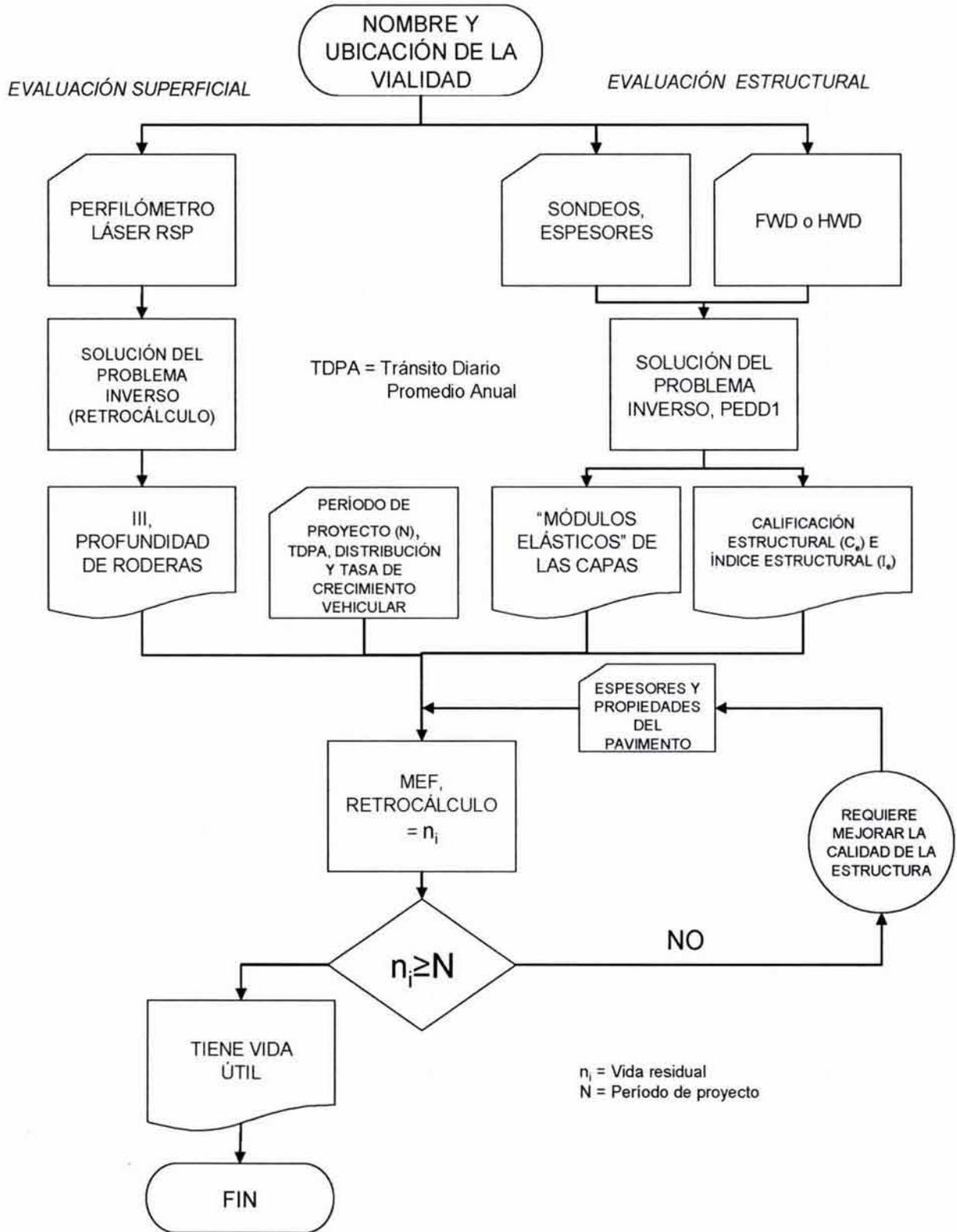


Figura 11.1 METOLOGÍA PROPUESTA PARA ANALIZAR UN PROYECTO NUEVO, DE REHABILITACIÓN Y/O RECONSTRUCCIÓN DE UN PAVIMENTO

### **11.1.4 Obtención de espesores y pruebas de calidad de las capas**

Deducción con equipos no destructivos (Radar de penetración superficial) y confirmación con información histórica, más sondeos exploratorios de verificación ("calas"). Análisis y resumen de resultados.

### **11.1.5 Obtención de módulos elásticos de las capas**

Deducción por retrocálculo ("sólución del problema inverso") con programas de optimización (ajustar la "cuenca de desplazamientos verticales" teórica a la real), para la caracterización de los materiales mediante sus módulos elásticos.

### **11.1.6 Simulación y análisis de opciones para estructuración de capas**

Se describen a continuación:

- a) Comportamiento actual y futuro, deducción de la vida útil, residual o económica, mediante programas de cómputo (cálculo de esfuerzos y deformaciones, efectos de fatiga, combinación de ejes para diferentes intensidades y frecuencias de cargas) y establecimiento de costos comparativos (inicial y diferido), con beneficios totales actualizados y relaciones beneficio/costo.
- b) Definición de las mejores opciones de rehabilitación y/o reconstrucción, con la máxima relación beneficio/costo total actualizada.
- c) Selección de la opción de rehabilitación y/o reconstrucción más prometedora.

### **11.1.7 Elaboración detallada del proyecto de estructuración, con especificaciones de construcción**

A continuación se describe un caso frecuente:

## **11.2 Ejemplo de solución**

Como ilustración, se presenta el siguiente caso típico de pavimento con deterioro "crítico" por fatiga (veáse el Capítulo 8, Fig. 8.1), cuando se está abajo del límite admisible de aceptación y muy cercano al inadmisibles, en cuanto a capacidad de carga relativa de las capas del pavimento se refiere; es preciso realizar las siguientes acciones para rehabilitar el pavimento:

1) Corte (Mín. 25 cm), recuperación, pulverización y mezclado homogéneo *in situ* de toda la carpeta asfáltica y la base asfáltica, (si existe), junto con la capa de apoyo existente: base o sub-base hidráulicas.

2) Mezclado con cemento Portland y agua provenientes de las pipas adosadas al equipo (CMI, Wirtgen, Caterpillar o similar) y homogeneización del conjunto de materiales. El agua de absorción faltante más el agua de mezclado (a) se aplica inmediatamente después del cemento (c), de manera que se cumpla la relación  $a/c = 0.35 \pm 0.05$  (en peso seco)

3) Compactación con rodillo liso vibratorio hasta la máxima compacidad posible (concentración de sólidos = volumen de sólidos / volumen total), sin la ruptura de los granos (las partículas)

4) Aplicación de riegos de agua y luego de emulsión asfáltica, para fines de curado y formación de membrana de impregnación protectora

5) Aplicación de riego de liga, con cemento asfáltico caliente o emulsión asfáltica, polimerizados

6) Tendido de la mezcla asfáltica muy caliente (mínimo de 140 °C) con cemento asfáltico polimerizado y con máquina terminadora ("finisher"), provista de sensores electrónicos tipo láser, excitados con dispositivos instalados firmemente fuera de la zona de trabajo, casi sin la presencia de rastrilleros o tornilleros, llevando un control de calidad estricto principalmente en las temperaturas (mediante sensores láser)

7) Compactación inmediata de la mezcla asfáltica caliente, con rodillo liso estático muy ligero (baja presión de rodillado: 15 kg/cm<sup>2</sup>), para evitar desplazamientos, llevando un control estricto en su velocidad de recorrido (lenta) y ancho de pasada (avance de 1/3 de rodada), así como en las temperaturas (con sensores láser) correspondientes: al salir de la planta, al tender y al compactar

8) Medición de la deflexión (desplazamiento vertical) superficial, para asegurar el valor de proyecto, mediante viga Benkelman (VB), deformómetro de impacto (FWD o HWD) o deformómetro rodante (DR)

9) Medición del coeficiente de fricción superficial, para asegurar el valor de proyecto ( $\mu_p$ ), o del Índice de Fricción Internacional (IFI), mediante un rugosímetro calibrado ( $\mu$ -meter, Norsemeter o similar) y certificado por el Instituto Mexicano del Transporte de la SCT

10) Medición de la irregularidad superficial para asegurar el valor de proyecto (III)

## Capítulo 12

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

De los estudios realizados, cuyos resultados más relevantes se incluyen en esta tesis, se pueden extraer las principales conclusiones y recomendaciones siguientes:

### 12.1 Conclusiones

Primera. Las explicaciones subjetivas y empíricas sobre el comportamiento de los pavimentos en las condiciones actual y futura, han sufrido un cambio drástico muy favorable, gracias a la incursión de la mecánica de suelos en estas obras, con el apoyo de equipos no destructivos de medición.

Segunda. Ahora es posible caracterizar a los materiales constitutivos de las capas del pavimento, gracias al módulo elástico deducido de cálculos programados, pero alimentados de resultados obtenidos con equipos no destructivos.

Tercera. Aunque existan y se utilicen rutinariamente los equipos no destructivos, sumamente útiles en la evaluación y el proyecto de pavimentos, nunca deben soslayarse los estudios geotécnicos tradicionales que permiten asociar sus conclusiones al entendimiento del complicado funcionamiento de estas obras.

Cuarta. La evaluación de pavimentos flexibles con métodos no destructivos y la aplicación de criterios ágiles y oportunos, mediante el Índice Estructural ( $I_e$ ) propuesto en este trabajo y la Calificación Estructural ( $C_e$ ) correspondiente, permite racionalizar las actividades de proyecto, rehabilitación y/o reconstrucción, así como programar las inversiones de conservación con enfoques prioritarios, dentro de la vida útil esperada de las obras.

Quinta. La manera de presentar los resultados de la evaluación del pavimento no destructiva en dos planos (superficial y estructural), es un gran avance en la interpretación conjunta de su comportamiento. Esto ha permitido detectar rápidamente las zonas homogéneas y los puntos de conflicto.

## 12.2 Recomendaciones

Primera. Independientemente de la metodología sugerida para el proyecto de pavimentos (Cap. 11), se insiste en que es necesario caracterizar los materiales que forman las capas del pavimento mediante módulos elásticos como propiedades fundamentales y no valores relativos de soporte, grados de compactación y otros indicadores (humedad, etc.) que sólo son propiedades subordinadas.

Segunda. Para cualquier sección transversal elegida del pavimento, conviene establecer claramente el desplazamiento vertical producto de las simulaciones para cada capa constitutiva (subyacente, subrasante, subbase, base y carpeta asfáltica), con el fin de controlar mediante cartas especiales (zonas de aceptación, corrección y rechazo) los valores realmente obtenidos durante la construcción (*v.gr.* con Viga Benkelman, el analizador sísmico portátil u otro de fácil transporte y manejo) y proceder a los ajustes necesarios en la calidad o los espesores de las capas.

Tercera. Continuar la investigación geotécnica sobre la Sección Invertida, cuyos beneficios han sido notables en muchas carreteras del país. Esta es una actividad prioritaria que requiere la aceptación oficial de las autoridades competentes.

Cuarta. Mejorar el arreglo (distribución) de los sensores en el deformómetro de impacto (FWD y HWD), para precisar más la conformación de la cuenca de desplazamiento verticales en la zona del punto de inflexión comprendida entre los sensores primero y segundo.

---

---

## REFERENCIAS

- Alberro J y Gaziev E, 2002: *Resistencia y Deformabilidad de los Enrocamientos*. XXI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Oaxaca, Oax.
- Andrén P y Lenngren C A, 2002: *Evaluating Subgrade Properties with a High-Speed Rolling Deflectometer*. Pavement Subgrade, Unbound Materials and Nondestructive Testing, Geotechnical Special Publication (GSP) # 98, American Society of Civil Engineering (ASCE)-GEO Institute, Denver Colorado
- Corro C, S y Prado O, G, 1999: *Diseño Estructural de Pavimentos Asfálticos, Incluyendo Carreteras de Altas Especificaciones*, Serie CI-8, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, D.F.
- Dynatest, 1999: *Heavy Vehicle Simulator (Mark IV)*
- EIOCSA, 2003: *Sistemas del Radar de Penetración Superficial y del Reconocedor Óptico de Agrietamientos*, México, DF
- Fontul S, Antunes M y Marcelino J, 2003: *Structural Evaluation of Pavements Using Neural Networks*, Third International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, University of Minho, Guimaraães, Portugal
- Gucunski N, Abdallah I N y Nazarian S, 2000: *Ann Backcalculation of Pavement Profiles from the SASW Test*. Pavement Subgrade, Unbound Materials and Nondestructive Testing, Geotechnical Special Publication (GSP) # 98, American Society of Civil Engineering (ASCE)-GEO Institute, Denver Colorado
- LCPC (Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), 1994: *Conception et Dimensionnement des Structures de Chaussées, Guide technique*, Paris, Francia
- Monismith, CL, 1992: *Pavement Design, Management, and Performance*. Transportation Research Record No. 1354. Part 1. National Academy Press, Washington, D.C.

- Mooney M A, Bong W y Miller G A, 2002: The Determination of Soft Subgrade Modulus for Airport Pavement. Rehabilitation via Backcalculation of Falling Weight Deflectometer Data
- MOPU (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo), 1989: *Instrucción 6.1-1.C y 6.2-1C*, Madrid, España
- Nassar W, Al-Qadi I L, Flintsch G W y Appea A, 2000: Evaluation of Pavement Layer Response at the Virginia Smart Road. Pavement Subgrade, Unbound Materials and Nondestructive Testing, Geotechnical Special Publication (GSP) # 98, American Society of Civil Engineering (ASCE)-GEO Institute, Denver Colorado
- Nazarian, S, y MacDaniel, M, 1999. *Portable Seismic Pavement Analyzer for Nondestructive Pavement Testing*, Center for Highway Materials Research The University of Texas at El Paso
- Orozco-Santoyo R V, 1978: *Compactación y Control de Calidad*, IX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Mérida, Yuc; 1986: *Construcción y Control de Calidad de Pavimentos*, XIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Mazatlán, Sin; 1995: *Prevención de la fatiga en pavimentos flexibles*, XXII Seminario de Ingeniería de Tránsito, Asociación Mexicana de Caminos, Querétaro, Qro; 1996: *El Concepto "Calidad en las Vías Terrestres"*, XII Reunión Nacional de Vías Terrestres, San Luis Potosí, SLP
- Orozco-Santoyo R V y Torres V, V, 1986: *Criterio de aceptación para mezclas asfálticas*, XV Congreso Panamericano de Carreteras, México, DF
- Orozco-Santoyo R V y Torres V, R, 1994: *Evaluación de la Capacidad Estructural de Pavimentos a partir de Mediciones de Desplazamientos Verticales con el Deformómetro de Impacto (KUAB)*, XI Reunión Nacional de Vías Terrestres, Morelia, Mich. Premio José Carreño Román, AMIVTAC
- Orozco-Santoyo R V, 1998: *Seminario: Carpetas Drenantes Ahuladas*, AMIVTAC, Círculo Tecnológico del Asfalto, AMAAC y CAPUFE, Cuernavaca, Mor.
- Orozco-Santoyo R V, 1998a: *Certificación de Niveles de Calidad Característicos*. XIII Reunión Nacional de Vías Terrestres. Oaxtepec, Mor; 1998b: *Supervisión y Control de Calidad de Materiales y Obras*. Diplomado en "Proyecto, Construcción y Conservación de Carreteras", División de Educación Continua-Facultad de Ingeniería-UNAM, México, DF; 1998c: *Enfoque geotécnico de los pavimentos*. XIX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Puebla, Pue
- Orozco-Santoyo R V, 1998 a 2005: "Control de Calidad de Obras", Diplomado en "Proyecto, Construcción y Conservación de Carreteras", División de Educación Continua-FI-UNAM, IMT, México, DF; 2000: *Evaluación Geotécnica de Aeropistas*. Grupo Aeroportuario del Pacífico (GAP), Guadalajara, Jal; 2001: *Evaluación Superficial y Estructural de Pavimentos*. Seminario Internacional sobre Pavimentos. Instituto Mexicano del Transporte (IMT), San Fandila, Qro; "Evaluación Superficial y Estructural de Pavimentos", Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, NL;

- (2003); "Control de Calidad y Especificaciones", Maestría en Construcción y en Geotécnica. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (2003 a 2005)
- Orozco-Santoyo R V, 1999a: *Evaluación Geotécnica de Pavimentos*. II Seminario sobre Construcción y Conservación de Pavimentos en la Ciudad de México. Planta de Asfalto del Gobierno del Distrito Federal, Secretaría de Obras y Servicios. Asociación Mexicana del Asfalto, A.C. CICM, México, DF; 1999b: *Evaluación Geotécnica de Pavimentos*. Primer Congreso Nacional del Asfalto, AMAAC. CICM. México, DF; 1999c: *Evaluación Geotécnica de Pavimentos*. VIII Reunión Nacional de Laboratoristas Jefes de Grupo (ANDEL), IV Conferencia Ing. Javier Saborio Ulloa. Colima, Col
- Orozco-Santoyo R V y Orozco E, R V, 2003: *Evaluación Superficial y Estructural de Pavimentos*, Tercer Congreso Mexicano del Asfalto, Asociación Mexicana del Asfalto, AC (AMAAC), México, DF
- Real Academia Española, 1992: *Diccionario*, Editorial ESPASA CALPESA, Edición XXI, Madrid, España
- RILEM, 2004: Conferencia Internacional: *Cracking in Pavements*, Limoges, Francia
- Romo O, M P y Orozco-Santoyo R V, 1978: *Aplicaciones del método del elemento finito al análisis de pavimentos*, IV Congreso de la Academia Nacional de Ingeniería, A.C., Mérida, Yuc; 1990: *Rigidización de sub-bases. Un nuevo enfoque en el diseño de pavimentos flexibles*, XV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, San Luis Potosí, SLP
- Romo O, M P y Torres V, R, 1993: *Procedimiento simplificado para el diseño geométrico de pavimentos flexibles*, Patrocinado por RVO y Cía. para el Instituto de Ingeniería, UNAM, México, DF
- Romo O, M P, Rangel J L Flores CO y García SR, 1998: *Aplicaciones de las Redes Neuronales a la Geotecnia*, Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Puebla, Pue.
- Romo O, M P and García S R, 2003: *Neurofuzzy mapping of CPT values into soil dynamics properties*, International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 23, Num. 6, August, pp 473-482
- Russell H, S y Hossain M, 2000: *Design Resilient Modulus of Subgrade Soils from FWD Test*. Pavement Subgrade, Unbound Materials and Nondestructive Testing, Geotechnical Special Publication (GSP) # 98, American Society of Civil Engineering (ASCE)-GEO Institute, Denver Colorado
- RVO y Cía., 2001: Parte I. *Evaluación del Pavimento en la Carretera Aguascalientes-Zacatecas* (Tramo: Rincón de Romos-Entronque Guadalupe) del km 45 al 79 (25 km). Parte II. *Evaluación del Pavimento en la Carretera Villahermosa-Ciudad del Carmen* (Tramo Villahermosa-Zacatal) del km 30 al 160 (130 km). Para la Dirección General de Carreteras Federales Subsecretaría de Infraestructura. Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)

- RVO y Cía., 2001: *Evaluación Superficial y Estructural del Pavimento en la Carretera Coatzacoalcos-Salina Cruz* (Tramo: Acayucan-Lim. Edos. Ver./Oax. Del km 112 al km 139.94 (27.94 km). Para el Centro SCT, Veracruz
- RVO y Cía., 2001: *Dictamen Técnico de la Estructura del Pavimento en la Autopista Córdoba-Veracruz*; carriles de baja velocidad, Cuerpo A: km 0 a 14, Cuerpo B: km 0 a 14, 26.6 a 26.7, 34.95 a 35.05, 35.98 a 36.02, 37.20 a 37.35, 39.40 a 39.74 y 41 a 43. Para CAPUFE, Delegación Regional Zona VII Golfo
- RVO y Cía., 2004: *Estudio del Pavimento de la Autopista México-Tuxpan*, Tramo: Entronque Asunción-Entronque Tejocotal. Para Fideicomiso Autopistas y Puentes del Golfo Centro
- Seyhan U y Tutumluer E, 2000: *Advanced Characterization of Granular Materials for Mechanistic Based Pavement Design*. Pavement Subgrade, Unbound Materials and Nondestructive Testing, Geotechnical Special Publication (GSP) # 98, American Society of Civil Engineering (ASCE)-GEO Institute, Denver Colorado
- Torres V R, 1998: *Evaluación superficial de pavimentos con perfilómetro LASER*, XIII Reunión Nacional de Vías Terrestres, Oaxtepec, Mor.
- Ullidtz P, 1987: *Pavement Analysis*, Institute of Roads, Transport and Town Planning, The Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, Ed. ELSEVIER.
- Ullidtz, P, Harvey J T, Riemer M y Prozzi J A, 2000: *Layer moduli during HVS testing: comparing laboratory results with backcalculations from FWD and MDD deflections*, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark; University of California, Berkeley, USA; CSIR, Transportek, Pretoria, South Africa.
- University of Minho, 2003: *Third International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control*, Guimarées, Portugal
- University of Texas, 1997: *Texas Regional Concrete Conference*, Austin, Texas. Memorias
- University of Washington, 1997: *8<sup>th</sup> Internacional Conference on Asphalt Pavements*, International Society for Asphalt Pavements (ISAP), Seattle, Washington, USA
- Vojislav K, 2001: *Learning and Soft Computing, a Bradford Book*, The IMT Press, Cambridge Massachussets, London, England
- William G, W y Shoukry S, N, 2000: *Mechanistic Evaluation of the depth to Bedrock and Its Effect of the Response of 3D FE Pavement Models*. Pavement Subgrade, Unbound Materials and Nondestructive Testing, Geotechnical Special Publication (GSP) # 98, American Society of Civil Engineering (ASCE)-GEO Institute, Denver Colorado
- Yoder E J, Witzak M W, 1975: *Principles of pavements design*, New York, John Wiley
- Zárate A, M, 2003: *Diseño de Pavimentos Flexibles*, Asociación Mexicana del Asfalto, A.C. (AMAAC), México, D.F.
- 6D Solutions, 2004: *Cidex® y Rotaflex®, Rejillas de Fibra de Vidrio: Refuerzo de Concretos Asfálticos. Tratamiento de las Fisuras*, Sainte Foy lès Lyon, Francia. [www.6dsolutions.com](http://www.6dsolutions.com)

# **ANEXO A**

## ANEXO A

### RESEÑA HISTORICA DE LOS ASFALTOS

- John Metcalfe, quien nació en Escocia en 1717, cuando tenía 40 años de edad y a pesar de estar ciego desde los 6 años, construyó 180 millas de carretera en Yorkshire, Inglaterra. Insistió en asegurar un buen drenaje superficial (transversal), una buena base hidráulica utilizando material granular grueso y/o "piedras" grandes, cubriéndolas con el suelo aprovechable del camino y terminando con una capa de gravilla. Las superficies del pavimento tenían fuertes pendientes laterales (bombeo), para que el agua drenara hacia las zanjas hechas ex profeso a ambos lados

- Tomás Telford nació en Eskdale, Escocia, en el año de 1757. Se dedicó a perfeccionar el método de construir caminos con "piedras" partidas, con un espesor de acuerdo con la intensidad y frecuencia del tránsito. También estudió el alineamiento horizontal y el vertical de los caminos, los cuales continúan en uso hoy

- John Loudon MacAdam nació en Escocia en 1757, a 40 millas de Eskdale. Trabajó y proyectó caminos con "piedra" partida sobre el suelo natural, las cuales deberían unirse y trabarse con su propia angulosidad, para formar una superficie resistente y durable. Estos principios todavía se aplican hoy

- Los proyectos de Telford eran más caros que los de MacAdam, pero eran de superior calidad, al grado de que muchos de sus caminos todavía existen. Eran más económicos los de MacAdam y se duda que todavía existan algunos

- La brea y los alquitranes (de hulla o petróleo) calientes se utilizaron en 1820 para adherir y juntar las "piedras" partidas (Tarmacadam). Este tipo de mezcla la patentó Warren Brothers en 1910, en Cambridge, Massachusetts, EUA (Hoy esa compañía se llama APAC)

- A principios del siglo XIX, la "piedra" o roca asfáltica (asfaltita) y el asfalto natural de mina, se usaban como materiales de construcción. También se utilizaron durante 7 años para lograr impermeabilidad. El registro más antiguo de una pavimentación de calles con asfalto se remonta a Babilonia, entre los años 625 y 604 AC

- El lago de asfalto natural en Trinidad es el más grande del mundo. En 1848, lo descubrió Sir Walter Raleigh en su tercer viaje a este lugar. Ésta fue la primera fuente de asfalto en América y luego el lago Bermúdez en Venezuela

- Aunque cierto número de pavimentos de brea o alquitrán de carbón (no asfalto) fueron construidos entre los años 1860 y 1870, el primer pavimento asfáltico en EUA fue una mezcla de asfalto con arena que se colocó en 1870 enfrente del Palacio Municipal, en Newark, NJ, por un químico belga llamado Edmund J. DeSmedt. En realidad, este pavimento fue una copia del pavimento de asfalto natural de mina, utilizado en 1852 en la carretera de París a Perpignan en Francia

- En el año 1876, el Presidente Grant formó un grupo de estudio con ingenieros del ejército que recomendaron que la Avenida Pensilvania, en Washington, DC, se pavimentara con hojas asfálticas hechas por "Asfaltos de Trinidad". Ese pavimento se mantuvo en buenas condiciones durante 11 años. Parte de esta actividad de pavimentación fue realizada por un exportador de "Asfaltos de Trinidad", llamado Amzi Alonzo Barber, quien en 1893 formó "Barber Asphalt & Pavement Co". y contrató al Capitán Francis V. Greene, que era Ing. Asistente de Pavimentación, del Distrito de Columbia

- El primer pavimento de concreto asfáltico fabricado en caliente en EUA se colocó en Washington DC, por N.B. Abbott, en 1868, utilizando brea (alquitrán) de carbón como ligante. Los asfaltos (cemento y productos asfálticos, como los rebajados y las emulsiones) provenientes de la refinación del petróleo, aparecieron a mediados de 1870; se transportaban en barriles por barco desde California y luego por tren

- Antes de 1900, las pruebas de laboratorio eran desconocidas, hasta que Logan Waller Page, de la Universidad de Harvard, las estudió y desarrolló técnicamente en el "Laboratorio de Puentes y Caminos en Francia". A su retorno, introdujo en Estados Unidos los métodos franceses de prueba para laboratorios

- En el presente, se utilizan aditivos en el cemento asfáltico para incrementar la estabilidad de la mezcla en caliente, tanto en altas como en bajas temperaturas (Super Pave)

- También los asfaltos modificados (con polímeros) han logrado aumentar la capacidad de las mezclas para:

- a) Reducir la profundidad de rodadura
- b) Proveer excelente drenaje, tanto superficial como interno, con las superficies abiertas y
- c) Aumentar la vida de los pavimentos

Esta moderna tecnología fue traída de Europa en 1990 y perfeccionada en el Estado de Georgia, para implementarla en las vías de comunicación en Atlanta, en la Olimpiada de 1996

- Uno de los factores más importantes que hacen que el pavimento asfáltico tenga ventajas sobre el pavimento rígido de concreto hidráulico, es su flexibilidad. Con los concretos asfálticos, generalmente los costos de conservación son mucho más bajos

- Todos los grandes pioneros de la construcción de carreteras, desde la época de los romanos, estuvieron de acuerdo siempre en que para lograr una buena carretera, los tres factores más importantes son: **drenaje, drenaje y drenaje**

- En Estados Unidos hay 4.5 millones de millas de carreteras. Cerca de 3 millones de millas están pavimentadas. El 96% de esta longitud está pavimentado de concreto asfáltico. Entre 500 y 550 millones de toneladas de concreto asfáltico en caliente se depositan anualmente (dos toneladas por habitante, promedio)

- La Administración Federal de Carreteras informa que se remueven cerca de 120 millones de toneladas de pavimento asfáltico anualmente durante la reconstrucción de carreteras. De eso, se recicla el 80% (95 millones de toneladas). La Industria de Asfalto Caliente en EUA utiliza a 300,000 personas directamente y a otras 600,000 indirectamente. El valor de toda la pavimentación es de \$18 mil millones de dólares al año

## REFERENCIA

Suárez C, 2004: *La Evolución de las Mezclas de Asfalto Caliente*, Construcción Pan-Americana, Noviembre, página 40

# **ANEXO B**

## ANEXO B

### METODOLOGÍA PARA ESTIMAR MÓDULOS ELÁSTICOS DE CAPAS Y VIDA ÚTIL ESPERADA DE UN PAVIMENTO

#### CONTENIDO

---

B.1	MÓDULOS ELÁSTICOS DE LAS DISTINTAS CAPAS QUE FORMAN EL PAVIMENTO	1
	B.1.1 Fundamentos	1
	B.1.2 Secuencia de cálculo	3
B.2	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	4
	B.2.1 Fundamentos	4
	B.2.2 Número de ciclos a la falla	6
	B.2.3 Vida útil esperada	7
	B.2.4 Secuencia de cálculo	8
	REFERENCIAS	9

## ANEXO B

### METODOLOGÍA PARA ESTIMAR MÓDULOS ELÁSTICOS DE CAPAS Y VIDA ÚTIL ESPERADA DE UN PAVIMENTO

#### B.1 MÓDULOS ELÁSTICOS DE LAS DISTINTAS CAPAS QUE FORMAN EL PAVIMENTO

Con ayuda del programa de computadora PEDD1 (Uddin, 1993), además de los datos de desplazamientos verticales obtenidos con el deformómetro de impacto (equipo dinámico denominado en inglés *Falling Weight Deflectometer, FWD*) y la carga aplicada, así como los espesores y las características geotécnicas de las capas, es posible deducir los módulos elásticos de los materiales que conforman la estructura del pavimento.

##### B.1.1 Fundamentos

- Para deducir los módulos elásticos "equivalentes" (E), el programa PEDD1 se basa en el concepto más elemental de la elasticidad, la relación entre el esfuerzo aplicado ( $\sigma$ ) y la deformación unitaria producida ( $\varepsilon$ ), de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$\varepsilon = 1/E \left[ \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3) \right] \quad (B.1)$$

donde:

$\mu$  = Relación de Poisson

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  = *Esfuerzos principales*: mayor, intermedio y menor

- Los resultados que se obtienen con los sensores del deformómetro de impacto son los desplazamientos verticales producidos por la aplicación de una carga previamente establecida
- Con la carga aplicada, los espesores y las características geotécnicas de las capas del pavimento, las relaciones de Poisson y los módulos elásticos *propuestos* inicialmente por el programa, se calculan los desplazamientos verticales debajo de los sensores. Estos desplazamientos calculados se comparan con los medidos, de acuerdo con la configuración de los sensores señalada en la Fig. B.1 y tomando en cuenta el efecto de la carga ejemplificado en la Fig. B.2

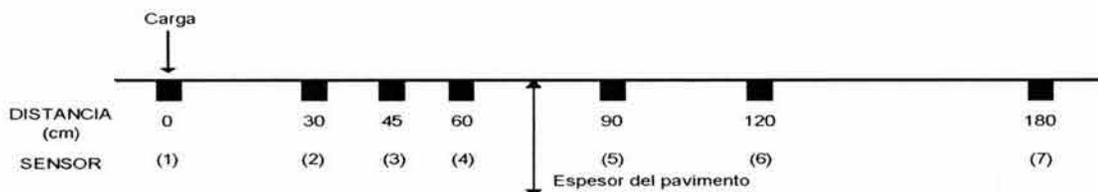


Figura B.1. CONFIGURACIÓN DE LOS SENSORES

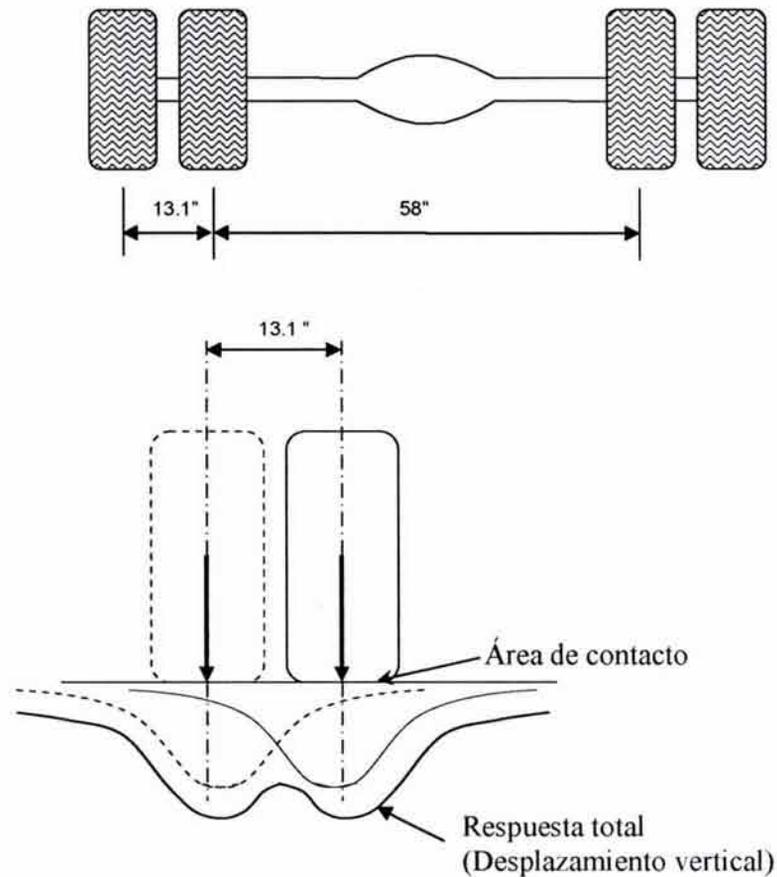


Figura B.2. EFECTO DE LA CARGA DEL EQUIPO

- Si los desplazamientos verticales calculados son diferentes a los medidos, entonces se *proponen* otros valores de módulos elásticos de las capas del pavimento. Con esto se calculan nuevamente los desplazamientos verticales
- El proceso lo repite el mismo programa hasta que los valores de los desplazamientos verticales calculados y los medidos converjan. Es en este momento en que se deducen los valores de los módulos elásticos "equivalentes" de las capas del pavimento para la condición *in situ*. Este procedimiento es lo que se denomina retrocálculo o solución del problema inverso
- La temperatura predominante, en el momento de aplicación de la carga, es un factor muy importante a tomar en cuenta, ya que influye en los desplazamientos verticales que presenta el pavimento
- Para establecer los parámetros del programa es necesario caracterizar la zona en estudio por analizar, de acuerdo con los criterios propuestos en la Tabla B.1

Tabla B.1  
 DETERIORO DEL PAVIMENTO Y CLAVES DE CONDICIÓN

CLAVE	CONDICIÓN DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO BASADO EN LAS CONDICIONES DE DETERIORO
0	<b>Muy bien:</b> Menos de 5% del área con agrietamiento ligero y/o con defectos en la superficie; no requiere conservación
1	<b>Bien:</b> Entre 5 y 10% del área con agrietamiento de ligero a moderado; con roderas ligeras y defectos en la superficie de rodamiento; requiere conservación menor preventiva en zonas localizadas
2	<b>Bien:</b> Entre 10 y 20% del área con agrietamiento, roderas y defectos ligeros a moderados en la superficie de rodamiento; menos de 5% del área con agrietamiento, roderas y defectos en la superficie de rodamiento severos; requiere conservación menor preventiva
3	<b>Regular:</b> Entre 20 y 30% del área con agrietamiento, roderas y defectos en la superficie de rodamiento, de ligeros a moderados; de 5 a 10% del área con agrietamiento, roderas y defectos en la superficie de rodamiento severos; requiere conservación menor de rutina en zonas localizadas
4	<b>Regular:</b> Entre 30 y 40% del área con agrietamiento, roderas y defectos en la superficie de rodamiento, de ligeros a moderados; de 10 a 15% del área con agrietamiento, roderas y defectos en la superficie de rodamiento severos; requiere conservación menor de rutina en zonas localizadas y conservación general preventiva, fresado y repavimentación opcional
5	<b>Regular:</b> Entre 40 y 45% del área con agrietamiento, roderas y defectos en la superficie de rodamiento; de ligeros a moderados; de 15 a 25% del área con agrietamiento, roderas y defectos en la superficie de rodamiento severos; requiere conservación menor en zonas localizadas, conservación general preventiva y conservación mayor en toda el área
6	<b>Mal:</b> Entre 45 y 55% del área con agrietamiento, roderas y defectos en la superficie de rodamiento, de ligeros a moderados; de 25 a 55% del área con agrietamiento, roderas y defectos en la superficie de rodamiento severos; requiere conservación menor y mayor en toda el área
7	<b>Mal:</b> Entre 55 y 60% del área con agrietamiento, roderas y defectos en la superficie de rodamiento, de ligeros a moderados y severos; requiere conservación mayor en toda el área
8	<b>Muy mal:</b> Entre 60 y 70% del área con agrietamiento, roderas y defectos en la superficie de rodamiento ligero, moderado y severo; requiere conservación mayor en toda el área
9	<b>Muy mal:</b> Más de 70% del área con agrietamiento y/o roderas; hasta 100% del área con defectos en la superficie de rodamiento, de ligeros a moderados y severos; pavimento que llegó a la falla; requiere conservación mayor y/o reconstrucción total del área

### B.1.2 Secuencia de cálculo

- Primero se designa el archivo de entrada que contiene los desplazamientos verticales producidos por las cargas aplicadas, que son los datos obtenidos con el deformómetro de impacto para cada tramo o subtramo de pavimento

También se designa el nombre del archivo de salida en donde estarán los resultados del programa.

- Dentro del programa se selecciona el tipo de capa superficial de rodamiento del pavimento objeto de análisis. Se tienen 2 posibles opciones: **AC** para carpeta de concreto asfáltico o **PCC** para carpeta de concreto hidráulico
- A continuación se definen:
  - El tipo de material (suelo granular o estabilizado con cemento Portland, o con cemento o emulsión asfálticos)
  - Los espesores de las capas que conforman la estructura del pavimento
  - El módulo elástico inicial *propuesto*, a partir del cual habrán de realizarse las interacciones

En esta parte también se introduce el dato de la temperatura correspondiente al momento en que se hicieron las mediciones.

- Una vez completada la información inicial, se corre el programa PEDD1 y se consultan los resultados en el archivo designado para salida

En el archivo de resultados, por columnas se presenta el listado de los módulos elásticos correspondientes a cada capa del pavimento y por renglones el valor para cada cadenamiento en donde se hizo la medición del desplazamiento vertical. Adicionalmente, aparece un renglón para cada capa con el valor promedio del módulo elástico correspondiente a todo el tramo o subtramo considerado del pavimento.

## B.2 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

### B.2.1 Fundamentos

Con el MEF se tiene un procedimiento que permite evaluar el estado generado de esfuerzos y deformaciones en un medio continuo (pavimento), a partir de la aplicación de las solicitaciones de los vehículos. Básicamente, consiste en discretizar el medio en un número finito de elementos, interconectados en sus fronteras por nodos comunes a dos o más elementos. Esto se ilustra en la Fig. B.3 (Romo, 1993; Torres, 1992).

- Por medio de una función polinomial se efectúan interpolaciones dentro del campo de desplazamientos, para obtener la matriz de rigidez del elemento
- Se ensamblan las matrices de rigidez de los elementos para obtener la matriz de rigidez global
- El vector de cargas se aplica en los nodos correspondientes a los ejes del vehículo (Fig. B.4) y se resuelven las ecuaciones de equilibrio para los desplazamientos nodales
- Se calculan los esfuerzos y las deformaciones en cada elemento, a partir de dichos desplazamientos (Hughes, 1987; Romo y Torres, 1993; Torres, 1992)

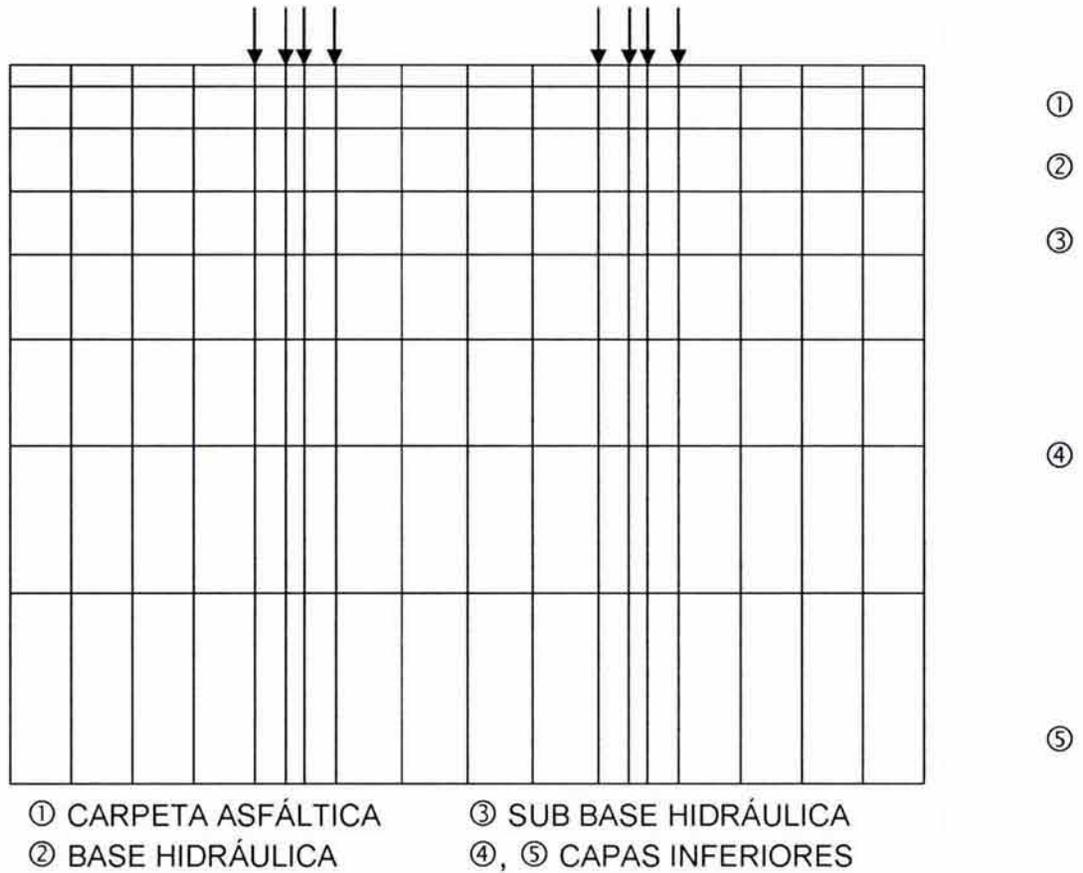


Figura B.3  
MALLA DE ELEMENTOS FINITOS

CARGA POR EJES (t)	ARREGLO DE EJES	DISTRIBUCIÓN	CARGA APLICADA AL ELEMENTO (↓ t)
6.5			1.625
11			1.375
19.5			1.220
18			1.125
22.5			0.940

Figura B.4. CARGAS APLICADAS A LA VIALIDAD

### B.2.2 Número de ciclos a la falla

- Existen correlaciones experimentales para obtener el número de ciclos (repeticiones o aplicaciones de carga de los ejes de los vehículos) para llegar a la falla en la(s) capa(s) de los pavimentos ( $N_f$ ), en función de las deformaciones unitarias máximas a compresión ( $\varepsilon_v$ ) y a tensión ( $\varepsilon_t$ ), o bien de los esfuerzos máximos a tensión ( $\sigma_t$ ).

Para las capas de suelo compactado, se aplica la siguiente expresión (Dauzats, *et al.*, 1984; Marchand, *et al.*, 1984):

$$N_f = \left[ \frac{0.021}{\varepsilon_v} \right]^{0.24} \quad (\text{B.2})$$

donde:

$\varepsilon_v = \Delta L / L$  (deformación unitaria máxima a compresión)

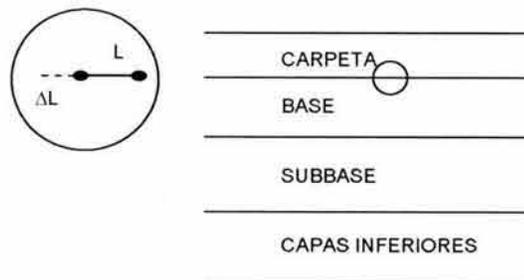


Para la carpeta asfáltica, se aplica la fórmula siguiente (Marchand, 1984):

$$N_f = \left( \frac{0.00296692}{\varepsilon_t} \right)^5 \quad (\text{B.3})$$

donde:

$\varepsilon_t = \Delta L / L$  (deformación unitaria máxima a tensión)



Para las capas rigidizadas con cemento Portland, se utiliza la siguiente correlación (Uddin, 1993):

$$N_f = 10^{12 \left( 0.8686 - \frac{\sigma_t}{21} \right)} \quad (\text{B.4})$$

donde:

$\sigma_t$  = esfuerzo máximo de tensión en la parte inferior de la capa rigidizada (kg/cm<sup>2</sup>)

### B.2.3 Vida útil esperada

Debido a que los resultados varían para los diferentes tipos de vehículos y es distinto su número diario de ciclos (repeticiones o aplicaciones) hasta llegar a la falla ( $N_f$ ), es necesario tomar en cuenta conjuntamente todos los valores de  $N_f$  (mínimos), con el fin de estimar el daño que recibirá el pavimento durante su vida útil esperada. Esto se logra al aplicar la Ley de Miner (Dauzats, 1984), por medio de la cual se acumulan los daños causados por cargas diferentes. Esta ley establece que la condición de falla se alcanza cuando:

$$\sum_{i=1}^e \left( \frac{n_i}{N_i} \right) = 1 \quad (\text{B.5})$$

donde:

$n_i$  = número de aplicaciones de carga para el eje considerado, que se tienen previstas durante la vida útil esperada

$N_i$  = número de aplicaciones de carga para el eje considerado, que puede resistir el pavimento. Se obtiene al aplicar las ecuaciones de fatiga (Ecs. B.2 a B.4)

$e$  = número total de tipos de ejes considerados

El valor de  $N_i$ , para un tipo de eje dado, corresponde al valor mínimo de los siguientes parámetros:  $N_f(\epsilon_v)$  en la Ec. B.2,  $N_f(\epsilon_t)$  en la Ec. B.3 y  $N_f(\sigma_t)$  en la Ec. B.4.

Por otra parte, el pronóstico del número acumulado de aplicaciones de carga de un eje determinado está dado por (Dauzats, 1984):

$$n_i = \frac{365E_o}{Ln(1+r)} \left[ (1+r)^a - 1 \right] \quad (B.6)$$

donde:

$E_o$  = número total de aplicaciones de carga del eje considerado, el primer día del período de análisis

$r$  = tasa de crecimiento vehicular anual (decimales)

$a$  = vida útil esperada (años)

De acuerdo con las consideraciones para las diferentes estructuraciones analizadas, se obtiene la Ec. B.7, al sustituir la Ec. B.6 en la Ec. B.5:

$$\frac{365}{Ln(1+r)} \left[ (1+r)^a - 1 \right] \sum_{i=1}^e \frac{E_{oi}}{N_i} = 1 \quad (B.7)$$

donde:

$E_{oi}$  = número total de aplicaciones de carga del eje  $i$ , el primer día del período de análisis (el subíndice "i" corresponde a la sumatoria).

Por consiguiente, el problema se reduce a despejar el valor de la vida útil esperada "a" de la Ec. B.7.

#### B.2.4 Secuencia de cálculo

Se presenta a continuación:

- En principio, es necesario acotar la malla de elementos (Fig. B.3); así, cada uno de los 144 elementos cuenta con dimensiones (horizontal y vertical) y propiedades de material (módulo elástico y relación de Poisson), dependiendo de la capa a la que pertenezca
- Las dimensiones y propiedades de los materiales que caracterizan a cada elemento se designan con base en la estructura del pavimento. Los módulos elásticos de los materiales serán los calculados con el procedimiento descrito en la secuencia de cálculo del Capítulo B.1, inciso B.1.2)
- A continuación, se prepara el archivo de datos con el formato solicitado por el

sistema. Este archivo habrá de ser único para cada carga aplicada; es decir, que para una misma malla de elementos se tendrán cinco archivos diferentes, ya que la estructura por analizar será sometida a la acción de cinco cargas que generalizan los diferentes tipos de vehículos. Los archivos así creados se agregarán a la ruta de ejecución del programa.

- Se corre el programa "TEST0", el cual genera un archivo de resultados con deformaciones unitarias a tensión, a compresión y esfuerzos a tensión (este último para los casos en que exista alguna capa rigidizada en la estructura del pavimento, como en la Sección Invertida)
- El archivo de resultados presenta un listado de los nodos del No. 1 al 171, con sus respectivos desplazamientos horizontales y verticales, así como los desplazamientos acumulados por nodo y los esfuerzos acumulados en cada sólido o elemento
- A partir de los valores de desplazamientos acumulados, se seleccionan los valores máximos, los cuales se sustituyen en las ecuaciones B.2 a B.4 y B.7 para obtener finalmente los ciclos de falla y la vida útil esperada

## REFERENCIAS

Son las siguientes, en orden alfabético:

Dauzats, M., Lichtenstein, H. Y Marchand J. P. (1984). "Exemple d'utilisation de la Méthode Rationnelle de Dimensionnement: le transfert d'un Eugin Exceptionnel dans l'Enceinte du Port Autonome de Marseille", Número especial, Mécanique des chaussées, del Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et chaussées, París, Francia.

Hughes, T (1987). "The finite element method. Linear static and dynamic finite element analysis. Englewood, New Jersey, USA

Marchand, J.P., Dauzats, M. Lichtenstein, H y Kobisch, R. (1984). "Quelques Formules utiles pour le calcul des chaussées sur petites programmables" Número especial, Mécanique des chaussées, del Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et chaussées, París, Francia.

Romo, M.P.; Torres, R. (1993). "Procedimiento simplificado para el diseño geométrico de pavimentos flexibles". Proyecto realizado en el Instituto de Ingeniería-UNAM, con patrocinio de RVO y Cía.

Torres, R. (1992). "Metodo para el diseño geométrico de pavimentos flexibles", Tesis de Maestría, UNAM, México

Uddin, W. (1993). "Pavement Evaluation Based on Dynamic Deflection" PEDD1 Versión 1.1 Owner's guide. Programa elaborado especialmente para RVO y Cía., Silver Spring, Maryland, USA

# **ANEXO C**

## ANEXO C

### RADAR DE PENETRACIÓN SUPERFICIAL PARA ESPESORES DE CAPA EN LOS PAVIMENTOS

#### CONTENIDO

---

C.1	INTRODUCCIÓN	1
C.2	EQUIPO QUE SE UTILIZA	1
C.2.1	Características básicas de los Sistemas GPR	2
C.2.2	Antena aérea	4
C.2.3	Procesador principal	4
C.2.4	Odómetro electrónico de alta precisión	5
C.2.5	Equipo GPS	5
C.2.6	Computadora portátil	5
C.2.7	Programa de cómputo	5
C.3	TRABAJOS DE GABINETE	7
C.4	RECOLECCIÓN DE DATOS	7
C.5	INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS DEL EQUIPO GPR	7
C.6	GENERACIÓN DEL BANCO DE DATOS	8
	REFERENCIA	8

## ANEXO C

### RADAR DE PENETRACIÓN SUPERFICIAL PARA ESPEORES DE CAPA EN LOS PAVIMENTOS

#### C.1 INTRODUCCIÓN

Recientemente (2003 a 2005), se han efectuado trabajos en México sobre evaluación de pavimentos con el radar de penetración superficial (GPR, por las siglas en inglés de “*ground penetrating radar*”), de acuerdo con una metodología establecida (EIOCSA, 2003). Asimismo, se han capacitado especialistas para la correcta interpretación de las imágenes resultantes, que es la actividad más crítica del proceso. Además, es indispensable que participen otros especialistas con amplia experiencia en los principales aspectos de evaluación de pavimentos (por ejemplo: sondeos geotécnicos, evaluación estructural no destructiva, inspección visual del deterioro superficial, proyectos de rehabilitación y/o reconstrucción de pavimentos,...).

#### C.2 EQUIPO QUE SE UTILIZA

El sistema denominado SIR-20 de la empresa norteamericana Geophysical Survey Systems, Inc. (GSSI), corresponde a uno de los equipos más avanzados disponibles actualmente en el medio internacional. GSSI es la empresa líder en el mundo en tecnología de radar de penetración superficial para diferentes aplicaciones de ingeniería civil, como en la evaluación de pavimentos y de la superestructura de los puentes, así como la detección de instalaciones subterráneas. El equipo SIR-20 se instala en una camioneta tipo “van”.



Figura C.1. FOTOGRAFÍA DEL EQUIPO GPR, EN LA QUE SE APRECIA LA ANTENA AÉREA FIJADA A LA DEFENSA TRASERA DEL VEHÍCULO DE MEDICIÓN (EIOCSA, 2003)

El sistema GPR consta básicamente de los siguientes elementos:

- Antena aérea
- Barra de sujeción de la antena, fijada a la defensa trasera, la cual permite el desplazamiento lateral de la antena a cualquier posición transversal de un carril de circulación
- Procesador central SIRveyor SIR-20, con capacidad para la operación simultánea de dos antenas
- Computadora portátil de uso rudo, marca Panasonic, modelo ToughBook
- Odómetro electrónico de alta precisión
- Conexión a equipos GPS
- Programa de cómputo para la operación del GPR
- Programa de cómputo para el proceso de los datos del GPR, denominado "RADAN"
- Programa de cómputo para la interpretación de las capas de la estructura del pavimento, denominado "*Road Structure Assessment Module*"
- Programa de cómputo para la creación y el análisis de imágenes en tres dimensiones de los datos del GPR, denominado "*3D QuickDraw Module*"

El equipo GPR puede ser utilizado a velocidades de circulación cercanas a 80 km/h, con lo que se logra un gran rendimiento en los trabajos de campo. La interpretación de los datos del GPR requiere experiencia en este proceso, la cual debe ser complementada con otras disciplinas de la ingeniería civil.

Por sus características, el equipo GPR no necesita dispositivos de seguridad especiales, como vehículos de escolta, bandereros, etc. Sin embargo, el vehículo de prueba cuenta con una "torreta" de luz ámbar y dos señales reflejantes fijadas en las puertas traseras, las cuales informan a los demás conductores sobre las mediciones realizadas.

En esencia, las mediciones con el equipo GPR se realizan en una trayectoria específica de un carril de circulación dado (por ejemplo, rodada derecha, rodada izquierda o al centro de los carriles de circulación). De esta manera y una vez realizado el proceso de los datos, se obtiene un perfil con los espesores de las capas detectadas, entre otros aspectos.

### **C.2.1 Características básicas de los Sistemas GPR**

La recolección de datos con los equipos GPR se hace a través de pares de antenas de radar, una de las cuales transmite pulsos cortos de ondas electromagnéticas hacia el pavimento. A medida que esta energía viaja hacia abajo en la estructura del pavimento, se generan ecos en las interfaces de materiales con propiedades diferentes. El tiempo de llegada y la fuerza de estos ecos, detectados por la otra antena receptora, son utilizados para calcular el espesor de las capas del pavimento y otras propiedades. En realidad, aunque normalmente se hace referencia a una antena aérea, el gabinete o caja contiene realmente las dos antenas indicadas.

En general, el GPR ha sido utilizado para la medición continua de los espesores de las capas del pavimento. Mediante análisis más detallados, pero de menor precisión, también se han identificado zonas con problemas especiales (humedad excesiva, oquedades, baja compactación, etc.). Por tal motivo, se debe poner énfasis en que la aplicación más exacta y comprobada de los sistemas GPR corresponde a la medición de espesores.

Una antena de GPR abarca una franja continua de 15 cm en cada inspección. Sin embargo, los resultados obtenidos corresponden realmente a un perfil que se genera a partir de las mediciones en esta franja relativamente angosta. El equipo puede ser movido lateralmente en el mecanismo de sujeción para inspeccionar diferentes franjas en recorridos sucesivos. En los sitios en que se presentan dudas sobre la interpretación de los resultados, se pueden tomar mediciones estacionarias, para las cuales se requiere detener el tránsito.

El GPR puede ser considerado como un equipo complementario del medidor de deformaciones por impacto (FWD o HWD), principalmente en las aplicaciones que requieren datos de los espesores de las diversas capas del pavimento, tales como el retrocálculo para deducir módulos elásticos. En México es común que los sondeos realizados a cada 500 ó 1,000 m no sean representativos de la variación de la estructura del pavimento, por lo que esta situación introduce una gran incertidumbre en dicho retrocálculo. En este sentido, tal vez se puedan combinar los resultados de las mediciones del GPR con los desplazamientos verticales (deflexiones) registrados por el deformómetro de impacto, para mejorar la estimación de los módulos elásticos en las principales capas del pavimento.

Por otra parte, de acuerdo con las experiencias mexicanas y las del medio internacional, actualmente no es factible considerar que con la utilización del GPR se pueden eliminar completamente los sondeos o las "calas", a menos de que se tengan datos históricos confiables de la estructura del pavimento. En general, con estos equipos se puede aumentar el espaciamiento entre las "calas", pero éstas son un elemento indispensable, en ausencia de otra información, para validar los resultados obtenidos del proceso de los datos del GPR.

En general, en lo que concierne a la evaluación de pavimentos con métodos no destructivos, las principales aplicaciones de los sistemas GPR son las siguientes:

- División del pavimento en tramos homogéneos, desde el punto de vista de la variación de las imágenes de radar
- Medición continua del espesor de las principales capas del pavimento, hasta una profundidad de un metro, en casos ideales. El espesor mínimo detectable para cualquier capa es de 5 cm y la precisión del cálculo de espesores disminuye con la profundidad del pavimento
- Selección de sitios para la realización de sondeos o de "calas", principalmente para despejar dudas sobre problemas puntuales en el pavimento
- Detección de instalaciones subterráneas
- Generación de insumos básicos para el cálculo de espesores en las estrategias de rehabilitación y/o reconstrucción de los pavimentos en servicio
- Identificación, aunque con mayor incertidumbre, de zonas con problemas aislados en el pavimento (oquedades, gran humedad, etc.)

En cuanto a los rendimientos del radar de penetración, no se puede establecer un intervalo típico de valores, dado que cada caso analizado puede requerir algunas variantes en

las actividades de interpretación. Normalmente se requiere un esfuerzo mucho mayor en la interpretación de resultados que en la recolección de datos. En ciertos casos, dependiendo de la combinación del número de muestras por imagen y de imágenes por metro, el trabajo de campo debe ser interrumpido en unas cuantas horas, porque las imágenes de radar pueden llegar a "saturar" el disco duro de la computadora portátil. Sin embargo, dicho disco es suficiente para almacenar todos los datos de un día completo de trabajo. Asimismo, se dispone de una unidad para grabar discos compactos, con la que se garantiza la operación del equipo durante todos los días que sean necesarios.

### **C.2.2 Antena aérea**

Tal como se explicó anteriormente, en el gabinete que está fijado a una barra en la parte trasera del vehículo de medición, se encuentran alojadas dos antenas aéreas.

La antena del equipo del equipo GPR funciona a una frecuencia de un GHz y ha sido optimizada por la empresa GSSI para la evaluación de espesores de pavimentos a grandes velocidades. Esta antena es sometida a una serie completa de pruebas antes de su utilización real, por lo que cumple con las especificaciones pertinentes.

Los materiales del mecanismo de sujeción de la antena son especiales, con los que se evita cualquier interferencia en la operación del equipo GPR.

La antena puede ser desplazada lateralmente a la posición requerida (rodadas derecha e izquierda o al centro de los carriles de circulación).

También se dispone de una placa de acero inoxidable, con la que se efectúa la calibración de la antena y se genera un archivo, a partir del cual se realizan automáticamente las correcciones por variación de altura de la antena durante el recorrido de recolección de datos.

La antena toma lecturas según los intervalos especificados por el usuario. Al respecto, se selecciona un valor adecuado en función de la velocidad de circulación del vehículo de medición y las características generales del pavimento.

### **C.2.3 Procesador principal**

El control básico del equipo GPR se realiza a través de un procesador central alojado en un gabinete metálico (SIRveyor) y de una computadora portátil. En este gabinete se encuentran todos los componentes necesarios para el manejo hasta de dos antenas de radar; en total, se dispone hasta de cuatro canales para la transferencia de datos. La alimentación de energía eléctrica a la computadora también se hace a través de la unidad "SIRveyor", al igual que las conexiones con las antenas y el odómetro electrónico. La comunicación con la computadora portátil se realiza por medio de un puerto tipo "Ethernet".

conexiones con las antenas y el odómetro electrónico. La comunicación con la computadora portátil se realiza por medio de un puerto tipo "Ethernet".

#### **C.2.4 Odometro electrónico de alta precisión**

En este tipo de evaluación de pavimentos, es indispensable disponer de información exacta sobre la distancia o cadenamiento al que corresponde cada dato del radar de penetración. Para tal efecto, en el equipo se incluye un odómetro electrónico de alta precisión (DMI, por las siglas en inglés de "*distance measuring instrument*"). Este dispositivo se conecta a un sensor del vehículo de medición y se calibra después hasta comprobar la medición precisa de distancias en tramos de longitud conocida. Al igual que en el caso de otros componentes del sistema GPR, la información obtenida del odómetro es enviada a la computadora central.

#### **C.2.5 Equipo GPS**

Con el fin de enlazar la información obtenida durante la inspección del deterioro superficial de pavimentos (para su evaluación no destructiva), con las respectivas coordenadas geográficas, el vehículo de prueba dispone de un equipo GPS (por las siglas en inglés de "*geographical positioning system*"). Al respecto, este equipo es del tipo diferencial y portátil (marca Magellan, modelo SporTrak Pro), el cual permite obtener las coordenadas geográficas mediante los satélites convencionales y los denominados WAAS o, mejor aun, con una corrección en tiempo real proporcionada a través de un satélite particular.

Toda la información del GPS también es almacenada directa y automáticamente en los archivos con los datos del radar de penetración superficial. Sin embargo, como la actualización de la información del GPS se realiza cada segundo, sólo para una fracción de las imágenes de radar se dispone de las coordenadas geográficas, sobre todo para grandes velocidades de circulación.

No se requieren las coordenadas geográficas de las mediciones, por lo que se obtienen sólo como referencia adicional y sin corrección diferencial.

#### **C.2.6 Computadora portátil**

El almacenamiento y el proceso de la información obtenida por el sistema GPR se realizan directamente en la computadora principal que se encuentra instalada en el vehículo de prueba. Asimismo, a través del puerto serie de esta computadora portátil se efectúa la comunicación con el equipo GPS.

La computadora tiene un disco duro de alta capacidad para almacenar los datos generados por el radar en una longitud razonable de km-carril. Asimismo, se dispone de una unidad para grabación de datos en discos compactos, con la cual se pueden transferir datos del disco duro de la computadora y generar respaldos de la información.

Toda la información numérica, gráfica y de imágenes puede ser consultada en el monitor de la computadora portátil, tipo LCD. Entre esta información se incluyen las imágenes de radar a medida que éstas van siendo generadas por el equipo GPR.

#### **C.2.7 Programas de cómputo**

El programa para configurar y controlar la operación del sistema GPR está cargado en la computadora portátil y se tiene acceso al mismo a través de un icono.

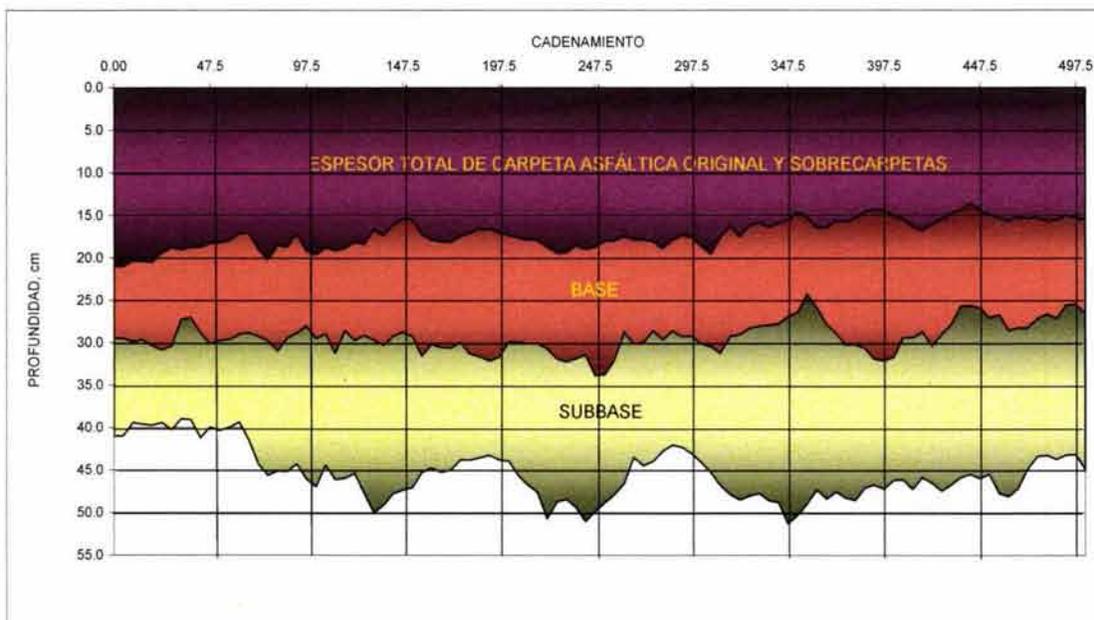
Para el proceso básico de las imágenes de radar, se dispone del programa de cómputo denominado "RADAN for Windows NT". Conviene analizar las imágenes de radar en dos computadoras diferentes, para lograr una rápida capacidad de respuesta en este tipo de aplicaciones. Las imágenes de radar se pueden manipular de muchas formas con este programa, el cual también permite aplicar una serie de filtros y correcciones, según se requiera.

En cuanto a la interpretación de espesores, se utilizará el módulo de "RADAN" denominado "Road Structure Assessment" (RSA), el cual permite estimar el espesor de las principales capas del pavimento y algunas de sus características físicas. Existe una opción de cálculo automatizado de espesores, pero generalmente se requieren ciertos ajustes con la opción de interpretación interactiva.

Como primer paso del proceso de interpretación, se realiza la identificación de puntos de reflexión, en la cual también se elimina cualquier ruido. Asimismo, se utiliza el archivo de calibración generado con la placa de acero inoxidable, para calcular de una manera muy precisa la velocidad de propagación de la señal a través del pavimento.

Enseguida se genera una gráfica de espesores, con las respectivas velocidades de propagación.

Los resultados pueden ser examinados visualmente y en mayor detalle con la opción de interpretación interactiva, con la cual se realiza cualquier ajuste mediante una serie de herramientas muy útiles disponibles en el módulo RSA. Los archivos con los espesores y otros datos pueden ser exportados fácilmente a muchos programas de cómputo comerciales, tales como "Excel". En la Fig. C.2 se presenta un ejemplo de interpretación de espesores con el equipo GPR.



La Fig. C.2 ilustra una situación muy común en muchas de las carreteras de la República Mexicana, en las que se han tenido una o más sobrecarpetas, como medida de rehabilitación del pavimento. Asimismo, con el paso del tiempo y la acumulación de cargas vehiculares, entre otros factores, la interfaz de dos capas granulares (por ejemplo, base/subbase) ya no es muy clara.

En el módulo RSA también existe una opción para ajustar las velocidades de propagación del radar, en función de los datos disponibles de la estructura del pavimento (inventario histórico, sondeos y/o "calas").

Sobre la utilización del módulo RSA en casos reales de pavimentos en México, se ha logrado alcanzar una alta productividad en la determinación de espesores de las principales capas del pavimento.

### **C.3 TRABAJOS DE GABINETE**

Deben participar ingenieros con experiencia comprobada en evaluación superficial y estructural de pavimentos, así como en la utilización de los programas de cómputo requeridos. Estos ingenieros son apoyados por un técnico capturista.

### **C.4 RECOLECCIÓN DE DATOS**

Se genera un archivo de calibración con el procedimiento estándar para el equipo GPR, tanto al inicio como en la terminación de la recolección de datos. Estos archivos son indispensables para la correcta interpretación de las imágenes de radar.

En una primera etapa, conviene recopilar los datos en cada carril de circulación, siguiendo una trayectoria que coincida aproximadamente con su eje longitudinal. Al disponer de los datos en todos los carriles, posteriormente se podrán hacer estimaciones, por cuerpo, de los espesores de las principales capas del pavimento.

Tentativamente, se ha considerado tomar una imagen de radar cada 25 cm recorridos por el vehículo de medición. Esta imagen se generará a partir de un número elevado de muestras, con el fin de lograr una alta precisión en este proceso.

Todas las imágenes de radar quedan referidas a la lectura del odómetro electrónico, para que las mismas puedan ser identificadas fácilmente.

En aquellos casos en que se presenten dudas sobre la interpretación o los datos obtenidos, se vuelve a medir con el equipo GPR en los sitios en cuestión.

### **C.5 INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS DEL EQUIPO GPR**

Básicamente, se utiliza el módulo RSA del programa de cómputo "RADAN". En una primera aproximación, se emplea la opción de interpretación automática para tres o cuatro capas del pavimento. En aquellos casos en que se detecte una carpeta y una o más sobrecarpetas, se analiza la conveniencia de registrar únicamente el espesor total de concreto asfáltico.

De acuerdo con las interfaces detectadas y su continuidad, en una segunda etapa, se utiliza la opción de interpretación interactiva para afinar los resultados. En esta fase se revisan las velocidades de propagación de la señal de radar en cada una de las capas y se verifica su congruencia en tramos que sean aproximadamente homogéneos, en cuanto a las propiedades mecánicas de los materiales detectados. Una vez concluida esta revisión, se generan archivos en formato del programa "Excel".

Con el fin de reducir el tamaño de los archivos de "Excel" con los espesores interpretados a cada 25 cm, se analiza la conveniencia de obtener promedios de espesores a distancias de uno, cinco, diez, veinte o cincuenta metros. Para tal efecto, se utilizarán medias aritméticas móviles mediante un procedimiento especial utilizado en trabajos similares (EIOCSA, 2003). Es pertinente aclarar que estos resultados de espesores se deben entregar a un solo intervalo de distancia.

Posteriormente, se calcula la media aritmética de los espesores por cuerpo, al considerar los valores obtenidos en todos los carriles de circulación. Alternativamente, el valor más bajo de espesores de todos los carriles se podría utilizar como representativo de un cuerpo.

Por otra parte, en caso de que se detecten zonas del pavimento con vacíos u oquedades, así como con desintegración o desgranamiento de material, en las capas inferiores del pavimento, se deben indicar los cadenamientos respectivos, de acuerdo con las lecturas del odómetro electrónico

Es recomendable preparar gráficas de la variación de los espesores de las principales capas del pavimento con el intervalo de distancia estipulado, según se explicó en un párrafo previo. Estas gráficas se consideran indispensables para poder dividir a las carreteras en tramos homogéneos desde el punto de vista de las variaciones en la estructura del pavimento. Desde luego, también se deben preparar tablas básicas y gráficas ilustrativas, con los valores promedio de espesores por tramo-cuerpo de un kilómetro de longitud.

## **C.6 GENERACIÓN DEL BANCO DE DATOS**

El principal banco de datos tendrá todos los campos (columnas) indicados en las tablas básicas. Este banco de datos se genera por medio del programa de cómputo "Excel".

Por otro lado, es importante entregar hojas de cálculo con los resultados de las mediciones de espesores a un intervalo constante de distancia.

## **REFERENCIA**

Evaluación Integral de Obras Civiles, SA de CV (EIOCSA), 2003: Descripción de la Metodología y del Plan de Actividades para la Ejecución de Trabajos con el Radar de Penetración Superficial (GPR)

# **ANEXO D**

## ANEXO D

### SISTEMA ÓPTICO DE AGRIETAMIENTOS SUPERFICIALES EN PAVIMENTOS

#### CONTENIDO

---

D.1	INTRODUCCIÓN	1
D.2	EQUIPO QUE SE UTILIZA	1
D.2.1	Cámara de <i>video</i>	1
D.2.2	Computadora e interfaces	3
D.2.3	Odómetro electrónico de alta precisión	3
D.2.4	Teclado especial	3
D.2.5	Equipo GPS	4
D.3	PROGRAMAS DE CÓMPUTO	4
D.4	TRABAJOS DE GABINETE	5
D.5	DEFECTOS SUPERFICIALES DEL PAVIMENTO	5
D.5.1	Trabajos de campo	5
D.5.2	Trabajos de gabinete	6
D.6	ALTITUD Y OTROS DATOS GEOMÉTRICOS DE LA CARRETERA	7
D.7	GENERACIÓN DEL BANCO DE DATOS	7
	REFERENCIA	7

## ANEXO D

### SISTEMA ÓPTICO DE AGRIETAMIENTOS SUPERFICIALES EN PAVIMENTOS

#### D.1 INTRODUCCIÓN

Este sistema es un excelente auxiliar en la inspección del deterioro superficial de pavimentos en autopistas, carreteras y vialidades urbanas, para la evaluación no destructiva de pavimentos y los sistemas de administración de pavimentos (EIOCSA, 2003).

#### D.2 EQUIPO QUE SE UTILIZA

El sistema consta de un equipo automatizado a base de una cámara de *video* digital, una computadora y un grupo de programas de cómputo. Este equipo se instala en una camioneta tipo "van" o "combi". En la Fig. D.1 se presenta un esquema básico con los principales componentes del sistema denominado "uniSURVEY", cuyo desarrollo tecnológico está a cargo de la empresa Samsung SDS America, Inc. Además de los componentes indicados anteriormente, se dispone de un odómetro electrónico de alta precisión y un teclado especial para el levantamiento de defectos superficiales complementarios y de otros detalles del pavimento y/o del derecho de vía. A este sistema también se le puede conectar un dispositivo GPS, para el levantamiento de las coordenadas geográficas de los datos almacenados. La Fig. D.2 corresponde a una fotografía del vehículo que se puede utilizar para el levantamiento de los defectos superficiales con el sistema "uniSURVEY".

"uniSURVEY" es un sistema avanzado para la identificación y la medición de los defectos superficiales, a partir de la interpretación de imágenes de *video*, el cual funciona a altas velocidades de operación (hasta cerca de 100 km/h), para la recolección de los datos de campo.

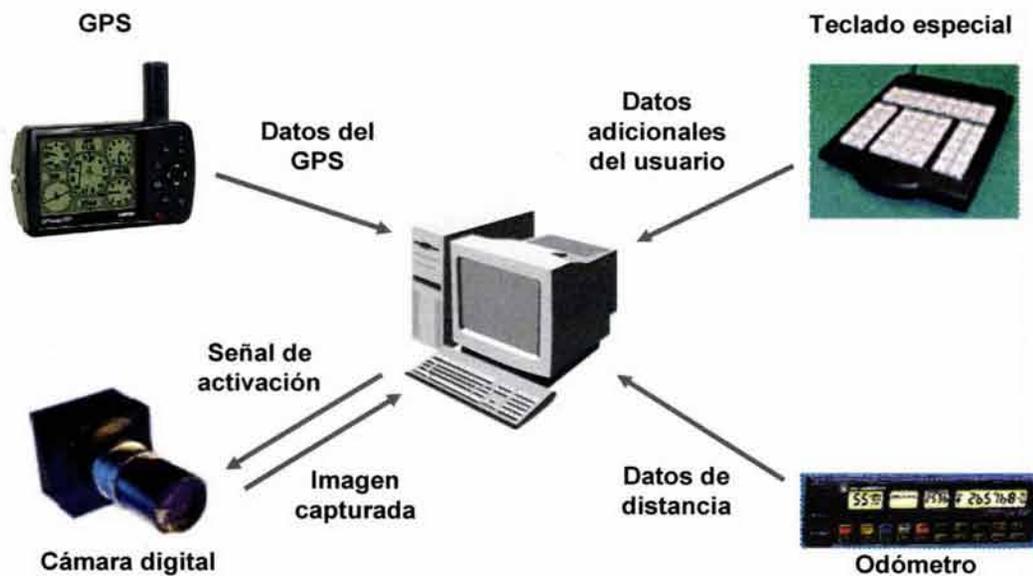
Por sus características, el equipo de inspección del deterioro superficial no requiere de dispositivos de seguridad especiales, como vehículos de escolta, bandereros, etc. Sin embargo, en el vehículo de prueba se dispone de una "torreta" de luz ámbar.

En esencia, las mediciones con este equipo abarcan un carril de circulación completo, para lo cual se revisa la altura de la cámara de *video*. En función de esta altura también se determina la cobertura longitudinal de cada una de las imágenes digitales, las cuales se almacenan en la computadora.

##### D.2.1 Cámara de *video*

Este dispositivo genera película de *video* digital en blanco y negro (y tonos de gris). La cámara de *video* es de alta resolución y funciona con éxito en la inspección visual del deterioro superficial. El barrido de la imagen es de 1,300 (horizontal) por 1,030 (vertical) y la cámara puede tomar hasta 24 cuadros por segundo.

Durante el recorrido del vehículo de prueba, la cámara toma una película de *video* digital y transmite a la computadora imágenes digitales de la superficie del pavimento a un intervalo constante de distancia especificado por el usuario.



**Figura D.1** ARQUITECTURA BÁSICA DEL EQUIPO DEL SISTEMA "uniSURVEY", CUYA FUNCIÓN PRINCIPAL ES LA RECOPILACIÓN AUTOMATIZADA DEL DETERIORO SUPERFICIAL DE LOS PAVIMENTOS



**Figura D.2** VEHÍCULO PARA LA MEDICIÓN AUTOMATIZADA DEL DETERIORO SUPERFICIAL, CON EL SISTEMA "uniSURVEY"

## D.2.2 Computadora e interfaces

El almacenamiento y el proceso de la información sobre el deterioro superficial se realizan directamente en la computadora principal que se encuentra instalada en el vehículo de medición. Esta computadora tiene una serie de tarjetas y puertos para la comunicación con los dispositivos utilizados para la recolección automatizada de una serie de datos. Por ejemplo, una de las tarjetas es para la captura de imágenes de la cámara de *video*; la comunicación con el odómetro electrónico y el equipo GPS se realiza a través de los puertos serie de la computadora.

La computadora tiene un disco duro de alta capacidad para almacenar las imágenes de la superficie del pavimento correspondientes a varios días de recopilación de datos. Asimismo, se dispone de una unidad para grabación de datos en discos compactos, con los cuales se pueden transferir datos del disco duro de la computadora y generar respaldos de la información.

Toda la información numérica, gráfica y de imágenes puede ser consultada en un monitor de alta resolución de pantalla plana, tipo LCD, de 17 pulgadas. Entre esta información se incluyen las imágenes, a medida que éstas van siendo transmitidas por la cámara de *video* digital.

## D.2.3 Odómetro electrónico de alta precisión

En este tipo de inspecciones del deterioro superficial de pavimentos, para su evaluación no destructiva, es indispensable disponer de información exacta sobre la distancia o cadenamiento al que corresponde cada imagen del pavimento. Para tal efecto, en el equipo se incluye un odómetro electrónico de alta precisión (DMI, por las siglas en inglés de "*distance measuring instrument*"). Este dispositivo se conecta a un sensor del vehículo de medición y se calibra posteriormente hasta comprobar la medición precisa de distancias en tramos de longitud conocida. Al igual que en el caso de otros componentes del sistema "uniSURVEY", la información obtenida del odómetro es enviada a la computadora central.

## D.2.4 Teclado especial

En el caso de que el usuario requiera ingresar información complementaria sobre el pavimento, el derecho de vía u otros detalles de la infraestructura, se dispone de un teclado especial. Este teclado puede ser programado en la forma que más convenga, de tal manera que una tecla dada corresponda a un parámetro específico. Al oprimir cualquier tecla, "uniSURVEY" almacena también la lectura del odómetro electrónico en ese instante.

Este teclado se enlaza a la computadora mediante un cable con conector tipo "USB". La programación de las teclas se hace mediante un programa de cómputo y un interruptor en la parte superior derecha del teclado especial. Al programar cualquier tecla, se utiliza el teclado normal de la computadora. Una vez terminada la programación, al oprimir una tecla dada del teclado especial se reproducirá la secuencia de datos o combinaciones de teclas indicadas en el teclado normal.

Durante los primeros días de actividades en el campo, se decide la configuración específica del teclado especial, de acuerdo con la información que debe complementar a las imágenes de video de la superficie del pavimento. Sin embargo, la estrategia se basa directamente en el análisis de las imágenes de *video*, a partir de las cuales se podrán identificar todos los defectos requeridos por el usuario.

### D.2.5 Equipo GPS

Con el fin de enlazar la información obtenida durante la inspección del deterioro superficial de pavimentos para su evaluación no destructiva con las respectivas coordenadas geográficas, el vehículo de prueba dispone de un equipo GPS (por las siglas en inglés de "*geographical positioning system*"). Al respecto, este equipo es del tipo diferencial y portátil (marca Magellan, modelo SporTrak Pro), el cual permite obtener una alta precisión en las coordenadas geográficas mediante los satélites convencionales y los denominados WAAS o, mejor aun, con una corrección en tiempo real proporcionada a través de un satélite particular.

Toda la información del GPS también es almacenada directa y automáticamente en los archivos con las imágenes de la superficie del pavimento y otros datos indicados por el usuario. Sin embargo, la actualización de los datos del GPS se hace cada segundo, por lo que para velocidades altas de circulación, varias imágenes sucesivas tendrán la misma lectura del GPS.

El GPS es de suma utilidad también para la medición de pendientes y grados de curvatura, como se describe en el Capítulo D.6.

## D.3 PROGRAMAS DE CÓMPUTO

La captura y el procesamiento de la información en el gabinete se efectúa con las computadoras necesarias, para poder analizar los datos recibidos y generar los productos estipulados. Inclusive, conviene disponer de una red de cómputo local, controlada por un servidor de gran capacidad y acceso a Internet de alta velocidad.

En el caso particular del deterioro superficial del pavimento, la computadora del vehículo de medición tiene instalados los programas de cómputo para el proceso y la interpretación de las imágenes de *video*. El programa denominado "PaveInspect" es el que controla a la cámara de *video* digital y al odómetro electrónico. "uniSURVEY" permite el manejo de la interfaz con el usuario y el almacenamiento de la información en el banco de datos; asimismo, este programa incluye una rutina para configurar el teclado especial, a fin de considerar los datos complementarios del pavimento y del resto de la infraestructura.

Para el análisis y la interpretación de las imágenes de *video* se utiliza el programa "uniANALYZE", el cual es un sistema objetivo para la medición de los diferentes defectos correspondientes al agrietamiento del pavimento. Existe una opción automatizada y otra manual para la interpretación del agrietamiento. Este programa también ha sido utilizado para establecer la precisión de diversos procedimientos automatizados para la interpretación del agrietamiento, ya que dispone de rutinas especiales para medir con una gran precisión las grietas superficiales del pavimento.

## D.4 TRABAJOS DE GABINETE

En la interpretación de los datos de campo participan cuatro ingenieros de pavimentos con experiencia en la inspección del deterioro superficial. Esta actividad se realiza con las imágenes de *video* tomadas previamente en el campo.

Para el análisis de los datos de rampas, pendientes y grados de curvatura se requiere un dibujante por computadora, con amplia experiencia en el manejo del programa comercial denominado "AutoCAD".

## D.5 DEFECTOS SUPERFICIALES DEL PAVIMENTO

En comparación con los métodos convencionales de inspección visual del deterioro superficial, con este equipo moderno para la recolección automatizada de los defectos superficiales se logra una mayor velocidad en los trabajos de campo, además de que se elimina el riesgo de accidentes al personal a cargo de esta actividad. De todas maneras, los recorridos a pie son necesarios.

Con este vehículo se recorren todos los carriles de circulación de los tramos de carretera que se elijan. En general, se ha considerado que los defectos superficiales serán resumidos a intervalos constantes de un kilómetro-carril de longitud. Esta información se obtiene originalmente en cada carril de circulación. El equipo puede clasificar el agrietamiento por zonas en los carriles de circulación (rodada izquierda, rodada derecha y entre las dos rodadas).

Toda la información recopilada queda referida a la distancia acumulada medida con el odómetro electrónico de alta precisión y a las coordenadas geográficas, en caso de que se utilice simultáneamente el equipo GPS. Además, se genera una serie de imágenes sobre el estado del pavimento, las cuales pueden ser utilizadas como parte del inventario histórico de la infraestructura carretera.

### D.5.1 Trabajos de campo

En los primeros días del inicio de actividades en el campo, se comprueba el correcto funcionamiento del equipo mediante pruebas en el tramo seleccionado de la carretera. Entre otros aspectos, se definen los parámetros de la inspección automatizada y se prueba la suavidad y la brillantez de la imagen de *video* bajo diferentes condiciones de iluminación y de textura del pavimento.

En la primera etapa, se generan imágenes de *video* para cada carril de circulación. La información se revisa directamente en la pantalla de la computadora, a medida que se vayan grabando las imágenes de la cámara de *video*. Mediante el teclado especial, se indican las zonas en que se presentan defectos que no puedan ser identificados en la interpretación posterior de las imágenes de *video*; por ejemplo, en el caso de que el defecto denominado rotura de borde tenga que ser recopilado en el borde del acotamiento, será necesario registrarlo independientemente y confirmar sus características mediante un recorrido posterior. Sin embargo, en el caso de que la rotura de borde corresponda al caso de tramos de carretera en que no exista un acotamiento pavimentado, este defecto podrá ser identificado y cuantificado directamente a partir de las imágenes de *video* digital.

Es necesario sostener una velocidad de circulación entre 60 y 80 km/h durante la recolección automatizada de datos, de tal manera que se mantenga una distancia razonable con respecto a los otros vehículos, con el fin de garantizar las condiciones de seguridad requeridas.

Con respecto al rendimiento de los trabajos de campo, puede variar entre 200 y 300 km-carril por día, una vez que el equipo haya sido desplazado al sitio de inicio de las mediciones. En algunas ocasiones es necesario detenerse, cuando se han almacenado muchas imágenes de *video* digital, con el fin de poder liberar parte del disco duro y hacer los respaldos respectivos.

### D.5.2 Trabajos de gabinete

Aun cuando existe la opción del proceso automático de las imágenes de *video*, para determinar los principales parámetros del agrietamiento (tipo, longitud y severidad), se debe revisar la interpretación correspondiente, mediante la opción de proceso individual de las imágenes. De esta manera se tendrá la certeza de lograr una alta precisión en la interpretación; asimismo, la revisión de la interpretación automática de cada una de las imágenes permite identificar y cuantificar otros defectos: desprendimiento de agregado pétreo, rotura de borde y número de baches por kilómetro, por ejemplo.

El programa de cómputo "uniANALYZE" también permite generar información sumamente detallada sobre el agrietamiento, incluyendo el cálculo de algunos índices utilizados actualmente en los Estados Unidos de América para representar el estado del pavimento, en función del deterioro superficial observado. Sin embargo, tal nivel de detalle no es siempre requerido. En el caso del agrietamiento, en un banco de datos complementario se almacena la información obtenida en cada tramo-carril sobre los principales tipos de defectos: agrietamiento longitudinal, agrietamiento transversal, agrietamiento tipo mapa y agrietamiento tipo "piel de cocodrilo".

Posteriormente, se obtienen promedios de los carriles de circulación, para obtener un valor representativo por cuerpo de cada uno de los defectos estipulados. Alternativamente, se puede utilizar como representativo de cada cuerpo, como criterio, el valor correspondiente al carril que tenga el mayor deterioro superficial.

Con relación al rendimiento, éste depende básicamente de la densidad del deterioro superficial en cada una de las imágenes. Es decir, la interpretación requiere más tiempo para el caso de imágenes con agrietamiento generalizado, combinado con la presencia de otros defectos superficiales.

En el caso de la interpretación automatizada del agrietamiento, la velocidad de proceso es de aproximadamente 10 m/s, por lo que esta actividad es sumamente rápida. Sin embargo, para la interpretación más detallada con la opción individual de "uniANALYZE", se estima que un ingeniero puede lograr un rendimiento entre 20 y 40 km-carril por día.

Con respecto a la precisión, se han realizado pruebas en EUA sobre la precisión específica de "uniANALYZE" en la interpretación automatizada del agrietamiento, en relación con la severidad y su longitud total. En general, las diferencias de la longitud total del agrietamiento entre el proceso automático y la interpretación manual de las imágenes, varían entre 5 y 20%, dependiendo del tipo de agrietamiento. Por tal motivo y con el fin de garantizar una alta precisión, conviene revisar individualmente cada una de las imágenes digitales de *video*. Al respecto, se aclara que se toma como punto de partida para el proceso final, la interpretación automática del agrietamiento, con lo que se avanza más rápidamente.

## **D.6 ALTITUD Y OTROS DATOS GEOMÉTRICOS DE LA CARRETERA**

Básicamente, toda esta información se obtendrá a partir de las mediciones realizadas con el GPS. La altitud es uno de los parámetros medidos continuamente por el GPS, siempre y cuando éste capte cuatro o más satélites en un momento dado.

En el caso de las subidas y bajadas, así como del grado de curvatura, con el GPS se obtiene información continua sobre la latitud, longitud y altitud de cada una de las mediciones realizadas. La información sobre latitud y longitud es convertida a coordenadas UTM para poder obtener el alineamiento horizontal aproximado. Con los valores de la altitud también se puede generar el alineamiento vertical aproximado de cada tramo-cuerpo de 1 km de longitud.

Una vez realizada la conversión de todos los datos geográficos a coordenadas UTM, se procede a dibujar, de manera aproximada, los alineamientos horizontal y vertical de un carril de circulación de cada tramo-cuerpo de 1 km de longitud. Posteriormente, se ubican las curvas horizontales y verticales, para calcular su grado de curvatura, así como las características de las subidas y bajadas, respectivamente. Desde luego que conviene disponer de un dibujante en computadora, con experiencia en proyecto geométrico de carreteras y manejo del programa de cómputo "AutoCAD".

Otro enfoque posible es la utilización de un giroscopio, mediante el cual se podría medir continuamente la pendiente longitudinal, el grado de curvatura y el bombeo o la sobreelevación de la sección transversal de cada carril de circulación. Sin embargo, el giroscopio es un dispositivo relativamente caro y su utilización se traduce en un mayor costo de los trabajos en cuestión. Al respecto, es pertinente indicar que el perfilómetro láser para obtener el Índice de Irregularidad Internacional (III) y la profundidad de rodera, tiene todas las preparaciones requeridas para la instalación de este dispositivo.

## **D.7 GENERACIÓN DEL BANCO DE DATOS**

El principal banco de datos es generado por medio del programa de cómputo "Excel".

Por otro lado, se obtienen hojas de cálculo con los datos originales de las mediciones de todos los defectos para cada carril de circulación.

## **REFERENCIA**

Evaluación Integral de Obras Civiles, SA de CV (EIOCSA), 2003: Descripción de la Metodología y del Plan de Actividades para la Ejecución de Trabajos con el Sistema Óptico de Agrietamientos uniSURVEY

# **ANEXO E**

## ANEXO E

### APLICACIONES DEL MÉTODO PROPUESTO EN LA EVALUACIÓN Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO

#### CONTENIDO

---

<b>CASO 1: Rincón de Romos – Entr. Guadalupe (Aguascalientes-Zacatecas; RVO y Cía., 2001a)</b>	1
E.1 EVALUACIÓN SUPERFICIAL (Plano 1)	1
E.1.1 Índice de Irregularidad Internacional (III)	1
E.1.2 Profundidad de rodera	1
E.1.3 Levantamiento de deterioro	2
E.2 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL (Plano 2)	2
E.2.1 Medición de desplazamientos verticales	2
E.2.2 Índice Estructural del pavimento ( $I_e$ )	3
E.2.3 Módulos elásticos de las capas	3
E.3 SIMULACIÓN ESTRUCTURAL	4
E.3.1 Estado actual del pavimento	4
E.3.2 Análisis del tránsito	5
a) Condición actual	5
b) Condición futura	6
E.3.3 Comportamiento actual del pavimento	6
E.3.4 Comportamiento futuro del pavimento	10
E.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	16
E.4.1 Conclusiones	16
E.4.2 Recomendaciones	16

<b>CASO 2: Villahermosa – Zacatal (Villahermosa – Cd. del Carmen; RVO y Cía., 2001a)</b>	17
E.1 EVALUACIÓN SUPERFICIAL (Plano 3)	17
<i>E.1.1 Índice de Irregularidad Internacional (III)</i>	17
<i>E.1.2 Profundidad de rodera</i>	17
<i>E.1.3 Levantamiento de deterioro</i>	17
E.2 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL (Plano 4)	18
<i>E.2.1 Medición de desplazamientos verticales</i>	18
<i>E.2.2 Índice Estructural del pavimento (<math>I_e</math>)</i>	18
<i>E.2.3 Módulos elásticos de las capas</i>	19
E.3 SIMULACIÓN ESTRUCTURAL	20
<i>E.3.1 Estado actual del pavimento</i>	20
<i>E.3.2 Análisis del tránsito</i>	21
a) Condición actual	21
b) Condición futura	22
<i>E.3.3 Comportamiento actual del pavimento</i>	22
<i>E.3.4 Comportamiento futuro del pavimento</i>	28
E.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	31
<i>E.4.1 Conclusiones</i>	31
<i>E.4.2 Recomendaciones</i>	31
<b>CASO 3: Acayucan – Lím. Edo. de Ver/Oax (Coatzacoalcos – Salina Cruz; RVO y Cía., 2001b)</b>	32
E.1 EVALUACIÓN SUPERFICIAL (Plano 5)	32
<i>E.1.1 Índice de Irregularidad Internacional (III)</i>	32
<i>E.1.2 Profundidad de rodera</i>	33
<i>E.1.3 Levantamiento de deterioro</i>	33
E.2 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL (Plano 6)	33
<i>E.2.1 Medición de desplazamientos verticales</i>	33
<i>E.2.2 Índice Estructural del pavimento (<math>I_e</math>)</i>	34
<i>E.2.3 Módulos elásticos de las capas</i>	34
E.3 SIMULACIÓN ESTRUCTURAL	35
<i>E.3.1 Estado actual del pavimento</i>	35

E.3.2 <i>Análisis del tránsito</i>	36
a) Condición actual	36
b) Condición futura	36
E.3.3 <i>Comportamiento actual del pavimento</i>	36
E.3.4 <i>Comportamiento futuro del pavimento</i>	38
E.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	40
E.4.1 <i>Conclusiones</i>	40
E.4.2 <i>Recomendaciones</i>	40
<b>CASO 4: Córdoba – Veracruz (México – Veracruz; RVO y Cía., 2001c).</b>	41
E.1 EVALUACIÓN SUPERFICIAL (Plano 7)	41
E.1.1 <i>Índice de Irregularidad Internacional (III)</i>	41
E.1.2 <i>Profundidad de rodera</i>	41
E.1.3 <i>Levantamiento de deterioro</i>	41
E.2 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL (Plano 8)	42
E.2.1 <i>Medición de desplazamientos verticales</i>	42
E.2.2 <i>Índice Estructural del pavimento (<math>I_e</math>)</i>	42
E.2.3 <i>Módulos elásticos de las capas</i>	43
E.3 SIMULACIÓN ESTRUCTURAL	44
E.3.1 <i>Estado actual del pavimento</i>	44
E.3.2 <i>Análisis del tránsito</i>	45
a) Condición actual	45
b) Condición futura	46
E.3.3 <i>Comportamiento actual del pavimento</i>	46
E.3.4 <i>Comportamiento futuro del pavimento</i>	48
E.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
E.4.1 <i>Conclusiones</i>	51
E.4.2 <i>Recomendaciones</i>	51
<b>CASO 5: Asunción – Tejocotal (México – Tuxpan; RVO y Cía., 2004).</b>	52
E.1 EVALUACIÓN SUPERFICIAL	52
E.1.1 <i>Índice de Irregularidad Internacional (III)</i>	52
E.1.2 <i>Profundidad de rodera</i>	52
E.1.3 <i>Levantamiento de deterioro</i>	52

E.2 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL (Plano 9)	52
<i>E.2.1 Medición de desplazamientos verticales</i>	52
<i>E.2.2 Índice Estructural del pavimento (<math>I_e</math>)</i>	53
<i>E.2.3 Módulos elásticos de las capas</i>	53
E.3 SIMULACIÓN ESTRUCTURAL	53
<i>E.3.1 Estado actual del pavimento</i>	53
<i>E.3.2 Análisis del tránsito</i>	54
a) Condición actual	54
b) Condición futura	54
<i>E.3.3 Comportamiento actual del pavimento</i>	54
<i>E.3.4 Comportamiento futuro del pavimento</i>	55
E.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	56
<i>E.4.1 Conclusiones</i>	56
<i>E.4.2 Recomendaciones</i>	57
REFERENCIAS	57

## ANEXO E

### APLICACIONES DEL MÉTODO PROPUESTO EN LA EVALUACIÓN Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO

**CASO 1:** *Rincón de Romos – Entr. Guadalupe (Aguascalientes-Zacatecas; RVO y Cía., 2001a)*

#### E.1 EVALUACIÓN SUPERFICIAL (Plano 1)

##### E.1.1 Índice de Irregularidad Internacional (III)

- Del km 45 al 70 y en ambos carriles, los valores del III son inferiores a 3 mm/m (forma polinómica), lo que refleja buenas condiciones de comodidad al usuario; del km 45 al 57.5, los valores del III son ligeramente superiores a los del tramo del km 57.5 al 70, debido posiblemente a las diferentes condiciones de tránsito y trabajos de conservación.
- En general, hay una diferencia hasta de 1 mm/m en los valores del III entre la rodada izquierda y la derecha que, en detalle, se observa en las gráficas de tendencias correspondientes (forma polinómica).

##### E.1.2 Profundidad de rodera

- En general, se observan mayores valores entre el km 45 y el 57.5 que del km 57.5 al 60, correspondiendo los más altos al carril derecho. Esto es congruente con las observaciones efectuadas durante el levantamiento de deterioro del pavimento, indicado más adelante.
- Los valores máximos registrados (forma polinómica) alcanzan hasta 12 mm (proximidades del km 45, carril derecho), precisamente al pasar de pavimento rígido a flexible, efecto que se observa también en el carril izquierdo pero en menor cuantía (8 mm). Es interesante analizar cómo varían los valores gradualmente hasta 2 mm (cerca del km 48) y vuelven a aumentar hasta 7 mm (km 53 y 54), dentro del tramo del km 55 al 57.5, en el carril derecho. En cambio, hacia el km 70 los valores se reducen en un gran tramo. Este tipo de análisis se hace extensivo también para el caso del carril izquierdo.
- En general, el tramo del km 57.5 al 70 tiene menores variaciones en la profundidad de rodera que en el tramo del km 45 al 57.5, debido posiblemente al efecto del tránsito y los espesores de carpeta más las capas de apoyo en el pavimento. Recuérdese que cuando se tienen capas de apoyo (base, sub-base, etc.) con buena capacidad de carga, a mayor espesor de carpeta habrá más probabilidades de formación de roderas en ésta que cuando son de poco espesor.

### **E.1.3 Levantamiento de deterioro**

- Gráficamente se muestran los resultados del levantamiento de deterioro donde destaca, para ambos carriles, el agrietamiento tipo piel de cocodrilo (severidad media), las roderas (baja severidad) y la exudación de asfalto (ligera), principalmente en el tramo del km 45 al 57.5. Se hace notar que hay algún agrietamiento "piel de cocodrilo" en tramos aislados del km 57.5 al 70, así como exudación aislada de asfalto en algunos puntos del km 61 al 65.
- Se encontraron baches reparados (severidad media a alta) del km 57.5 al 70 y algunos aislados (severidad ligera a media) en las proximidades del km 56 al 57.
- El defecto tipo desgaste se encontró solamente entre el km 56 y el 66.
- Las grietas longitudinales (severidad ligera) se encontraron en forma aisladas entre el km 55 y el 63. Las grietas transversales (severidad ligera) se observaron entre el km 53 y el 58.

## **E.2 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL (Plano 2)**

### **E.2.1 Medición de desplazamientos verticales**

Los resultados de la medición de los desplazamientos verticales se pueden observar en el Plano 2, donde se grafica el cadenamiento (eje horizontal) y el desplazamiento vertical registrado por cada sensor (eje vertical). Cada una de estas gráficas tiene el registro de 7 sensores ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$ ,  $S_5$ ,  $S_6$  y  $S_7$ ); para cada cadenamiento se obtiene el perfil de la cuenca de desplazamientos verticales. Los resultados más sobresalientes se presentan a continuación:

- Del km 45 al 57.5 (ambos carriles), los desplazamientos verticales tienen una distribución similar y homogénea en general, con un valor en el sensor bajo la carga ( $S_1$ ) inferior a 0.9 mm (forma polinómica), predominando de 0.5 a 0.8 mm. Esto es indicio de la buena capacidad de carga de las capas del pavimento, sobre todo las inferiores.
- Lo expresado en el inciso anterior ocurre similarmente entre el km 66.6 y el 70, también en ambos carriles, aunque no tiene base hidráulica y son reducidos los espesores de carpeta, apoyada directamente sobre la capa subrasante y las inferiores, con poca intensidad y frecuencia de tránsito (TDPA=559)
- Del km 57.5 al 66.6 (ambos carriles), la distribución de los desplazamientos verticales también es homogénea, aunque los valores máximos para el sensor bajo la carga ( $S_1$ ) aumentan de 0.8 a 1 mm. Se hace notar que en las zonas de entrecruzamientos por intersecciones a nivel (km 64.8 a 66.6, Aprox.) los desplazamientos verticales aumentan notablemente en algunos puntos, debido al efecto de la baja velocidad en el tránsito. Esto corresponde a los accesos a varios comercios locales y una maquiladora ubicada en el entronque a Ciudad Cuauhtémoc.

### **E.2.2 Índice Estructural del pavimento ( $I_e$ )**

En el Plano 2 se presenta el  $I_e$  correspondiente a cada punto de medición, así como el valor medio ( $\bar{I}_e$ ) para cada tramo. También se indica la Calificación Estructural ( $C_e$ ) equivalente.

- El  $\bar{I}_e$  en el tramo del km 45 al 57.5 es de 0.165 y 0.164 (carril derecho e izquierdo, respectivamente) y en el tramo del km 57.5 al 70 los valores son de 0.236 y 0.228 para los carriles correspondientes. Con estos resultados se puede anticipar una propuesta de solución de reforzamiento, sin omitir la necesidad de hacer un análisis de la evaluación superficial y estructural en conjunto para proponer la solución óptima.

### **E.2.3 Módulos elásticos de las capas**

En el Plano 2 se presentan gráficamente los módulos elásticos resultantes para la carpeta asfáltica, así como para la base, sub-base, sub-rasante y capas inferiores. Esta información se acepta como representativa de la condición actual en las capas del pavimento; en todos los casos se ha considerado el comportamiento granular de los materiales bajo la superficie de rodamiento. Dicha información servirá de apoyo para la simulación estructural del comportamiento para el refuerzo o la rehabilitación del pavimento.

Los comentarios más sobresalientes se presentan a continuación (Plano 2):

- Del km 45 al 57.5 en ambos carriles, el módulo elástico de la carpeta asfáltica fluctúa entre 10,000 y 30,000 kg/cm<sup>2</sup> (forma polinómica), teniendo menos variaciones para el caso del carril izquierdo. A partir del km 57.5 y hasta el km 70 los módulos elásticos son mayores y alcanzan un valor máximo de 50,000 kg/cm<sup>2</sup>. Recuérdese que a mayor módulo elástico mayor capacidad de carga tendrá la carpeta, pero también es susceptible de agrietamientos por su fragilidad al tener mayor rigidez; en cambio, a menor módulo elástico, menor capacidad de carga y mayor probabilidad de formación de roderas, pero es más flexible la carpeta y se adapta mejor a las deformaciones de las capas de apoyo. Debe tomarse en cuenta que un criterio sano para aumentar el nivel de calidad general de una carpeta es considerarla como una capa de rodamiento flexible e impermeable y con mayor cohesión que una base asfáltica estabilizada con emulsión, la cual tiene mayor tendencia a la fricción interna que a la cohesión.
- Del km 45 al 57.5 en ambos carriles, los módulos elásticos para la base fluctuaron entre 2,000 y 3,000 kg/cm<sup>2</sup> (forma polinómica); no se encontró capa subrasante definida. Del km 57.5 al 70, sí se encontró capa subrasante y los valores fluctuaron entre 1,500 y 4,000 kg/cm<sup>2</sup> (forma polinómica). Lo anterior manifiesta buena capacidad de carga en ambas capas.
- Del km 45 al 57.5 en ambos carriles, los módulos elásticos para las capas inferiores fluctuaron entre 1,100 y 2,400 kg/cm<sup>2</sup> (forma polinómica). Del km 57.5 al 70, los valores tendieron a subir hasta 2,000 kg/cm<sup>2</sup> (forma polinómica). Lo anterior significa que las terracerías tienen buena capacidad de carga.

## E.3 SIMULACIÓN ESTRUCTURAL

### E.3.1 Estado actual del pavimento

Con el objeto de simular el comportamiento del pavimento para cualquier situación, se requiere caracterizar el o los tramos en estudio, tomando como parámetros los espesores y las propiedades mecánicas de las capas (Tabla E.1). También se requiere información relativa a la intensidad y frecuencia de tránsito (Tablas E.2 y E.3). Mediante la aplicación del MEF, con la malla típica de 144 elementos y 171 nodos, se probaron las diferentes cargas por eje, de donde se obtuvieron las deformaciones unitarias de compresión y tensión, mismas que se consideran en las ecuaciones de fatiga del programa de cómputo y con las cuales se obtienen los ciclos a la falla y la vida esperada.

Tabla E.1 Estructura para la condición actual. Caso 1

ZONA	CARRIL	SUBTRAMO km a km	ESPESOR DE CAPA (cm)	PROPIEDADES MECÁNICAS	
				MÓDULO ELÁSTICO (E) (kg/cm <sup>2</sup> )	RELACIÓN DE POISSON ( $\mu$ )
1	DERECHO	45.0 46.0	Carpeta asfáltica existente 28	22,329	0.35
			Base hidráulica existente 16	2,440	0.40
			Capas inferiores 300	1,990	0.45
2	DERECHO	46.0 52.0	Carpeta asfáltica existente 20	11,850	0.35
			Base hidráulica existente 16	2,878	0.40
			Capas inferiores 300	2,198	0.45
3	DERECHO	52.0 55.0	Carpeta asfáltica existente 24	15,083	0.35
			Base hidráulica existente 20	2,362	0.40
			Capas inferiores 300	1,214	0.45
4	DERECHO	55.0 57.6	Carpeta asfáltica existente 20	19,229	0.35
			Base hidráulica existente 19	1,750	0.40
			Capas inferiores 300	1,138	0.45
5	DERECHO	57.6 62.0	Carpeta asfáltica existente 4	29,000	0.35
			Subrasante 39	1,916	0.45
			Capas inferiores 300	1,606	0.45
6	DERECHO	62.0 65.0	Carpeta asfáltica existente 6	45,110	0.35
			Subrasante 37	2,817	0.45
			Capas inferiores 300	2,171	0.45
7	DERECHO	65.0 67.0	Carpeta asfáltica existente 6	48,152	0.35
			Subrasante 28	2,258	0.45
			Capas inferiores 300	1,638	0.45
8	DERECHO	67.0 70.0	Carpeta asfáltica existente 7	45,377	0.35
			Subrasante 30	3,493	0.45
			Capas inferiores 300	1,881	0.45

9	IZQUIERDO	45.0	46.0	Carpeta asfáltica existente	28	17,320	0.35
				Base hidráulica existente	16	2,945	0.40
				Capas inferiores	300	2,320	0.45
10	IZQUIERDO	46.0	52.0	Carpeta asfáltica existente	20	18,807	0.35
				Base hidráulica existente	16	2,902	0.40
				Capas inferiores	300	1,637	0.45
11	IZQUIERDO	52.0	55.0	Carpeta asfáltica existente	24	15,445	0.35
				Base hidráulica existente	20	2,568	0.40
				Capas inferiores	300	1,458	0.45
12	IZQUIERDO	55.0	57.6	Carpeta asfáltica existente	20	11,662	0.35
				Base hidráulica existente	19	1,726	0.40
				Capas inferiores	300	781	0.45
13	IZQUIERDO	57.6	62.0	Carpeta asfáltica existente	4	31,829	0.35
				Subrasante	39	2,015	0.45
				Capas inferiores	300	1,754	0.45
14	IZQUIERDO	62.0	65.0	Carpeta asfáltica existente	6	45,000	0.35
				Subrasante	37	2,792	0.45
				Capas inferiores	300	2,371	0.45
15	IZQUIERDO	65.0	67.0	Carpeta asfáltica existente	6	41,067	0.35
				Subrasante	28	2,109	0.45
				Capas inferiores	300	1,567	0.45
16	IZQUIERDO	67.0	70.0	Carpeta asfáltica existente	7	39,271	0.35
				Subrasante	30	3,436	0.45
				Capas inferiores	300	2,132	0.45

### E.3.2 Análisis del tránsito

#### a) Condición actual

A partir de la información básica proporcionada por la Dirección General de Carreteras Federales (DGCF), de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), se consideraron los siguientes datos del tránsito diario promedio anual (TDPA):

Tabla E.2 *TDPA para la condición actual. Caso 1*

TRAMO (km)	TDPA	DISTRIBUCION VEHICULAR (%)		
		A (Automóvil)	B (Autobús)	C (Camión)
45 al 57.5	5,536	77	6	17
57.5 al 70	559	86	2	12

### **b) Condición futura**

La tasa de crecimiento vehicular se consideró de 4.5 % anual.

La clasificación del tránsito por tipo de vehículo reviste especial interés, ya que históricamente el camión es el tipo de vehículo que más afecta las condiciones superficial y estructural del pavimento. También se ha considerado el siguiente TDPA de proyecto, tomando en cuenta el número de carriles por sentido (tramo 1:  $5,536 \times 0.5 \times 0.65 = 1,799$ ; tramo 2:  $5,536 \times 0.5 = 2,768$ ).

*Tabla E.3. TDPA para el carril de proyecto. Caso 1*

Tramo	Ubicación km	Número carriles	TDPA DE PROYECTO POR CARRIL							
			A	B2	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R2	SUMA *
1	45 a 57.5	4	1,376	111	106	72	49	40	45	1,799
2	57.5 a 70	2	2,118	172	163	111	75	61	69	2,768

\* Clasificación SCT

### **E.3.3 Comportamiento actual del pavimento**

En consonancia con lo expresado anteriormente, se efectuó la simulación del comportamiento del pavimento, cuya información se presenta en las Tablas E.4 y E.5.

#### **Comentarios**

- La vida esperada para la condición actual del pavimento resultó de 5 a 6 años para el tramo del km 45 al 57.5 y de 7 a 8 años para el tramo del km 57.5 al 70.
- Para fines prácticos, se puede establecer que en la condición actual, con los trabajos de conservación normal, puede seguir operando la carretera otros 5 años más.
- Puesto que se contemplan ampliaciones a la Autopista que pasará de 2 a 4 carriles (km 45 al 57.5, Aprox.) y de 1 a 2 carriles (km 57.5 a 70), las características del tránsito favorecen en el primer tramo y perjudica en el segundo, lo cual conlleva a una propuesta de reforzamiento para mayor vida esperada (12 a 15 años), como se indica en el inciso siguiente.

Tabla E.4 Resultados obtenidos para la condición actual mediante el MEF. Caso 1

Zona	Carril	Subtramo (km) Del Al		Espesor de Capa (cm)	Carga por eje (t)	Deformación Unitaria		Ciclos de falla (N <sub>f</sub> )	
						Compresión 1x10 <sup>-4</sup> (m/m)	Tensión 1x10 <sup>-4</sup> (m/m)	Por Compresión 1 x 10 <sup>7</sup>	Por Tensión 1 x 10 <sup>7</sup>
1	Der.	45.0	46.0	Carpeta asfáltica existente 28	6.5	3.67	1.03	2.10	2.03
				Base hidráulica existente 16	11.0	5.14	1.55	0.52	0.25
				Capas inferiores 300	18.0	4.41	1.26	0.98	0.72
					19.5	4.42	1.37	0.98	0.48
					22.5	3.67	1.05	2.10	1.76
2	Der.	46.0	52.0	Carpeta asfáltica existente 20	6.5	3.60	1.15	2.28	1.12
				Base hidráulica existente 16	11.0	4.80	1.49	0.69	0.31
				Capas inferiores 300	18.0	3.60	1.22	2.28	0.84
					19.5	3.60	1.32	2.28	0.57
					22.5	3.00	1.01	4.87	2.20
3	Der.	52.0	55.0	Carpeta asfáltica existente 24	6.5	3.79	0.93	1.84	3.34
				Base hidráulica existente 20	11.0	5.30	1.59	0.45	0.23
				Capas inferiores 300	18.0	4.55	1.29	0.86	0.65
					19.5	4.92	1.39	0.62	0.44
					22.5	3.79	1.08	1.84	1.60
4	Der.	55.0	57.5	Carpeta asfáltica existente 20	6.5	3.90	1.02	1.64	2.11
				Base hidráulica existente 19	11.0	5.41	1.60	0.42	0.22
				Capas inferiores 300	18.0	4.87	1.29	0.65	0.64
					19.5	4.87	1.40	0.65	0.43
					22.5	3.90	1.07	1.64	1.63
5	Der.	57.5	62.0	Carpeta asfáltica existente 4	6.5	5.10	2.06	0.54	0.06
				Subrasante 39	11.0	6.56	2.74	0.19	0.01
				Capas inferiores 300	18.0	5.34	2.26	0.44	0.04
					19.5	5.83	2.40	0.31	0.03
					22.5	4.61	1.87	0.81	0.10
6	Der.	62.0	65.0	Carpeta asfáltica existente 6	6.5	3.63	2.04	0.43	0.08
				Subrasante 37	11.0	6.71	2.75	0.17	0.01
				Capas inferiores 300	18.0	5.65	2.26	0.35	0.04
					19.5	6.00	2.44	0.27	0.03
					22.5	4.94	1.87	0.61	0.10
7	Der.	65.0	67.0	Carpeta asfáltica existente 6	6.5	5.73	1.88	0.33	0.10
				Subrasante 28	11.0	7.92	2.74	0.09	0.01
				Capas inferiores 300	18.0	6.59	2.22	0.18	0.04
					19.5	7.06	2.43	0.14	0.03
					22.5	5.27	1.88	0.47	0.10
8	Der.	67.0	70.0	Carpeta asfáltica existente 7	6.5	5.84	1.81	0.31	0.12
				Subrasante 30	11.0	8.20	2.76	0.07	0.01
				Capas inferiores 300	18.0	6.66	2.26	0.18	0.04
					19.5	7.16	2.43	0.13	0.03
					22.5	5.62	1.86	0.36	0.10

9	Izq.	45.0	46.0	Carpeta asfáltica existente	28	6.5	5.05	2.07	0.56	0.06
				Base hidráulica existente	16	11.0	6.65	2.77	0.18	0.01
				Capas inferiores	300	18.0	5.58	2.29	0.37	0.04
						19.5	6.12	2.45	0.25	0.03
						22.5	4.79	1.89	0.70	0.10
10	Izq.	46.0	52.0	Carpeta asfáltica existente	20	6.5	5.09	1.85	0.54	0.11
				Base hidráulica existente	16	11.0	6.09	2.60	0.26	0.02
				Capas inferiores	300	18.0	5.34	2.10	0.44	0.06
						19.5	5.70	2.31	0.34	0.03
						22.5	4.63	1.78	0.80	0.13
11	Izq.	52.0	55.0	Carpeta asfáltica existente	24	6.5	3.85	0.56	1.73	4.25
				Base hidráulica existente	20	11.0	8.09	2.80	0.08	0.01
				Capas inferiores	300	18.0	6.39	2.33	0.21	0.03
						19.5	7.25	2.51	0.12	0.02
						22.5	5.55	1.91	0.38	0.09
12	Izq.	55.0	57.5	Carpeta asfáltica existente	20	6.5	5.26	1.91	0.47	0.09
				Base hidráulica existente	19	11.0	7.35	2.61	0.12	0.02
				Capas inferiores	300	18.0	6.29	2.10	0.22	0.06
						19.5	6.43	2.32	0.20	0.03
						22.5	5.26	1.76	0.47	0.13
13	Izq.	57.5	62.0	Carpeta asfáltica existente	4	6.5	3.67	1.05	2.10	1.81
				Subrasante	39	11.0	2.94	1.51	5.32	0.30
				Capas inferiores	300	18.0	3.67	1.23	2.10	0.81
						19.5	4.41	1.65	0.98	0.51
						22.5	3.67	1.03	2.10	2.00
14	Izq.	62.0	65.0	Carpeta asfáltica existente	6	6.5	4.08	1.07	1.35	1.61
				Subrasante	37	11.0	5.25	1.52	0.47	0.29
				Capas inferiores	300	18.0	4.67	1.24	7.74	0.80
						19.5	4.67	1.35	7.74	0.51
						22.5	3.50	1.05	2.57	1.80
15	Izq.	65.0	67.0	Carpeta asfáltica existente	6	6.5	3.03	0.98	4.67	2.58
				Subrasante	28	11.0	4.55	1.62	0.86	0.21
				Capas inferiores	300	18.0	3.79	1.25	1.84	0.75
						19.5	4.17	1.36	1.24	0.49
						22.5	3.41	1.06	2.86	1.71
16	Izq.	67.0	70.0	Carpeta asfáltica existente	7	6.5	3.48	1.04	2.64	1.93
				Subrasante	30	11.0	5.21	1.56	0.49	0.25
				Capas inferiores	300	18.0	4.17	1.40	1.23	0.43
						19.5	4.78	1.39	0.70	0.45
						22.5	3.82	1.16	1.77	1.07

*Tabla E.5 Vida remanente para la condición actual. Caso 1*

Zona	Carril	Subtramo Del km	Al km	Espesor de Capa		Vida Esperada (años)
1	Der.	45.0	46.0	Carpeta asfáltica existente	28	5.70
				Base hidráulica existente	16	
				Capas inferiores	300	
2	Der.	46.0	52.0	Carpeta asfáltica existente	20	6.14
				Base hidráulica existente	16	
				Capas inferiores	300	
3	Der.	52.0	55.0	Carpeta asfáltica existente	24	5.24
				Base hidráulica existente	20	
				Capas inferiores	300	
4	Der.	55.0	57.5	Carpeta asfáltica existente	20	5.10
				Base hidráulica existente	19	
				Capas inferiores	300	
5	Der.	57.5	62.0	Carpeta asfáltica existente	4	7.09
				Subrasante	39	
				Capas inferiores	300	
6	Der.	62.0	65.0	Carpeta asfáltica existente	6	8.36
				Subrasante	37	
				Capas inferiores	300	
7	Der.	65.0	67.0	Carpeta asfáltica existente	6	7.17
				Subrasante	28	
				Capas inferiores	300	
8	Der.	67.0	70.0	Carpeta asfáltica existente	7	7.68
				Subrasante	30	
				Capas inferiores	300	
9	Izq.	45.0	46.0	Carpeta asfáltica existente	28	6.13
				Base hidráulica existente	16	
				Capas inferiores	300	
10	Izq.	46.0	52.0	Carpeta asfáltica existente	20	5.84
				Base hidráulica existente	16	
				Capas inferiores	300	
11	Izq.	52.0	55.0	Carpeta asfáltica existente	24	5.50
				Base hidráulica existente	20	
				Capas inferiores	300	
12	Izq.	55.0	57.5	Carpeta asfáltica existente	20	4.90
				Base hidráulica existente	19	
				Capas inferiores	300	

13	Izq.	57.5	62.0	Carpeta asfáltica existente	4	6.83
				Subrasante	39	
				Capas inferiores	300	
14	Izq.	62.0	65.0	Carpeta asfáltica existente	6	8.24
				Subrasante	37	
				Capas inferiores	300	
15	Izq.	65.0	67.0	Carpeta asfáltica existente	6	7.01
				Subrasante	28	
				Capas inferiores	300	
16	Izq.	67.0	70.0	Carpeta asfáltica existente	7	7.80
				Subrasante	30	
				Capas inferiores	300	

### E.3.4 Comportamiento futuro del pavimento

De acuerdo con la sugerencia del último comentario, para alargar la vida del pavimento bajo las condiciones futuras se hace la siguiente propuesta de reforzamiento:

En el tramo 1, con cadenamiento del km 45 al 57.5, se propone una estructura de 5 cm de carpeta asfáltica nueva, para renivelar y absorber deficiencias superficiales, principalmente; para el tramo 2, con cadenamiento del km 57.5 al 70, también se proponen 5 cm de carpeta asfáltica nueva, pero colocada sobre 15 cm de una base con emulsión asfáltica. La estructura así propuesta se presenta en la Tabla E.6.

Tabla E.6 Estructura propuesta para la condición futura. Caso 1

ZONA	CARRIL	SUBTRAMO km a km	ESPESOR DE CAPA (cm)	PROPIEDADES MECÁNICAS		
				MÓDULO ELÁSTICO (E) (kg/cm <sup>2</sup> )	RELACIÓN DE POISSON ( $\mu$ )	
1	DERECHO	45.0 46.0	Carpeta asfáltica nueva	5	35,000	0.35
			Carpeta asfáltica existente	28	22,329	0.35
			Base hidráulica existente	16	2,440	0.40
			Capas inferiores	300	1,990	0.45
2	DERECHO	46.0 52.0	Carpeta asfáltica nueva	5	35,000	0.35
			Carpeta asfáltica existente	20	11,850	0.35
			Base hidráulica existente	16	2,878	0.40
			Capas inferiores	300	2,198	0.45
3	DERECHO	52.0 55.0	Carpeta asfáltica nueva	5	35,000	0.35
			Carpeta asfáltica existente	24	15,083	0.35
			Base hidráulica existente	20	2,362	0.40
			Capas inferiores	300	1,214	0.45

4	DERECHO	55.0	57.6	Carpeta asfáltica nueva	5	35,000	0.35
				Carpeta asfáltica existente	20	19,229	0.35
				Base hidráulica existente	19	1,750	0.40
				Capas inferiores	300	1,138	0.45
5	DERECHO	57.6	62.0	Carpeta asfáltica nueva	5	35,000	0.35
				Base asfáltica con emulsión	15	20,000	0.35
				Carpeta asfáltica existente	4	29,000	0.35
				Subrasante	39	1,916	0.45
				Capas inferiores	300	1,606	0.45
6	DERECHO	62.0	65.0	Carpeta asfáltica nueva	5	35,000	0.35
				Base asfáltica con emulsión	15	20,000	0.35
				Carpeta asfáltica existente	6	45,110	0.35
				Subrasante	37	2,817	0.45
				Capas inferiores	300	2,171	0.45
7	DERECHO	65.0	67.0	Carpeta asfáltica nueva	5	35,000	0.35
				Base asfáltica con emulsión	15	20,000	0.35
				Carpeta asfáltica existente	6	48,152	0.35
				Subrasante	28	2,258	0.45
				Capas inferiores	300	1,638	0.45
8	DERECHO	67.0	70.0	Carpeta asfáltica nueva	5	35,000	0.35
				Base asfáltica con emulsión	15	20,000	0.35
				Carpeta asfáltica existente	7	45,377	0.35
				Subrasante	30	3,493	0.45
				Capas inferiores	300	1,881	0.45
9	IZQUIERDO	45.0	46.0	Carpeta asfáltica nueva	5	35,000	0.35
				Carpeta asfáltica existente	28	17,320	0.35
				Base hidráulica existente	16	2,945	0.40
				Capas inferiores	300	2,320	0.45
10	IZQUIERDO	46.0	52.0	Carpeta asfáltica nueva	5	35,000	0.35
				Carpeta asfáltica existente	20	18,807	0.35
				Base hidráulica existente	16	2,902	0.40
				Capas inferiores	300	1,637	0.45
11	IZQUIERDO	52.0	55.0	Carpeta asfáltica nueva	5	35,000	0.35
				Carpeta asfáltica existente	24	15,445	0.35
				Base hidráulica existente	20	2,568	0.40
				Capas inferiores	300	1,458	0.45
12	IZQUIERDO	55.0	57.6	Carpeta asfáltica nueva	5	35,000	0.35
				Carpeta asfáltica existente	20	11,662	0.35
				Base hidráulica existente	19	1,726	0.40
				Capas inferiores	300	781	0.45
13	IZQUIERDO	57.6	62.0	Carpeta asfáltica nueva	5	35,000	0.35
				Base asfáltica con emulsión	15	20,000	0.35
				Carpeta asfáltica existente	4	31,829	0.35
				Subrasante	39	2,015	0.45
				Capas inferiores	300	1,754	0.45

14	IZQUIERDO	62.0	65.0	Carpeta asfáltica nueva	5	35,000	0.35
				Base asfáltica con emulsión	15	20,000	0.35
				Carpeta asfáltica existente	6	45,000	0.35
				Subrasante	37	2,792	0.45
				Capas inferiores	300	2,371	0.45
15	IZQUIERDO	65.0	67.0	Carpeta asfáltica nueva	5	35,000	0.35
				Base asfáltica con emulsión	15	20,000	0.35
				Carpeta asfáltica existente	6	41,067	0.35
				Subrasante	28	2,109	0.45
				Capas inferiores	300	1,567	0.45
16	IZQUIERDO	67.0	70.0	Carpeta asfáltica nueva	5	35,000	0.35
				Base asfáltica con emulsión	15	20,000	0.35
				Carpeta asfáltica existente	7	39,271	0.35
				Subrasante	30	3,436	0.45
				Capas inferiores	300	2,132	0.45

Siguiendo lo indicado en el inciso anterior, se realizó la simulación del pavimento, cuya información se presenta en las Tablas E.7 y E.8, de las cuales se pueden hacerse los siguientes comentarios:

### Comentarios

- La vida esperada para la condición futura del pavimento resultó de 12 a 14 años para el tramo del km 45 al 57.5 (Aprox.) y de 14 a 15 años para el tramo del km 57.5 al 70.
- Para fines prácticos, se puede establecer que en la condición futura y con los trabajos de conservación normal, puede seguir operando la carretera por lo menos 12 años más.

Tabla E.7 Resultados obtenidos para la condición futura mediante el MEF. Caso 1

Zona	Carril	Subtramo (km)		Espesor de Capa (cm)	Carga por eje (t)	Deformación Unitaria		Ciclos de falla (N <sub>f</sub> )		
		Del	Al			Compresión $1 \times 10^{-4}$ (m/m)	Tensión $1 \times 10^{-4}$ (m/m)	Por Compresión $1 \times 10^7$	Por Tensión $1 \times 10^7$	
1	Der.	45.0	46.0	Carpeta asfáltica nueva	5	6.5	2.40	0.79	12.40	7.38
				Carpeta asfáltica existente	28	11.0	3.60	1.34	2.28	0.52
				Base hidráulica existente	16	18.0	3.00	1.10	4.87	1.40
				Capas inferiores	300	19.5	3.36	1.20	3.04	0.92
						22.5	2.71	0.92	7.42	3.46
2	Der.	46.0	52.0	Carpeta asfáltica nueva	5	6.5	2.41	0.85	12.10	5.23
				Carpeta asfáltica existente	20	11.0	3.14	1.36	4.01	0.50
				Base hidráulica existente	16	18.0	2.66	1.12	8.03	1.31
				Capas inferiores	300	19.5	2.89	1.21	5.67	0.87
						22.5	2.41	0.93	12.10	3.38

3	Der.	52.0	55.0	Carpeta asfáltica nueva	5	6.5	2.90	0.79	5.58	7.44
				Carpeta asfáltica existente	24	11.0	4.03	1.39	1.42	0.45
				Base hidráulica existente	20	18.0	3.39	1.13	2.94	1.25
				Capas inferiores	300	19.5	3.71	1.23	2.01	0.83
						22.5	2.90	0.95	5.58	2.94
4	Der.	55.0	57.5	Carpeta asfáltica nueva	5	6.5	2.84	0.77	6.09	8.64
				Carpeta asfáltica existente	20	11.0	3.85	1.41	1.72	0.41
				Base hidráulica existente	19	18.0	3.34	1.14	3.12	1.18
				Capas inferiores	300	19.5	3.51	1.25	2.55	0.76
						22.5	2.83	0.96	6.23	2.78
5	Der.	57.5	62.0	Carpeta asfáltica nueva	5	6.5	1.50	0.71	87.30	12.70
				Base asfáltica con emulsión	15	11.0	2.16	1.23	19.00	0.81
				Carpeta asfáltica existente	4	18.0	1.83	1.01	38.00	2.17
				Subrasante	39	19.5	1.99	1.11	26.90	1.39
				Capas inferiores	300	22.5	1.58	0.82	70.50	6.14
6	Der.	62.0	65.0	Carpeta asfáltica nueva	5	6.5	1.56	0.68	73.40	15.60
				Base asfáltica con emulsión	15	11.0	2.30	1.22	80	0.84
				Carpeta asfáltica existente	6	18.0	1.93	1.00	30.60	2.33
				Subrasante	37	19.5	2.08	1.07	22.30	1.62
				Capas inferiores	300	22.5	1.63	0.83	62.20	5.73
7	Der.	65.0	67.0	Carpeta asfáltica nueva	5	6.5	1.82	0.70	38.70	00
				Base asfáltica con emulsión	15	11.0	2.57	1.23	9.32	0.81
				Carpeta asfáltica existente	6	18.0	2.16	1.01	19.10	2.18
				Subrasante	28	19.5	2.32	1.09	10	1.48
				Capas inferiores	300	22.5	1.82	0.85	38.70	5.23
8	Der.	67.0	70.0	Carpeta asfáltica nueva	5	6.5	1.78	0.68	42.70	15.40
				Base asfáltica con emulsión	15	11.0	2.77	1.23	6.76	0.81
				Carpeta asfáltica existente	7	18.0	2.24	1.01	16.50	2.24
				Subrasante	30	19.5	2.51	1.09	10.30	1.53
				Capas inferiores	300	22.5	1.88	0.84	34.50	5.36
9	Izq.	45.0	46.0	Carpeta asfáltica nueva	5	6.5	2.58	0.85	13.34	7.94
				Carpeta asfáltica existente	28	11.0	3.87	1.44	2.45	0.56
				Base hidráulica existente	16	18.0	3.23	1.18	5.24	1.51
				Capas inferiores	300	19.5	3.61	1.29	3.27	0.99
						22.5	2.91	0.99	7.98	3.72
10	Izq.	46.0	52.0	Carpeta asfáltica nueva	5	6.5	2.29	0.81	11.51	4.97
				Carpeta asfáltica existente	20	11.0	2.99	1.29	3.81	0.48
				Base hidráulica existente	16	18.0	2.53	1.07	7.64	1.25
				Capas inferiores	300	19.5	2.75	1.15	5.39	0.83
						22.5	2.29	0.88	11.51	3.21
11	Izq.	52.0	55.0	Carpeta asfáltica nueva	5	6.5	3.04	0.83	5.86	7.81
				Carpeta asfáltica existente	24	11.0	4.23	1.46	1.49	0.47
				Base hidráulica existente	20	18.0	3.56	1.19	3.09	1.31
				Capas inferiores	300	19.5	3.89	1.29	2.11	0.87
						22.5	3.04	1.00	5.86	3.09

12	Izq.	55.0	57.5	Carpeta asfáltica nueva	5	6.5	2.73	0.74	5.86	8.31
				Carpeta asfáltica existente	20	11.0	3.70	1.36	1.65	0.39
				Base hidráulica existente	19	18.0	3.21	1.10	3.00	1.13
				Capas inferiores	300	19.5	3.38	1.20	2.45	0.73
						22.5	2.72	0.92	5.99	2.67
13	Izq.	57.5	62.0	Carpeta asfáltica nueva	5	6.5	1.44	0.68	84.10	12.23
				Base asfáltica con emulsión	15	11.0	2.08	1.18	18.30	0.78
				Carpeta asfáltica existente	4	18.0	1.76	0.97	36.61	2.09
				Subrasante	39	19.5	1.92	1.07	25.91	1.34
				Capas inferiores	300	22.5	1.52	0.79	67.91	5.91
14	Izq.	62.0	65.0	Carpeta asfáltica nueva	5	6.5	1.54	0.67	72.35	15.38
				Base asfáltica con emulsión	15	11.0	2.27	1.20	59	0.82
				Carpeta asfáltica existente	6	18.0	1.90	0.99	30.16	2.30
				Subrasante	37	19.5	2.05	1.05	21.98	1.60
				Capas inferiores	300	22.5	1.61	0.82	61.31	5.65
15	Izq.	65.0	67.0	Carpeta asfáltica nueva	5	6.5	1.78	0.68	37.84	13.69
				Base asfáltica con emulsión	15	11.0	2.51	1.20	9.11	0.79
				Carpeta asfáltica existente	6	18.0	2.11	0.99	18.67	2.13
				Subrasante	28	19.5	2.27	1.07	13.79	1.45
				Capas inferiores	300	22.5	1.78	0.83	37.84	5.11
16	Izq.	67.0	70.0	Carpeta asfáltica nueva	5	6.5	1.81	0.69	43.37	15.64
				Base asfáltica con emulsión	15	11.0	2.81	1.25	6.87	0.82
				Carpeta asfáltica existente	7	18.0	2.28	1.03	16.76	2.28
				Subrasante	30	19.5	2.55	1.11	10.46	1.55
				Capas inferiores	300	22.5	1.91	0.85	35.04	5.44

Tabla E.8 *Vida esperada para la condición futura. Caso 1*

Zona	Carril	Subtramo		Espesor de Capa	Vida Esperada (años)	
		Del km	Al km			
1	Der.	45.0	46.0	Carpeta asfáltica nueva	5	13.95
				Carpeta asfáltica existente	28	
				Base hidráulica existente	16	
				Capas inferiores	300	
2	Der.	46.0	52.0	Carpeta asfáltica nueva	5	13.26
				Carpeta asfáltica existente	20	
				Base hidráulica existente	16	
				Capas inferiores	300	
3	Der.	52.0	55.0	Carpeta asfáltica nueva	5	12.62
				Carpeta asfáltica existente	24	
				Base hidráulica existente	20	
				Capas inferiores	300	

4	Der.	55.0	57.5	Carpeta asfáltica nueva	5	11.93
				Carpeta asfáltica existente	20	
				Base hidráulica existente	19	
				Capas inferiores	300	
5	Der.	57.5	62.0	Carpeta asfáltica nueva	5	14.01
				Base asfáltica con emulsión	15	
				Carpeta asfáltica existente	4	
				Subrasante	39	
				Capas inferiores	300	
6	Der.	62.0	65.0	Carpeta asfáltica nueva	5	14.94
				Base asfáltica con emulsión	15	
				Carpeta asfáltica existente	6	
				Subrasante	37	
				Capas inferiores	300	
7	Der.	65.0	67.0	Carpeta asfáltica nueva	5	14.25
				Base asfáltica con emulsión	15	
				Carpeta asfáltica existente	6	
				Subrasante	28	
				Capas inferiores	300	
8	Der.	67.0	70.0	Carpeta asfáltica nueva	5	14.47
				Base asfáltica con emulsión	15	
				Carpeta asfáltica existente	7	
				Subrasante	30	
				Capas inferiores	300	
9	Izq.	45.0	46.0	Carpeta asfáltica nueva	5	15.00
				Carpeta asfáltica existente	28	
				Base hidráulica existente	16	
				Capas inferiores	300	
10	Izq.	46.0	52.0	Carpeta asfáltica nueva	5	12.61
				Carpeta asfáltica existente	20	
				Base hidráulica existente	16	
				Capas inferiores	300	
11	Izq.	52.0	55.0	Carpeta asfáltica nueva	5	13.25
				Carpeta asfáltica existente	24	
				Base hidráulica existente	20	
				Capas inferiores	300	
12	Izq.	55.0	57.5	Carpeta asfáltica nueva	5	12.89
				Carpeta asfáltica existente	20	
				Base hidráulica existente	19	
				Capas inferiores	300	
13	Izq.	57.5	62.0	Carpeta asfáltica nueva	5	13.50
				Base asfáltica con emulsión	15	
				Carpeta asfáltica existente	4	
				Subrasante	39	
				Capas inferiores	300	

14	Izq.	62.0	65.0	Carpeta asfáltica nueva	5	14.73
				Base asfáltica con emulsión	15	
				Carpeta asfáltica existente	6	
				Subrasante	37	
				Capas inferiores	300	
15	Izq.	65.0	67.0	Carpeta asfáltica nueva	5	13.93
				Base asfáltica con emulsión	15	
				Carpeta asfáltica existente	6	
				Subrasante	28	
				Capas inferiores	300	
16	Izq.	67.0	70.0	Carpeta asfáltica nueva	5	14.70
				Base asfáltica con emulsión	15	
				Carpeta asfáltica existente	7	
				Subrasante	30	
				Capas inferiores	300	

## E.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### E.4.1 Conclusiones

Primera Por razones geométricas y de tránsito, la porción de carretera estudiada puede dividirse en 2 tramos característicos, a saber:

TRAMO	km	NÚMERO DE CARRILES		TRÁNSITO DIARIO PROMEDIO ANUAL	
		ACTUAL	FUTURO	ACTUAL	FUTURO *
1	45 a 57.5	2	4	5,536	1,799
2	57.5 a 70		2	559	2,768

\* Carril de proyecto. Incremento anual de 4.5 %

Segunda Para las condiciones actuales de tránsito y conservación de la carretera, en general los dos tramos tienen buenas características de capacidad de carga en las capas del pavimento (evaluación estructural favorable), así como en la irregularidad superficial y profundidad de rodera (evaluación superficial favorable), lo cual da como resultado una vida útil residual de 5 años.

### E.4.2 Recomendaciones

Primera De acuerdo con el proyecto de modernización propuesto por la DGCF de la SCT, conviene reforzar la estructura del pavimento para aumentar su vida, mediante la colocación de las siguientes capas adicionales (previa preparación de la superficie actual):

TRAMO	km	ESPESOR (cm)	
		Carpeta asfáltica	Base Asfáltica con emulsión
1	45 al 57.5	5	-
2	57.5 al 70		15

Segunda Para alcanzar una vida de por lo menos 12 años en la condición futura para la propuesta de reforzamiento sugerida, durante la construcción es muy importante asegurar los niveles de calidad establecidos en el proyecto, con la implantación de un sistema ágil y oportuno para la verificación y certificación que deberán exigir respectivamente los responsables de la supervisión y el control de calidad.

**CASO 2: Villahermosa-Zacatal (Villahermosa – Cd. del Carmen; RVO y Cía, 2001a).**

## **E.1 EVALUACIÓN SUPERFICIAL (Plano 3)**

### ***E.1.1 Índice de Irregularidad Internacional (III)***

- En ambos carriles, los valores del III son muy variables, sobre todo del km 100 en adelante, donde se tienen valores superiores a 4 mm/m, según la gráfica de tendencias (forma polinómica).
- Desde el punto de vista de la evaluación superficial, para reducir las variaciones del III y aumentar exclusivamente la comodidad del usuario, lo más conveniente es colocar una sobrecarpeta de 5 cm en todo el tramo, de preferencia con un fresado o desbastado previo para optimizar resultados, pero es costoso. Sin embargo, esto requiere también de los resultados de la evaluación estructural, para tomar decisiones sobre la necesidad de dicho fresado o de corte y recuperación en algunas zonas (por ejemplo: del km 106 en adelante).

### ***E.1.2 Profundidad de rodera***

- En general, en ambos carriles se observa que en algunas zonas, principalmente del km 106 en adelante, los valores mayores corresponden a la rodada derecha, quizás debido al efecto de la pendiente transversal (bombeo). Esto es congruente con las observaciones efectuadas durante el levantamiento de deterioro del pavimento, indicado más adelante.
- Los valores máximos registrados (forma polinómica) alcanzan valores hasta de 3 mm (del km 106 al 124, carril derecho, rodada derecha), aunque individualmente hay valores mayores.
- En general, del km 30 al 100, aproximadamente se tienen menores variaciones en la profundidad de roderas que del km 100 en adelante.

### ***E.1.3 Levantamiento de deterioro***

- Para ambos carriles, se observa el agrietamiento tipo “piel de cocodrilo”, las grietas de reflexión y algunas longitudinales o transversales, las roderas y la exudación de asfalto, principalmente del km 100 (aproximadamente) en adelante. Se hace notar

que hay algunos de estos defectos en zonas aisladas del km 30 al 100, aproximadamente

- Se encontraron baches reparados y otros abiertos en varias zonas del tramo estudiado.
- El defecto tipo desgaste o erosión se encontró principalmente del km 30 al 100, aproximadamente, con zonas localizadas en el resto del tramo estudiado.

## **E.2 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL (Plano 4)**

### ***E.2.1 Medición de desplazamientos verticales***

Los resultados de la medición de los desplazamientos verticales se pueden observar en el Plano 4, donde se grafica el cadenamiento (eje horizontal) y el desplazamiento vertical registrado por cada sensor (eje vertical). Cada una de estas gráficas tiene el registro de 7 sensores ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$ ,  $S_5$ ,  $S_6$  y  $S_7$ ); para cada cadenamiento se obtiene el perfil de la cuenca de desplazamientos verticales. Los resultados más sobresalientes se presentan a continuación (Plano 4):

- En ambos carriles del km 30 al 106, a grandes rasgos se puede establecer que los desplazamientos verticales tienen una distribución similar y homogénea, con valores en el sensor bajo la carga ( $S_1$ ) inferiores a 1.0 mm (forma polinómica), en contraste con lo observado del km 106 en adelante, donde alcanza valores de 1.3 mm (forma polinómica). Esto es indicio de capacidad de carga de regular a buena en las capas del pavimento, sobre todo en las inferiores, lo cual refleja además que el camino está cumpliendo su misión para las condiciones actuales de tránsito y conservación, pero requiere de reforzamiento para las condiciones futuras de tránsito.
- Se hace notar que hay zonas con desplazamientos verticales relativamente bajos, como en los libramientos Nvo. Progreso y S. Antonio (km 116.25 a 120.9 y km 125.4 a 128.4), los cuales tienen base hidráulica.

### ***E.2.2 Índice Estructural del pavimento ( $I_e$ )***

En el Plano 4 se presenta el  $I_e$  correspondiente a cada punto de medición, así como el valor medio ( $\bar{I}_e$ ) para cada tramo. Además, se indica la Calificación Estructural ( $C_e$ ) equivalente.

- El valor del  $\bar{I}_e$  en el tramo del km 30 al 106 es de 0.251 y 0.275 (carril derecho e izquierdo respectivamente). En el tramo del km 106 al 163, los valores son de 0.313 y 0.310 para el carril correspondiente.
- Se considera que para mejorar el  $I_e$  es recomendable reforzar la estructura mediante la colocación de una capa de concreto asfáltico de 5 cm de espesor en toda la carretera, previa recuperación en el tramo del km 106 al 163, donde los valores son mayores a 0.3.

### ***E.2.3 Módulos elásticos de las capas***

En el Plano 4 se presentan gráficamente los módulos elásticos resultantes para la carpeta asfáltica, así como los correspondientes para las demás capas de apoyo. Esta información se acepta como representativa de la condición actual en las capas del pavimento; en todos los casos se ha considerado el comportamiento granular de los materiales bajo la carpeta. Dicha información servirá de apoyo para la simulación estructural para el refuerzo o la rehabilitación del pavimento.

Los resultados más sobresalientes se presentan a continuación:

- Del km 30 al 106 en ambos carriles, el módulo elástico de la carpeta asfáltica fluctúa entre 3,000 y 11,000 kg/cm<sup>2</sup> (forma polinómica). Del km 106 en adelante, los módulos elásticos son mayores y alcanzan valores de 20,000 kg/cm<sup>2</sup> (forma polinómica), con máximos hasta del doble. Recuérdese que a mayor módulo elástico mayor capacidad de carga tendrá la carpeta, pero también es susceptible de agrietamientos por su fragilidad, al tener mayor rigidez (caso del km 106 en adelante); en cambio, a menor módulo elástico (caso del km 30 al 103), la carpeta tiene menor capacidad de carga, pero es más flexible y se adapta mejor a las deformaciones de las capas de apoyo. Debe tomarse en cuenta que un criterio sano para aumentar el nivel de calidad general de una carpeta es considerarla como un capa de rodamiento flexible e impermeable y con mayor cohesión que una base asfáltica estabilizada con emulsión; ésta tiene mayor tendencia a la fricción interna que a la cohesión.
- Para fines prácticos y en toda la carretera, la carpeta asfáltica está apoyada en capas arenosas sin base ni sub-base (a excepción de los libramientos Nuevo Progreso y San Antonio (km 116.25 a 120.9 y km 125.4 a 128.4), cuyos módulos elásticos fluctúan entre 1,500 y 1,800 kg/cm<sup>2</sup> (forma polinómica). Esto refleja relativamente buena capacidad de carga en las capas inferiores, razón que ha permitido el comportamiento regular en el pavimento, a pesar de la ausencia de la base y sub-base (en general); recuérdese que individualmente hay zonas con valores hasta de 500 kg/cm<sup>2</sup> (aproximadamente).
- En ambos carriles, los módulos elásticos para las únicas capas de base (libramientos), varía entre 2,400 y 2,800 kg/cm<sup>2</sup> (forma polinómica).
- En las diferentes capas, se considera que se deben asignar módulos elásticos que representen las condiciones del comportamiento del pavimento, tanto actual como futuro, tomando en cuenta toda la información y comentarios obtenidos de las evaluaciones superficial y estructural, más la experiencia que al respecto se tiene en otros casos similares.

### E.3 SIMULACIÓN ESTRUCTURAL

#### E.3.1 Estado actual del pavimento

El análisis para esta vialidad se efectuó en forma similar a lo indicado en el Caso 1. En las Tabla E.9 se presentan los datos de la estructura para la condición actual y los datos viales considerados para el análisis aparecen en las Tablas E.10 y E.11.

Tabla E.9 Estructura para la condición actual. Caso 2

Zona	Carril	Subtramo		Espesor de Capa (cm)	Propiedades Mecánicas		
					Módulo Elástico (E) (kg/cm <sup>2</sup> )	Relación de Poisson( $\mu$ )	
		Del km	Al km				
1	Der.	30.0 (CON ACOTAMIENTOS)	32.0	Carpeta asfáltica existente	46	12,710	0.35
				Capas inferiores	300	1,375	0.45
2	Der.	32.0	35.0	Carpeta asfáltica existente	40	7,248	0.35
				Capas inferiores	300	793	0.45
3	Der.	35.0	56.0	Carpeta asfáltica existente	33	7,816	0.35
				Capas inferiores	300	1,685	0.45
4	Der.	56.0	71.0	Carpeta asfáltica existente	31	5,732	0.35
				Capas inferiores	300	1,127	0.45
5	Der.	71.0	75.0	Carpeta asfáltica existente	40	10,285	0.35
				Capas inferiores	300	1,183	0.45
6	Der.	75.0	88.0	Carpeta asfáltica existente	25	9,595	0.35
				Capas inferiores	300	1,080	0.45
7	Der.	88.0	106.0	Carpeta asfáltica existente	24	6,367	0.35
				Capas inferiores	300	1,615	0.45
8	Der.	106.0	116.3	Carpeta asfáltica existente	19	14,281	0.35
				Capas inferiores	300	1,698	0.45
9	Der.	116.3 LIB. NVO. PROGRESO	120.9	Carpeta asfáltica existente	11	14,836	0.35
				Base hidráulica existente	12	2,841	0.40
				Capas inferiores	300	1,744	0.45
10	Der.	120.9	125.4	Carpeta asfáltica existente*	18	22,943	0.35
				Capas inferiores	300	1,263	0.45
11	Der.	125.4 LIB. SN. ANTONIO	128.4	Carpeta asfáltica existente	6	19,453	0.35
				Base hidráulica	13	2,428	0.40
				Capas inferiores	300	1,255	0.45
12	Der.	128.4	134.2	Carpeta asfáltica existente	19	16,906	0.35
				Capas inferiores	300	2,220	0.45
13	Der.	134.2	146.0	Carpeta asfáltica existente*	19	26,144	0.35
				Capas inferiores	300	1,282	0.45
14	Der.	146.0	151.0	Carpeta asfáltica existente	22	15,202	0.35
				Capas inferiores	300	1,493	0.45

15	Der.	151.0	162.6	Carpeta asfáltica existente	16	15,616	0.35
				Capas inferiores	300	1,884	0.45
1 a	Izq.	30.0	32.0	Carpeta asfáltica existente	50	9,452	0.35
				Capas inferiores	300	1,002	0.45
2 a	Izq.	32.0	35.0	Carpeta asfáltica existente	36	5,452	0.35
				Capas inferiores	300	756	0.45
3 a	Izq.	35.0	56.0	Carpeta asfáltica existente	33	7,043	0.35
				Capas inferiores	300	1,576	0.45
4 a	Izq.	56.0	71.0	Carpeta asfáltica existente	32	6,768	0.35
				Capas inferiores	300	1,079	0.45
5 a	Izq.	71.0	75.0	Carpeta asfáltica existente	40	4,816	0.35
				Capas inferiores	300	119	0.45
6 a	Izq.	75.0	88.0	Carpeta asfáltica existente	25	5,426	0.35
				Capas inferiores	300	954	0.45
7 a	Izq.	88.0	706.0	Carpeta asfáltica existente	25	8,208	0.35
				Capas inferiores	300	1,480	0.45
8 a	Izq.	106.0	116.3	Carpeta asfáltica existente	18	13,000	0.35
				Capas inferiores	300	1,602	0.45
9 a	Izq.	116.3 LIB. NVO. PROGRESO	120.9	Carpeta asfáltica existente	12	10,178	0.35
				Base hidráulica	12	2,585	0.40
				Capas inferiores	300	1,592	0.45
10 a	Izq.	120.9	125.4	Carpeta asfáltica existente*	19	18,542	0.35
				Capas inferiores	300	1,464	0.45
11 a	Izq.	125.4 LIB. SN. ANTONIO	128.4	Carpeta asfáltica existente	7	18,111	0.35
				Base hidráulica	13	2,253	0.40
				Capas inferiores	300	1,156	0.45
12 a	Izq.	128.4	134.2	Carpeta asfáltica existente	20	15,187	0.35
				Capas inferiores	300	1,889	0.45
13 a	Izq.	134.2	146.0	Carpeta asfáltica existente*	21	22,147	0.35
				Capas inferiores	300	1,241	0.45
14 a	Izq.	146.0	151.0	Carpeta asfáltica existente	20	15,479	0.35
				Capas inferiores	300	1,399	0.45
15 a	Izq.	151.0	162.6	Carpeta asfáltica existente	19	12,777	0.35
				Capas inferiores	300	1,782	0.45

\* Sobrecarpeta con conchuela colocada sobre pavimento agrietado

### E.3.2 Análisis del tránsito

#### a) Condición actual

A partir de la información básica proporcionada por la DGCF de la SCT, se consideraron los siguientes datos del tránsito diario promedio anual (TDPA) para el tramo estudiado:

Tabla E.10 TDPA para la condición actual. Caso 2

ZONA	UBICACIÓN km (Aprox.)	TDPA	DISTRIBUCIÓN VEHICULAR (%)		
			A (Automóvil)	B (Autobús)	C (Camión)
1	30 al 75	4,754	76	5	19
2	75 al 163	2,640	80	7.5	12.5

### b) Condición futura

La tasa de crecimiento vehicular se consideró de 4.0 % anual.

También se tomó el camión como el tipo de vehículo que más afecta la condición superficial y estructural del pavimento. Se consideró el siguiente TDPA de proyecto, únicamente para 2 carriles de circulación (zona 1:  $4,754 \times 0.5 = 2,377$ ; zona 2:  $2,640 \times 0.5 = 1,320$ ):

Tabla E.11 TDPA para el carril de proyecto. Caso 2

ZONA	UBICACIÓN km (Aprox.)	NÚMERO CARRILES	TDPA DE PROYECTO POR CARRIL							
			A	B2	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R2	SUMA *
1	30 a 75	2	1,816	116	233	100	64	24	23	<b>2,377</b>
2	75 a 163		1,056	92	92	45	12	8	8	<b>1,320</b>

\* Clasificación SCT

Cuando existan 4 carriles, el TDPA de proyecto por carril conviene reducirlo en 65 %. De no hacerse esta corrección se está del lado de la seguridad, ya que la vida esperada del pavimento aumentaría en 50 % (aproximadamente).

### E.3.3 Comportamiento actual del pavimento

Acorde con lo descrito con anterioridad, se realizó la simulación del desempeño del pavimento, cuya información se presenta en las Tablas E.12 y E.13, A partir de ellas, se pueden establecer los comentarios siguientes:

#### Comentarios

- La vida esperada para la condición actual del pavimento resultó de 3 a 6 años para el tramo estudiado.

- Para fines prácticos, se puede establecer que en la condición actual y con los trabajos de conservación normal, puede seguir operando la carretera otros 4 años más.
- Con las ampliaciones que se harán, las características del tránsito conllevan a una propuesta de reforzamiento para aumentar más la vida esperada, como se indica en el inciso siguiente.

*Tabla E.12 Resultados obtenidos para la condición actual mediante el MEF. Caso 2*

Zona	Carril	Subtramo (km) Del Al		Espesor de Capa (cm)	Carga por eje (t)	Deformación Unitaria		Ciclos de falla (N <sub>f</sub> )	
						Compresión	Tensión	Por Compresión	Por Tensión
						1x10 <sup>-4</sup> (m/m)	1x10 <sup>-4</sup> (m/m)	1 x 10 <sup>7</sup>	1 x 10 <sup>7</sup>
1	Der.	30.0	32.0	Carpeta asfáltica existente 46	6.5	3.16	1.02	3.92	2.08
				Capas inferiores 300	11.0	3.60	1.63	2.29	0.20
					18.0	3.34	1.28	3.11	0.68
					19.5	3.44	1.43	2.75	0.39
					22.5	3.14	1.10	4.05	1.45
2	Der.	32.0	35.0	Carpeta asfáltica existente 40	6.5	2.49	1.20	10.50	0.93
				Capas inferiores 300	11.0	3.53	2.14	2.47	0.05
					18.0	2.98	1.75	5.01	0.14
					19.5	3.17	1.88	3.85	0.10
					22.5	2.53	1.46	9.97	0.35
3	Der.	35.0	56.0	Carpeta asfáltica existente 33	6.5	2.91	1.22	5.53	0.87
				Capas inferiores 300	11.0	3.40	1.91	2.89	0.09
					18.0	2.97	1.56	5.11	0.25
					19.5	3.07	1.70	4.45	0.16
					22.5	2.74	1.31	7.11	0.61
4	Der.	56.0	71.0	Carpeta asfáltica existente 31	6.5	2.02	1.08	25.20	1.58
				Capas inferiores 300	11.0	2.66	1.69	8.05	0.17
					18.0	2.29	1.37	15.10	0.48
					19.5	2.45	1.49	11.40	0.31
					22.5	2.01	1.16	25.90	1.11
5	Der.	71.0	75.0	Carpeta asfáltica existente 40	6.5	2.79	1.10	6.63	1.46
				Capas inferiores 300	11.0	3.17	1.77	3.87	0.13
					18.0	2.94	1.44	5.30	0.37
					19.5	3.06	1.58	4.51	0.24
					22.5	2.75	1.23	7.02	0.82
6	Der.	75.0	88.0	Carpeta asfáltica existente 25	6.5	2.56	1.27	9.39	0.71
				Capas inferiores 300	11.0	3.40	2.07	2.89	0.06
				Capas inferiores	18.0	2.88	1.69	5.82	0.17
					19.5	2.83	1.97	6.25	0.08
					22.5	2.55	1.41	9.65	0.41

7	Der.	88.0	706.0	Carpeta asfáltica existente	24	6.5	2.56	1.19	9.49	0.95
				Capas inferiores	300	11.0	3.51	2.07	2.54	0.06
						18.0	2.97	1.72	5.10	0.15
						19.5	3.19	1.86	3.77	0.10
						22.5	2.54	1.42	9.79	0.40
8	Der.	106.0	116.3	Carpeta asfáltica existente	19	6.5	1.94	1.56	29.80	0.25
				Capas inferiores	300	11.0	2.15	2.18	19.60	0.05
						18.0	1.91	1.94	32.10	0.08
						19.5	2.01	2.11	25.80	0.05
						22.5	1.79	1.50	42.10	0.31
9	Der.	116.3	120.9	Carpeta asfáltica existente	11	6.5	1.68	0.74	54.20	10.70
				Base hidráulica	12	11.0	2.05	1.29	23.90	0.64
				Capas inferiores	300	18.0	10.80	1.05	0.02	1.78
						19.5	2.31	1.14	40	1.18
						22.5	9.05	0.09	0.05	4.38
10	Der.	120.9	125.4	Carpeta asfáltica existente*	18	6.5	3.96	1.52	1.54	0.28
				Capas inferiores	300	11.0	4.43	2.07	0.96	0.06
						18.0	3.98	1.49	1.50	0.32
						19.5	4.17	1.81	1.24	0.12
						22.5	3.67	1.80	2.11	0.12
11	Der.	125.4	128.4	Carpeta asfáltica existente	6	6.5	6.27	1.51	0.23	0.30
				Base hidráulica	13	11.0	7.54	1.59	0.11	0.22
				Capas inferiores	300	18.0	6.39	1.30	0.21	0.61
						19.5	6.64	1.41	0.18	0.41
						22.5	5.13	1.09	0.52	1.52
12	Der.	128.4	134.2	Carpeta asfáltica existente	19	6.5	2.56	1.20	9.39	0.93
				Capas inferiores	300	11.0	3.52	2.08	2.51	0.06
						18.0	2.97	1.72	5.05	0.15
						19.5	3.20	1.86	3.73	0.10
						22.5	2.54	1.42	9.68	0.40
13	Der.	134.2	146.0	Carpeta asfáltica existente*	19	6.5	2.53	1.21	9.97	0.87
				Capas inferiores	300	11.0	3.58	2.17	2.34	0.05
						18.0	3.02	1.77	4.75	0.13
						19.5	3.22	1.90	3.65	0.09
						22.5	2.56	1.48	9.45	0.33
14	Der.	146.0	151.0	Carpeta asfáltica existente	22	6.5	2.87	1.16	5.86	1.11
				Capas inferiores	300	11.0	3.58	2.09	2.33	0.06
						18.0	3.05	1.71	4.56	0.16
						19.5	3.27	1.85	3.40	0.11
						22.5	2.85	1.42	6.05	0.39
15	Der.	151.0	162.6	Carpeta asfáltica existente	16	6.5	2.75	1.35	6.98	0.51
				Capas inferiores	300	11.0	3.71	2.26	2.01	0.04
						18.0	3.10	1.84	4.28	0.11
						19.5	3.37	1.99	3.02	0.07
						22.5	2.73	1.55	7.25	0.26

1a	Izq.	30.0	32.0	Carpeta asfáltica existente 50	6.5	3.19	1.03	3.76	1.98
				Capas inferiores 300	11.0	3.63	1.65	2.20	0.19
					18.0	3.37	1.29	2.99	0.65
					19.5	3.48	1.44	2.64	0.37
					22.5	3.17	1.11	3.89	1.38
2a	Izq.	32.0	35.0	Carpeta asfáltica existente 36	6.5	2.51	1.21	10.20	0.90
				Capas inferiores 300	11.0	3.55	2.15	2.40	0.05
					18.0	3.00	1.76	4.87	0.14
					19.5	3.20	1.89	3.75	0.10
					22.5	2.54	1.47	9.70	0.34
3a	Izq.	35.0	56.0	Carpeta asfáltica existente 33	6.5	2.90	1.21	5.58	0.88
				Capas inferiores 300	11.0	3.39	1.91	2.92	0.09
					18.0	2.96	1.56	5.15	0.25
					19.5	3.06	1.69	4.48	0.17
					22.5	2.73	1.30	7.17	0.61
4a	Izq.	56.0	71.0	Carpeta asfáltica existente 32	6.5	2.03	1.08	24.60	1.54
				Capas inferiores 300	11.0	2.68	1.70	7.85	0.16
					18.0	2.30	1.38	70	0.46
					19.5	2.46	1.50	11.10	0.30
					22.5	2.02	1.16	25.30	1.08
5a	Izq.	71.0	75.0	Carpeta asfáltica existente 40	6.5	2.82	1.11	6.29	1.37
				Capas inferiores 300	11.0	3.21	1.79	3.67	0.13
					18.0	2.98	1.46	5.03	0.35
					19.5	3.09	1.60	4.29	0.22
					22.5	2.78	1.25	6.67	0.77
6a	Izq.	75.0	88.0	Carpeta asfáltica existente 25	6.5	2.59	1.28	8.95	0.67
				Capas inferiores 300	11.0	3.44	2.09	2.75	0.06
					18.0	2.91	1.71	5.55	0.16
					19.5	2.86	1.99	5.96	0.07
					22.5	2.58	1.43	9.20	0.39
7a	Izq.	88.0	106.0	Carpeta asfáltica existente 25	6.5	2.54	1.19	9.80	0.98
				Capas inferiores 300	11.0	3.48	2.06	2.62	0.06
					18.0	2.94	1.70	5.27	0.16
					19.5	3.17	1.84	3.89	0.11
					22.5	2.52	1.41	10.10	0.42
8a	Izq.	106.0	116.3	Carpeta asfáltica existente 18	6.5	1.94	1.60	27.40	0.22
				Capas inferiores 300	11.0	2.15	2.23	18.00	0.04
					18.0	1.91	1.98	29.50	0.08
					19.5	2.01	2.16	23.70	0.05
					22.5	1.79	1.53	38.70	0.28
9a	Izq.	116.3	120.9	Carpeta asfáltica existente 12	6.5	1.71	0.75	50.30	9.76
				Base hidráulica 12	11.0	2.09	1.31	22.10	0.59
				Capas inferiores 300	18.0	11.00	1.07	0.02	1.63
					19.5	2.35	1.16	13.40	1.07
					22.5	9.22	0.90	0.05	4.00

10a	Izq.	120.9	125.4	Carpeta asfáltica existente*	119	6.5	4.00	1.54	1.47	0.27
				Capas inferiores	300	11.0	4.48	2.09	0.92	0.06
						18.0	4.03	1.50	1.43	0.30
						19.5	4.21	1.83	1.18	0.11
						22.5	3.71	1.82	2.01	0.12
11a	Izq.	125.4	128.4	Carpeta asfáltica existente	7	6.5	6.40	1.54	0.21	0.27
				Base hidráulica	13	11.0	7.69	1.62	0.10	0.20
				Capas inferiores	300	18.0	6.52	1.33	0.19	0.56
						19.5	6.77	1.44	0.17	0.37
						22.5	5.23	1.11	0.48	1.38
12a	Izq.	128.4	134.2	Carpeta asfáltica existente	20	6.5	2.69	1.26	7.72	0.74
				Capas inferiores	300	11.0	3.69	2.18	2.07	0.05
						18.0	3.12	1.80	4.15	0.12
						19.5	3.35	1.95	3.07	0.08
						22.5	2.67	1.49	7.96	0.31
13a	Izq.	134.2	146.0	Carpeta asfáltica existente*	21	6.5	2.40	1.15	12.30	1.12
				Capas inferiores	300	11.0	3.40	2.06	2.89	0.06
						18.0	2.87	1.68	5.86	0.17
						19.5	3.06	1.81	4.50	0.12
						22.5	2.43	1.40	11.70	0.42
14a	Izq.	146.0	151.0	Carpeta asfáltica existente	20	6.5	3.10	1.25	4.27	0.76
				Capas inferiores	300	11.0	3.86	2.26	1.70	0.04
						18.0	3.29	1.85	3.33	0.11
						19.5	3.53	1.99	2.48	0.07
						22.5	3.07	1.54	4.42	0.27
15a	Izq.	151.0	162.6	Carpeta asfáltica existente	19	6.5	2.69	1.32	7.62	0.57
				Capas inferiores	300	11.0	3.63	2.21	2.20	0.04
						18.0	3.03	1.80	4.67	0.12
						19.5	3.30	1.95	3.29	0.08
						22.5	2.67	1.52	7.91	0.29

\* Sobrecarpeta con conchuela colocada sobre pavimento agrietado

Tabla E.13 Vida remanente para la condición actual. Caso 2

Zona	Carril	Subtramo		Espesor de Capa (cm)		Vida Esperada (años)
		Del km	Al km			
1	Der.	30.0	32	Carpeta asfáltica existente	46	6.20
				Capas inferiores	300	
2.	Der	32.0	35.0	Carpeta asfáltica existente	40	3.92
				Capas inferiores	300	
3	Der.	35.0	56.0	Carpeta asfáltica existente	33	4.46
				Capas inferiores	300	
4	Der.	56.0	71.0	Carpeta asfáltica existente	31	5.17
				Capas inferiores	300	
5	Der.	71.0	75.0	Carpeta asfáltica existente	40	4.20
				Capas inferiores	300	

6	Der.	75.0	88.0	Carpeta asfáltica existente	25	4.00
				Capas inferiores	300	
7	Der.	88.0	106.0	Carpeta asfáltica existente	24	4.35
				Capas inferiores	300	
8	Der.	106.0	116.3	Carpeta asfáltica existente	19	2.80
				Capas inferiores	300	
9	Der.	116.3	120.9	Carpeta asfáltica existente	11	6.20
				Base hidráulica	12	
				Capas inferiores	300	
10	Der.	120.9	125.4	Carpeta asfáltica existente*	18	3.92
				Capas inferiores	300	
11	Der.	125.4	128.4	Carpeta asfáltica existente	6	4.46
				Base hidráulica	13	
				Capas inferiores	300	
12	Der.	128.4	134.2	Carpeta asfáltica existente	19	5.17
				Capas inferiores	300	
13	Der.	134.2	146.0	Carpeta asfáltica existente*	19	4.20
				Capas inferiores	300	
14	Der.	146.0	151.0	Carpeta asfáltica existente	22	4.00
				Capas inferiores	300	
15	Der.	151.0	162.6	Carpeta asfáltica existente	16	4.35
				Capas inferiores	300	
1a	Izq.	30.0	32.0	Carpeta asfáltica existente	50	5.95
				(CON ACOTAMIENTOS)	300	
2a	Izq.	32.0	35.0	Carpeta asfáltica existente	36	3.8
				Capas inferiores	300	
3a	Izq.	35.0	56.0	Carpeta asfáltica existente	33	4.50
				Capas inferiores	300	
4a	Izq.	56.0	71.0	Carpeta asfáltica existente	32	5.03
				Capas inferiores	300	
5a	Izq.	71.0	75.0	Carpeta asfáltica existente	40	3.98
				Capas inferiores	300	
6a	Izq.	75.0	88.0	Carpeta asfáltica existente	25	3.80
				Capas inferiores	300	
7a	Izq.	88.0	106.0	Carpeta asfáltica existente	25	4.50
				Capas inferiores	300	
8a	Izq.	106.0	116.3	Carpeta asfáltica existente	18	2.55
				Capas inferiores	300	
9a	Izq.	116.3	120.9	Carpeta asfáltica existente	12	5.10
				Base hidráulica	12	
				Capas inferiores	300	
10a	Izq.	120.9	125.4	Carpeta asfáltica existente*	19	4.00
				Capas inferiores	300	

11a	Izq.	125.4	128.4	Carpeta asfáltica existente	7	5.05
				Base hidráulica	13	
				Capas inferiores	300	
LIB. SN. ANTONIO						
12a	Izq.	128.4	134.2	Carpeta asfáltica existente	20	3.50
				Capas inferiores	300	
13a	Izq.	134.2	146.0	Carpeta asfáltica existente*	21	4.60
				Capas inferiores	300	
14a	Izq.	146.0	151.0	Carpeta asfáltica existente	20	3.10
				Capas inferiores	300	
15a	Izq.	151.0	162.6	Carpeta asfáltica existente	19	3.30
				Capas inferiores	300	

\* Sobrecarpeta con conchuela colocada sobre pavimento agrietado

### E.3.4 Comportamiento futuro del pavimento

De acuerdo con la sugerencia del último comentario, para alargar la vida del pavimento bajo las condiciones futuras conviene analizar la siguiente propuesta de reforzamiento:

En el tramo 1, comprendido entre el km 30 y el 106, se proponen 5 cm de carpeta asfáltica nueva, para renivelar y absorber deficiencias superficiales, principalmente. El III se mejora sólo con desbastado previo; para el tramo 2, del km 106 al 163 también se proponen 5 cm de carpeta asfáltica nueva, pero colocada sobre 25 cm de una base con emulsión asfáltica, previo corte y recuperación del pavimento agrietado, excepto en los libramientos; Nuevo Progreso (km 116.25 a 120.9) y San Antonio (km 125.4 al 128.4). Con esta propuesta de reforzamiento, la estructura quedaría en la forma mostrada en la Tabla E.14.

Tabla E.14 Estructura propuesta para la condición futura. Caso 2

Zona	Subtramo		Espesor de Capa (cm)	Propiedades Mecánicas		
	Del km	Al km		Módulo Elástico (E) (kg/cm <sup>2</sup> )	Relación de Poisson ( $\mu$ )	
1	30.0	106.0	Carpeta asfáltica nueva	5	35,000	0.35
			Carpeta asfáltica existente	30	5,000	0.35
			Capas inferiores	300	1,500	0.45
2	106.0	162.6 (EXCEPTO LIBRAMIENTOS)	Carpeta asfáltica nueva	5	35,000	0.35
			Base recuperada con emulsión	25	20,000	0.35
			Capas inferiores	300	1,500	0.45
3	116.3	120.9  LIB. NVO. PROGRESO	Carpeta asfáltica nueva	5	35,000	0.35
			Carpeta asfáltica existente	11	14,836	0.35
			Base hidráulica	12	2,841	0.40
			Capas inferiores	300	1,744	0.45

4	125.4	128.4	LIB. SN. ANTONIO	Carpeta asfáltica nueva	5	35,000	0.35
				Carpeta asfáltica existente	6	18,782	0.35
				Base hidráulica	13	2,428	0.40
				Capas inferiores	300	1,255	0.45

Los resultados de la simulación del funcionamiento del pavimento se presentan en las Tablas E.15 y E.16. De aquí se pueden hacer los siguientes comentarios:

### Comentarios

- La vida esperada para la condición futura del pavimento resultó de 9 a 14 años para todo el tramo.
- Para fines prácticos, se puede establecer que con el refuerzo propuesto al pavimento (condición futura) y con los trabajos normales de conservación, puede seguir operando el tramo por lo menos 10 años más. Esta vida puede aumentar a 15 años, aproximadamente, cuando se tengan operando 4 carriles de circulación.

Tabla E.15 Resultados obtenidos para la condición futura mediante el MEF. Caso 2

Zona	Subtramo (km)		Espesor de Capa (cm)	Carga por eje (t)	Deformación Unitaria		Ciclos de falla (N <sub>i</sub> )		
					Compresión	Tensión	Por	Por	
					1x10 <sup>-4</sup> (m/m)	1x10 <sup>-4</sup> (m/m)	Compresión 1 x 10 <sup>7</sup>	Tensión 1 x 10 <sup>7</sup>	
1	30.0	106.0	Carpeta asfáltica nueva	5	6.5	2.33	1.02	00	2.12
			Carpeta asfáltica existente	30	11.0	2.65	1.66	8.13	0.18
			Capas inferiores	300	18.0	2.47	1.46	10.90	0.34
					19.5	2.40	1.35	12.30	0.51
					22.5	2.24	1.14	16.50	1.21
2	106.0	162.6 (EXCEPTO LIBRAMIENTOS)	Carpeta asfáltica nueva	5	6.5	2.54	0.88	9.75	4.25
			Base recuperada con emulsión	25	11.0	2.87	1.50	5.83	0.31
			Capas inferiores	300	18.0	2.61	1.22	8.75	0.86
					19.5	2.70	1.32	7.61	0.58
					22.5	2.41	1.01	12.20	2.17
3	116.3	120.9 LIB. NVO. PROGRESO	Carpeta asfáltica nueva	5	6.5	1.79	0.74	41.80	10.50
			Carpeta asfáltica existente	11	11.0	2.04	1.14	24.50	1.22
			Base hidráulica	12	18.0	2.04	2.19	24.50	0.05
			Capas inferiores	300	19.5	2.04	1.09	24.50	1.49
					22.5	1.53	0.84	80.50	5.49
4	125.4	128.4 LIB. S. ANTONIO	Carpeta asfáltica nueva	5	6.5	2.01	1.02	25.80	2.11
			Carpeta asfáltica existente	6	11.0	2.65	1.64	8.21	0.19
			Base hidráulica	13	18.0	2.16	1.32	19.30	0.57
			Capas inferiores	300	19.5	2.26	1.38	15.80	0.47
					22.5	1.89	1.11	33.20	1.38

Tabla E.16 *Vida esperada para la condición futura. Caso 2*

Zona	Subtramo		Espesor de Capa (cm)	Vida Esperada (años)	
	Del km	Al km			
1	30.0	106.0	Carpeta asfáltica nueva	5	9.06
			Carpeta asfáltica existente	30	
			Capas inferiores	300	
2	106.0	162.6 (EXCEPTO LIBRAMIENTOS)	Carpeta asfáltica nueva	5	13.60
			Base recuperada con emulsión	25	
			Capas inferiores	300	
3	116.3	120.9  LIB. NVO. PROGRESO	Carpeta asfáltica nueva	5	10.15
			Carpeta asfáltica existente	11	
			Base hidráulica	12	
			Capas inferiores	300	
4	125.4	128.4  LIB. S. ANTONIO	Carpeta asfáltica nueva	5	9.80
			Carpeta asfáltica existente	6	
			Base hidráulica	13	
			Capas inferiores	300	

## E.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### E.4.1 Conclusiones

Primera Desde el punto de vista del tránsito vehicular, el tramo puede dividirse en 2 zonas características, a saber:

ZONA	UBICACIÓN km (Aprox.)	NÚMERO DE CARRILES		TRÁNSITO DIARIO PROMEDIO ANUAL	
		ACTUAL	FUTURO	ACTUAL	FUTURO *
1	30 a 75	2	2**	4,754	2,377
2	75 a 163			2,640	1,320

\* Carril de proyecto. Incremento anual de 4 %

\*\* Cuando existan 4 carriles (dos cuerpos separados o uno solo), el TDPA de proyecto por carril deberá reducirse en 65 %. Si se omite esta corrección se está del lado de la seguridad, puesto que la vida esperada del pavimento aumentaría en 50 % aproximadamente

Segunda Existen dos subtramos bien definidos en cuanto a las características del pavimento, a saber:

- a) Del km 30 al 106, aproximadamente, la carpeta está constituida principalmente por una mezcla de arena con asfalto, que actualmente muestra pocos defectos superficiales en cuanto a agrietamiento "piel de cocodrilo" o grietas de reflexión, no obstante que carecen de base hidráulica. La carpeta está apoyada directamente sobre los materiales areno-limosos (SM) típicos, con buenas

características de calidad. Cabe mencionar que, a una distancia razonable, en la zona no se encuentran materiales granulares con características adecuadas para base hidráulica.

- b) Del km 106 al 130, aproximadamente, la carpeta está formada con material pétreo constituido por arena y conchuela y, en general, se presentan defectos superficiales, principalmente el agrietamiento por reflexión de grietas que ya existían en la capa asfáltica inferior (por fatiga), excepto en los libramientos.

Tercera Para las condiciones actuales de tránsito y conservación del tramo, en general los dos subtramos tienen relativamente de regulares a buenas características de capacidad de carga en las capas del pavimento (evaluación estructural), así como en la irregularidad superficial y profundidad de rodera (evaluación superficial), lo cual da como resultado una vida útil residual de 4 años aproximadamente.

### **E.4.2 Recomendaciones**

Primera Puesto que las grietas de reflexión continuarán propagándose en las capas nuevas que se coloquen en el subtramo del km 106 en adelante, una forma de evitar este fenómeno es construir una base asfáltica con emulsión, previo corte y recuperación del pavimento agrietado (carpeta y parte de material arenoso), para formar una capa firme, homogénea y continua que pueda apoyar a la nueva capa de rodamiento (carpeta).

Segunda De acuerdo con el proyecto de modernización propuesto por la DGCF de la SCT y en consonancia con lo descrito en las conclusiones y la recomendación anterior, conviene reforzar la estructura del pavimento para aumentar su vida, mediante la colocación de las siguientes capas adicionales (previa preparación de la superficie actual):

SUB-TRAMO	UBICACIÓN km Aproximadamente	ESPESOR (cm)	
		Carpeta asfáltica	Base asfáltica con emulsión *
1	30 a 106	5	-
2	106 a 163		25

\* Previo corte y recuperación del pavimento agrietado, excepto en los libramientos Nuevo Progreso y San Antonio donde únicamente se colocaría la carpeta asfáltica.

Tercera Para alcanzar una vida mínima de 15 años en la condición futura (cuando se tengan operando 4 carriles de circulación), durante la construcción es muy importante asegurar los niveles de calidad establecidos en el proyecto, con la implantación de un sistema ágil y oportuno para la verificación y certificación que deberán exigir respectivamente los responsables de la supervisión y el control de calidad.

**CASO 3: Acayucan – Lím. Edo. de Ver/Oax (Coatzacoalcos – Salina Cruz; RVO y Cía., 2001b).**

**E.1 EVALUACIÓN SUPERFICIAL (Plano 5)**

**E.1.1 Índice de Irregularidad Internacional (III)**

- En ambos carriles, los valores del III son inferiores a 3.5 mm/m, según la gráfica de tendencias (forma polinómica). Estos valores son aceptables, pero conviene reducir su nivel a 2.5 mm/m. Los valores menores corresponden aproximadamente a la zona con *base asfáltica* (km 120 a 126.9) y a algunas aisladas donde hay base estabilizada con cemento Portland.
- En ambos carriles, los valores del III para la rodada derecha, predominantemente son menores en todo el tramo.
- Desde el punto de vista de la evaluación superficial, para reducir las variaciones del III (2.5 mm/m, máximo) y aumentar exclusivamente la comodidad y seguridad del usuario, lo más conveniente es colocar una sobrecarpeta de 5 cm en todo el tramo, de preferencia con un fresado o desbastado previo para optimizar resultados, pero es costoso; por otro lado, esto requiere también de los resultados de la evaluación estructural.

**E.1.2 Profundidad de rodera**

- En la rodada derecha del carril derecho, la profundidad media de rodera es inferior a 2.5 mm (forma polinómica); en cambio, en la rodada izquierda, se presentan valores hasta de 5 mm en la zona donde la carpeta asfáltica está sobre la base asfáltica (km 120 a 126.9).
- Los comentarios anteriores se hacen extensivos al caso del carril izquierdo, pero en menor cuantía. Las tendencias observadas en la forma polinómica acusan valores inferiores a 2.5 mm.
- Lo expresado en los comentarios anteriores son congruentes con las observaciones efectuadas durante el levantamiento de deterioro del pavimento, indicado a continuación:

**E.1.3 Levantamiento de deterioro**

- En general, se considera que la superficie de rodamiento de ambos carriles está en buenas condiciones. En algunas zonas aisladas, existen baches abiertos o reparados, así como defectos tipo desgaste o erosión, textura lisa, exudación de asfalto y agrietamiento tipo "piel de cocodrilo".
- En el carril derecho, se encontraron también depresiones por asentamientos causados por inestabilidad de taludes en el terraplén.

## E.2 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL (Plano 6)

### E.2.1 Medición de desplazamientos verticales

Los resultados de la medición de los desplazamientos verticales se pueden observar en el Plano 6, donde se gráfica el cadenamiento (eje horizontal) y el desplazamiento vertical registrado por cada sensor (eje vertical). Cada una de estas gráficas tiene el registro de 7 sensores ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$ ,  $S_5$ ,  $S_6$  y  $S_7$ ); para cada cadenamiento se obtiene el perfil de la cuenca de desplazamientos verticales.

- Para ambos carriles, en la zona de carpeta sobre base asfáltica (km 120 a 126.9) se detectaron los máximos desplazamientos verticales, hasta de 0.75 mm (forma polinómica) en el sensor bajo la carga ( $S_1$ ). En cambio, en las zonas de carpeta asfáltica sobre base estabilizada con cemento Portland (km 112 a 120 y 126.9 a 139.96), los desplazamientos verticales tienen valores menores, en su gran mayoría inferiores a 0.5 mm (forma polinómica).
- Se juzga que la capacidad de carga es buena en la zona de base estabilizada con cemento Portland y regular a buena en la zona con base asfáltica, lo cual refleja que el tramo está cumpliendo su misión para las condiciones actuales de tránsito y conservación, pero quizás requiera de reforzamiento para las condiciones futuras.

### E.2.2 Índice Estructural del pavimento ( $I_e$ )

En el Plano 6 se presenta el  $I_e$  correspondiente a cada punto de medición, así como el valor medio ( $\bar{I}_e$ ) para cada tramo. También se indica la Calificación Estructural ( $C_e$ ) equivalente.

- El  $\bar{I}_e$  en el tramo del km 112 al 120 es de 0.131 y 0.129; del km 120 al 127 el valor es de 0.180 y 0.203 (carril derecho e izquierdo, respectivamente); del km 127 al 140 es de 0.131 y 0.128 (carril derecho e izquierdo, respectivamente). Es importante señalar que las zonas donde se tiene base estabilizada con cemento Portland (tramo del km 112 al 120 y del km 127 al 140), el  $\bar{I}_e$  es bajo, lo cual es indicativo de una buena capacidad estructural.
- Se considera que para mejorar el  $I_e$  es recomendable colocar una capa de concreto asfáltico de 5 cm de espesor.

### E.2.3 Módulos elásticos de las capas

En el Plano 7 se presentan gráficamente los módulos elásticos resultantes para la carpeta asfáltica, así como los correspondientes a las demás capas de apoyo (base, sub-base e

inferiores). Esta información se acepta como representativa de la condición actual en las capas del pavimento y servirá de apoyo en la simulación estructural para el refuerzo o la rehabilitación del pavimento.

Para llegar a los resultados anteriormente descritos, que fueran congruentes con la realidad, se efectuaron varias combinaciones de mecanismos teóricos relativos al comportamiento de las capas constitutivas. Entre éstos están las siguientes combinaciones:

- a) Carpeta asfáltica, base granular o asfáltica, sub-base granular y capas inferiores convencionales
- b) Carpeta asfáltica + base asfáltica, base granular, sub-base rigidizada con cemento Portland y capas inferiores convencionales
- c) Carpeta asfáltica, base granular o asfáltica, sub-base rigidizada con cemento Portland y capas inferiores convencionales

La combinación b) resultó ser la más realista, por lo que fue adoptada como la más representativa del caso en cuestión.

Los comentarios más sobresalientes se presentan a continuación:

- Aproximadamente del km 112 al 120 y del 126.9 al 139.96, en ambos carriles, el módulo elástico de la carpeta + base asfáltica resultó con valores mayores ( $40,000$  a  $87,000 \text{ kg/cm}^2$ ) en la forma polinómica, que en el subtramo del km 120 al 126.9, donde los valores resultaron menores ( $37,000$  a  $55,000 \text{ kg/cm}^2$ ).
- En ambos carriles, los módulos elásticos para la capa de base estabilizada con cemento Portland fluctuaron, a grandes rasgos, entre  $1,500$  y  $5,000 \text{ kg/cm}^2$  (forma polinómica).
- En las diferentes capas, se considera que se deben asignar módulos elásticos que representen las condiciones del comportamiento del pavimento, tanto actual como futuro, tomando en cuenta toda la información y comentarios obtenidos de las evaluaciones superficial y estructural, más la experiencia que al respecto se tiene en otros casos similares.

### **E.3 SIMULACIÓN ESTRUCTURAL**

#### ***E.3.1 Estado actual del pavimento***

Para las condiciones actuales, se consideraron los espesores y las propiedades mecánicas de las capas de la Tabla E.17, así como el TDPA de las Tablas E.18 y E.19.

*Tabla E.17 Estructura para la condición actual. Caso 3*

Zona	Carril	Subtramo Del km      Al km		Espesor de Capa (cm)	Propiedades Mecánicas		
					Módulo Elástico (kg/cm <sup>2</sup> )	Relación de Poisson ( $\mu$ )	
1	Ambos	112.0	120.0	Carpeta asfáltica existente	7	74,198	0.35
				Base estabilizada **	12	3,959	0.40
				Sub base rigidizada **	30	4,940	0.35
				Capas inferiores	300	1,827	0.45
2	Ambos	120.0	126.9	Carpeta asfáltica existente		31,287	0.35
				Base asfáltica	10		
				Sub base rigidizada **	30	4,318	0.35
				Capas inferiores	300	1,643	0.45
3	Ambos	126.9	139.9	Carpeta asfáltica existente	7	72,135	0.35
				Base estabilizada **	12	3,686	0.40
				Sub base rigidizada **	30	5,251	0.35
				Capas inferiores	300	2,097	0.45

\*\* Con cemento Portland

### E.3.2 Análisis del tránsito

#### a) Condición actual

A partir de la información básica proporcionada por el Centro SCT de Veracruz, se consideraron los siguientes datos del tránsito diario promedio anual (TDPA) para el tramo estudiado:

*Tabla E.18 TDPA para la condición actual. Caso 3*

UBICACIÓN km	TDPA	DISTRIBUCIÓN VEHICULAR (%)		
		A (Automóvil)	B (Autobús)	C (Camión)
112 al 140	4,200	73.5	8	18.5

#### b) Condición futura

La tasa de crecimiento vehicular se consideró de 3 % anual.

De acuerdo con la clasificación del tránsito por tipo de vehículo, también se tomó el camión como el que más afecta las condiciones superficial y estructural del pavimento. Igualmente se consideró el siguiente TDPA de proyecto, para 2 carriles de circulación:  $4,200 \times 0.5 = 2,100$ .

Tabla E.19 TDPA para el carril de proyecto. Caso 3

UBICACIÓN km	NÚMERO CARRILES	TDPA DE PROYECTO POR CARRIL							SUMA *
		A	B2	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R2	
112 a 140	2	1,543	168	162	61	50	74	42	2,100

\* Clasificación SCT

### E.3.3 Comportamiento actual del pavimento

De acuerdo con lo expresado en el inciso 1, se efectuó la simulación del comportamiento del pavimento, según se presenta en las Tablas E.14 y E.15, a partir de las cuales se llega a los siguientes comentarios:

#### Comentarios

- La vida esperada para la condición actual del pavimento resultó de 6 a 7 años para el tramo estudiado.
- Para fines prácticos, se puede establecer que en la condición actual y con los trabajos de conservación normal, el tramo puede seguir operando satisfactoriamente otros 5 años más.

Tabla E.20 Resultados obtenidos para la condición actual mediante el MEF. Caso 3

Zona	Carril	Subtramo (km)		Espesor de Capa (cm)	Carga por eje (t)	Deformación Unitaria		Ciclos de falla (N <sub>f</sub> )	
		Del	Al			Compresión $1 \times 10^{-4}$ (m/m)	Tensión $1 \times 10^{-4}$ (m/m)	Por Compresión $1 \times 10^7$	Por Tensión $1 \times 10^7$
1	Ambos	112.0	120.0	Carpeta asfáltica 7	6.5	1.52	0.17	82.60	162.00
				Base estabilizada ** 12	11.0	1.38	0.14	123.00	381.00
				Sub base rigidizada ** 30	18.0	5.66	0.94	0.35	3.12
				Capas inferiores 300	19.5	6.09	1.02	0.26	2.09
					22.5	4.82	0.78	0.67	7.80
2	Ambos	120.0	126.9	Carpeta asfáltica 7	6.5	1.65	0.19	58.90	1.04
				Base asfáltica 10	11.0	1.50	0.16	86.40	241.00
				Sub base rigidizada ** 30	18.0	5.94	1.04	0.28	1.93
				Capas inferiores 300	19.5	6.38	1.12	0.21	1.28
					22.5	5.09	0.86	0.54	4.76
3	Ambos	126.9	139.9	Carpeta asfáltica 7	6.5	1.49	0.11	91.20	146.00
				Base estabilizada ** 12	11.0	1.37	0.14	127.00	447.00
				Sub base rigidizada ** 30	18.0	5.71	0.61	0.33	27.60
				Capas inferiores 300	19.5	6.12	0.98	0.25	2.53
					22.5	4.83	0.76	0.67	9.07

\*\* Con cemento Portland

*Tabla E.21 Vida remanente para la condición actual. Caso 3*

Zona	Carril	Subtramo		Espesor de Capa (cm)	Vida Esperada (años)
		Del km	Al km		
1	Ambos	112.0	120.0	Carpeta asfáltica existente	7
				Base estabilizada **	12
				Sub base rigidizada**	30
				Capas inferiores	300
2	Ambos	120.0	126.9	Carpeta asfáltica existente	7
				Base asfáltica	10
				Sub base rigidizada**	30
				Capas inferiores	300
3	Ambos	126.9	139.9	Carpeta asfáltica existente	7
				Base estabilizada **	12
				Sub base rigidizada**	30
				Capas inferiores	300

\*\* Con cemento Portland

### E.3.4 Comportamiento futuro del pavimento

Para alargar la vida del pavimento bajo las condiciones futuras, conviene tomar en cuenta la propuesta de reforzamiento indicada a continuación.

En el tramo que comprende del km 112 al 140 se proponen 5 cm de carpeta asfáltica nueva, para renivelar y absorber deficiencias superficiales, principalmente. El III se mejora mucho con un desbastado previo, si se desea.

La estructura del pavimento con las recomendaciones anteriores se presenta en la Tabla E.22.

*Tabla E.22 Estructura propuesta para la condición futura. Caso 3*

Zona	Subtramo		Espesor de Capa (cm)	Propiedades Mecánicas		
	Del km	Al km		Módulo Elástico (E) (kg/cm <sup>2</sup> )	Relación de Poisson ( $\mu$ )	
1	112	120	Carpeta asfáltica nueva	5	35,000	0.35
			Carpeta asfáltica existente	7	74,198	0.35
			Base estabilizada **	12	3,959	0.40
			Sub base rigidizada**	30	4,940	0.35
			Capas inferiores	300	1,827	0.45
2	120.0	126.9	Carpeta asfáltica nueva	5	35,000	0.35
			Carpeta asfáltica existente	7	31,287	0.35
			Base asfáltica	10		0.35
			Sub base rigidizada**	30	4,318	0.35
			Capas inferiores	300	1,643	0.45

3	126.9	139.9	Carpeta asfáltica nueva	5	35,000	0.35
			Carpeta asfáltica existente	7	72,135	0.35
			Base estabilizada **	12	3,686	0.40
			Sub base rigidizada**	30	5,251	0.35
			Capas inferiores	300	2,097	0.45

\*\* Con cemento Portland

Siguiendo lo indicado en el inciso anterior, se realizó la simulación del funcionamiento del pavimento. Los resultados se presentan en las Tablas E.23 y E.24, de las cuales se desprenden los siguientes comentarios:

### Comentarios

- La vida esperada para la condición futura del pavimento resultó de 9 a 11 años para todo el tramo.
- Para fines prácticos, se puede establecer que con el refuerzo propuesto al pavimento (condición futura) y con los trabajos normales de conservación, el tramo puede seguir operando satisfactoriamente por lo menos 10 años más.

Tabla E.23 Resultados obtenidos para la condición futura mediante el MEF. Caso 3

Zona	Subtramo (km)		Espesor de Capa (cm)	Carga por eje (t)	Deformación Unitaria		Ciclos de falla (N)		
	Del	Al			Compresión $1 \times 10^{-4}$ (m/m)	Tensión $1 \times 10^{-4}$ (m/m)	Por Compresión $1 \times 10^7$	Por Tensión $1 \times 10^7$	
1	112.0	120.0	Carpeta asfáltica nueva	5	6.5	1.39	0.16	119.00	243.00
			Carpeta asfáltica existente	7	11.0	1.27	0.13	175.00	553.00
			Base estabilizada **	12	18.0	5.02	0.87	0.57	4.62
			Sub base rigidizada**	30	19.5	5.40	0.94	0.42	3.10
			Capas inferiores	300	22.5	4.29	0.70	1.10	11.08
2	120.0	126.9	Carpeta asfáltica nueva	5	6.5	1.50	0.17	88.70	168.00
			Carpeta asfáltica existente	7	11.0	1.37	0.14	129.00	384.00
			Base asfáltica	10	18.0	5.63	0.94	0.47	3.21
			Sub base rigidizada**	30	19.5	5.26	1.01	0.35	2.15
			Capas inferiores	300	22.5	4.48	0.78	0.92	8.00
3	126.9	139.9	Carpeta asfáltica nueva	5	6.5	1.38	0.15	124.00	301.00
			Carpeta asfáltica existente	7	11.0	1.25	0.13	185.00	667.00
			Base estabilizada **	12	18.0	5.42	0.83	0.42	5.80
			Sub base rigidizada**	30	19.5	5.04	0.91	0.56	3.74
			Capas inferiores	300	22.5	4.30	0.70	1.09	13.90

\*\* Con cemento Portland

Tabla E.24 Vida esperada para la condición futura Caso 3

Zona	Subtramo		Espesor de Capa (cm)		Vida Esperada (años)
	Del km	Al km			
1	112.0	120.0	Carpeta asfáltica nueva	5	10.87
			Carpeta asfáltica existente	7	
			Base estabilizada **	12	
			Sub base rigidizada**	30	
			Capas inferiores	300	
2	120.0	126.9	Carpeta asfáltica nueva	5	9.38
			Carpeta asfáltica existente	7	
			Base asfáltica	10	
			Sub base rigidizada**	30	
			Capas inferiores	300	
3	126.9	139.9	Carpeta asfáltica nueva	5	10.14
			Carpeta asfáltica existente	7	
			Base estabilizada **	12	
			Sub base rigidizada**	30	
			Capas inferiores	300	

\*\* Con cemento Portland

## E.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### E.4.1 Conclusiones

Primera El tramo estudiado tiene buen comportamiento superficial, desde el punto de vista pavimento con Sección Invertida, debido en gran parte por la atención oportuna en los trabajos de conservación del Centro SCT (Ver.).

Segunda Con el enfoque estructural, el comportamiento del pavimento con Sección Invertida ha sido bastante satisfactorio, tomando en cuenta también el seguimiento que se ha tenido por parte del Centro SCT (Ver.).

Tercera Se identificaron 3 subtramos de comportamiento bien definido, con las siguientes características generales:

SUB-TRAMO	UBICACIÓN km (Aprox.)	ESPEORES REPRESENTATIVOS DE CAPA (cm)				
		CARPETA	BASE ASFÁLTICA	BASE ESTABILIZADA *	SUB-BASE RIGIDIZADA *	SUBRA-SANTE **
1	112 a 120	7	-	12	30	25
2	120 a 127		10	-		
3	127 a 140		-	12		

\* Con cemento Portland

\*\* Arcillosa o areno-arcillosa, sobre terracerías arcillosas

Cuarta Para las condiciones actuales de tránsito y conservación del tramo, se tienen características regulares a buenas de capacidad de carga en las capas del pavimento (evaluación estructural), así como valores aceptables en la irregularidad superficial y profundidad de roderas (evaluación superficial), lo cual da como resultado una vida útil residual estimada en 5 años.

#### **E.4.2 Recomendaciones**

Primera Con el fin de alcanzar una vida mínima de 10 años para la condición futura, se propone construir una carpeta de 5 cm sobre el pavimento actual que, además de servir para renivelar y absorber deficiencias superficiales, permite reforzar la estructura actual. Si se desea, con un desbastado previo se mejora mucho el III.

Segunda Se recomienda diseñar un experimento en un tramo real de prueba, con los controles de calidad estipulados durante su construcción, para correlacionar los resultados de la pruebas índice de laboratorio con las mediciones de campo a partir de equipos no destructivos y de pruebas *in situ*, más las triaxiales realizadas en muestras reconstituidas y también inalteradas, además de la instrumentación que sea requerida.

#### **CASO 4: Córdoba – Veracruz (México – Veracruz; RVO y Cía., 2001c).**

### **E.1 EVALUACIÓN SUPERFICIAL (Plano 7)**

#### **E.1.1 Índice de Irregularidad Internacional (III)**

- El cuerpo A presenta valores para el III de 3.6 mm/m (en promedio), con variaciones de 1.20 mm/m (mínimo) y 9.95 mm/m (máximo). El valor promedio es aceptable, pero es recomendable mejorar la condición actual para ofrecer más comodidad al usuario; esto se logra fresando y reponiendo la carpeta; sin embargo, para tomar una decisión definitiva en cuanto a la rehabilitación recomendada, se analizan conjuntamente los resultados de la evaluación estructural.
- El III medido en el cuerpo B presenta valores inferiores a los registrados en el cuerpo A. El valor promedio para el cuerpo B es de 2.86 mm/m. Esta variación puede ser debida a alguna fluctuación en el tránsito o bien a los diferentes tratamientos de conservación que se han dado a uno y otro cuerpo.

#### **E.1.2 Profundidad de rodera**

- En el cuerpo A es muy evidente la presencia de la base rigidizada con cemento Portland del km 0 al 4, ya que en este tramo no se detecta la presencia de roderas; en cambio en el tramo del km 4 al 14 se alcanzan valores superiores a 25 mm. Estos últimos resultados reflejan una deficiencia en la capacidad de carga de las capas inferiores, lo cual se confirma con la evaluación estructural.

- Las roderas que se registran en el cuerpo B presentan valores máximos de 21 mm, pero en general a lo largo de todo el tramo se presentan uniformemente valores promedio de 15 mm. En este cuerpo también los valores de las roderas reflejan una deficiencia en la capacidad estructural, aún con valores inferiores a los registrados en el cuerpo A.

### ***E.1.3 Levantamiento de deterioro***

- Los principales defectos observados corresponden al agrietamiento “piel de cocodrilo” y las roderas, ambos con severidad moderada.
- La ubicación de los defectos anteriormente señalados se presentan con uniformidad en los tramos estudiados, a excepción del cuerpo A, km 0 al 4, en donde la intensidad se reduce a una tercera parte. Esto refleja la presencia de la base estabilizada con cemento Portland.
- La infiltración de agua a través de fisuras existentes y baches que requieren reparación, es un factor que agrava la condición actual del pavimento, por lo que es necesario tomar medidas preventivas para reducir el incremento de humedad en las capas de apoyo a la carpeta. Esto induce a mayores deformaciones que se transmiten a la superficie de rodamiento.

## **E.2 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL (Plano 8)**

### ***E.2.1 Medición de desplazamientos verticales***

Los resultados de la medición de los desplazamientos verticales se pueden observar en el Plano 8, donde se grafica el cadenamiento (eje horizontal) y el desplazamiento vertical registrado por cada sensor (eje vertical). Cada una de estas gráficas tiene el registro de 7 sensores ( $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7$ ); para cada cadenamiento se obtiene el perfil de la cuenca de desplazamientos verticales.

Para el carril de baja velocidad (Plano 8), se puede establecer a grandes rasgos que existen dos zonas con diferente comportamiento estructural, a saber:

- En el cuerpo A (km 0 al 4), en general los desplazamientos verticales alcanzan un valor máximo de 1 mm para el sensor  $S_1$  (bajo la carga) y valores gradualmente menores en forma homogénea para los sensores  $S_2$  a  $S_7$  (a 1.8 m del  $S_1$ ). Esto refleja bien la respuesta del pavimento a su estructuración con una capa de base estabilizada (cemento Portland).
- En el cuerpo A (km 4 a 14) y en el cuerpo B (km 0 al 14 y otros), los desplazamientos verticales en general son superiores a 1 mm (dominando 1.5 mm)

para el sensor  $S_1$  (bajo la carga), con una separación amplia de valores con respecto al sensor  $S_2$  (a 30 cm del  $S_1$ ). Esto significa que hay una capa de baja capacidad estructural bajo la carpeta, como la base arenosa existente con baja trabazón (fricción interna) entre sus partículas.

### **E.2.2 Índice Estructural del pavimento ( $I_e$ )**

En el Plano 8 se presenta el  $I_e$  correspondiente a cada tramo estudiado, incluyendo el valor medio ( $\bar{I}_e$ ), así como la calificación Estructural ( $C_e$ ) equivalente. Se hace hincapié en lo siguiente:

- El  $\bar{I}_e$  en todo el tramo estudiado resultó de 0.337, a excepción de los primeros 4 a 6 km del cuerpo A en que mejora a 0.189. Hay algunas zonas aisladas que también tienen un bajo  $I_e$ . Esto indica que la capacidad estructural del pavimento requiere reforzarse para asegurar un  $I_e$  máximo de 0.2.
- En el caso de que el reforzamiento del pavimento se retrase fuera de lo razonable, el  $I_e$  puede incrementarse inesperadamente a valores inadmisibles en un lapso corto, con el consiguiente incremento en los costos de rehabilitación.
- Recuérdese que las condiciones de insuficiencia estructural del pavimento, en los carriles de baja velocidad, tiende a propagarse a los de alta velocidad por efecto del tránsito que se concentra en este carril, al tener mejor nivel de servicio (comodidad y seguridad).

### **E.2.3 Módulos elásticos de las capas**

En el Plano 8 se presentan gráficamente los módulos elásticos resultantes para la carpeta asfáltica, base, sub-base, sub-rasante y capas inferiores, con las siguientes consideraciones:

- a) Entre el km 0 y el 4 (Cuerpo A, carril de baja), en los cálculos para determinar los módulos de la carpeta asfáltica se consideraron 2 posibilidades en la capa subsecuente inferior:
  - Base arenosa estabilizada con cemento Portland como si estuviera rigidizada y
  - Granular (base arenosa sin estabilizar), con el fin de conocer el contraste de resultados para estas condiciones implícitas en el programa de cómputo (Anexo B).

Para fines prácticos, en todos los casos se adoptó como representativo el mecanismo de material granular para la base arenosa con o sin estabilizar, ya que en los sondeos se obtuvieron muestras que confirman esta aseveración, aún para el caso del tratamiento con cemento Portland.

- b) Entre el km 4 y el 14 (Cuerpo A, carril de baja), en los cálculos para determinar los módulos de la carpeta asfáltica se consideró la capa subsecuente inferior como

granular a la base arenosa sin estabilizar. Lo mismo se hizo, entre el km 0 y el 14 (Cuerpo B, carril de baja), así como para los otros tramos del mismo cuerpo.

- c) En todos los cálculos del módulo elástico de la base se consideró como granular a la base arenosa sin estabilizar.

### **Comentarios**

- En general, las variaciones en los módulos elásticos de la carpeta asfáltica se pueden deber a los siguientes factores:
  - a) Discontinuidad por agrietamientos
  - b) Heterogeneidad en las propiedades mecánicas logradas en su construcción
  - c) Presencia de zonas con rigidez variable en las capas de apoyo a la carpeta
- A grandes rasgos, los módulos elásticos para la base y sub-base tendieron a estar más bien cerca de los límites inferiores recomendados y, en general, resultaron más bajos que los de las capas inferiores. Esta condición refleja la baja trabazón entre sus partículas, fundamentalmente arenosas y con escaso confinamiento, lo cual se traduce en insuficiencia estructural principalmente de la capa de base.
- Se hace notar que durante las mediciones con el deformómetro de impacto (HWD) se detectó la presencia de agua bajo la superficie agrietada de la carpeta, con efecto de bombeo (agua y finos) bajo la acción del tránsito, lo cual tiene repercusión en el comportamiento adverso de la base.

## **E.3 SIMULACIÓN ESTRUCTURAL**

### ***E.3.1 Estado actual del pavimento***

El deterioro observado en el pavimento corresponde a agrietamientos y roderas en la carpeta asfáltica del carril de baja velocidad, característicos de los pavimentos fatigados por tránsito pesado e intenso, cuando tienen en su capa de base material con insuficiente capacidad estructural de carga.

Con base en el levantamiento del deterioro del pavimento, los sondeos permitieron determinar espesores y características de los materiales por capas, los módulos elásticos obtenidos a partir de la medición de desplazamientos verticales con el deformómetro de impacto (HWD), la información proporcionada como antecedentes por la Delegación Regional Zona VII Golfo de CAPUFE y lo observado en las visitas de inspección efectuadas a los tramos en cuestión, se ha determinado que el origen de los agrietamientos y las roderas presentes en la superficie de rodamiento, se debe a la condición de insuficiente capacidad estructural producto de la falta de fricción interna (trabazón) del material arenoso de la base; aunado al exceso de agua, que requeriría de un mayor grado de confinamiento para resistir las cargas impuestas por el tránsito de vehículos pesados.

La caracterización de los tramos estudiados para la condición actual del pavimento se presenta en la Tabla E.25. Los datos viales considerados para el análisis se presentan en las Tablas E.26 y E.27.

Tabla E.25 Estructura de la condición actual. Caso 4

TRAMO	CUERPO	SUBTRAMO		ESPESOR DE CAPA (cm)	PROPIEDADES MECÁNICAS		
		Del km	Al km		MÓDULO ELÁSTICO (E) (kg/cm <sup>2</sup> )	RELACIÓN DE POISSÓN ( $\mu$ )	
1	A	0.0	4.0	Carpeta asfáltica existente	10	78,300	0.35
				Base estabilizada existente	21	2,121	0.40
				Sub-base existente	38	1,595	0.40
				Capas inferiores	300	2,414	0.45
2	A	4.0	7.0	Carpeta asfáltica existente	10	46,406	0.35
				Base hidráulica existente	22	1,626	0.40
				Sub-base existente	38	1,526	0.40
				Capas inferiores	300	2,158	0.45
3	A	7.0	0	Carpeta asfáltica existente	11	27,503	0.35
				Base hidráulica existente	22	751	0.40
				Sub-base existente	26	673	0.40
				Capas inferiores	300	1,738	0.45
4	B	0.0	4.0	Carpeta asfáltica existente	11	31,015	0.35
				Base hidráulica existente	23	797	0.40
				Sub-base existente	18	744	0.40
				Capas inferiores	300	1,925	0.45
5	B	4.0	0	Carpeta asfáltica existente	13	23,702	0.35
				Base hidráulica existente	24	801	0.40
				Sub-base existente	24	760	0.40
				Capas inferiores	300	1,772	0.45
6	B	26.6	26.7	Carpeta asfáltica existente	11	21,800	0.35
				Base hidráulica existente	23	1,100	0.40
				Sub-base existente	21	1,100	0.40
				Capas inferiores	300	1,625	0.45
7	B	34.95	35.05	Carpeta asfáltica existente	12	16,060	0.35
				Base hidráulica existente	24	440	0.40
				Sub-base existente	20	377	0.40
				Capas inferiores	300	1,718	0.45
8	B	35.98	36.02	Carpeta asfáltica existente	10	29,533	0.35
				Base estabilizada existente	25	670	0.40
				Sub-base existente	20	407	0.40
				Capas inferiores	300	2,357	0.45
9	B	37.20	37.35	Carpeta asfáltica existente	13	15,933	0.35
				Base hidráulica existente	17	1,000	0.40
				Sub-base existente	22	1,000	0.40
				Capas inferiores	300	967	0.45

10	B	39.40	39.74	Carpeta asfáltica existente	12	23,660	0.35
				Base hidráulica existente	17	940	0.40
				Sub-base existente	15	920	0.40
				Capas inferiores	300	1,566	0.45
11	B	41.00	43.00	Carpeta asfáltica existente	12	20,947	0.35
				Base hidráulica existente	23	989	0.40
				Sub-base existente	25	905	0.40
				Capas inferiores	300	1,895	0.45

### E.3.2 Análisis del tránsito

#### a) Condición actual

A partir de la información vial de la zona en estudio (proporcionada por CAPUFE, Delegación Regional, Zona VII-Golfo), se consideraron los siguientes datos:

Tabla E.26 *TDPA para la condición actual. Caso 4*

TDPA	DISTRIBUCION VEHICULAR (%)		
	A (Automóvil)	B (Autobús)	C (Camión)
5,407	66.6	8	18.6

#### b) Condición futura

La tasa de crecimiento vehicular considerada se calculó y ajustó con base en la tendencia histórica, considerando el comportamiento desde 1994 a 2000, con lo cual se llegó a un valor de 3%.

De acuerdo con la clasificación del tránsito por tipo de vehículo se consideró al camión como el que más afecta las condiciones superficial y estructural del pavimento. También se consideró el siguiente TDPA de proyecto, tomando en cuenta el número de carriles por sentido.

Tabla E.27 *TDPA para el carril de proyecto. Caso 4*

TDPA DE PROYECTO POR CARRIL					
A	B2	C2	T3-S2	T3-S2-R2	SUMA *
1,081	241	118	130	52	1,622

\* Clasificación SCT

### E.3.3 Comportamiento actual del pavimento

Para este caso particular se presentó un dictamen sin la comparación de la vida residual en la condición actual, por tal motivo solamente se presentó la simulación del comportamiento futuro del pavimento.

La propuesta de rehabilitación es la siguiente:

Para mejorar las condiciones del pavimento se propuso como medida correctiva en el carril de baja velocidad de los tramos estudiados, cortar y recuperar una capa de 25 cm de espesor, la cual incluye 10 cm de carpeta y 15 cm de base hidráulica. Luego, estabilizar el material recuperado mediante la incorporación de emulsión asfáltica de rompimiento lento en una proporción aproximada de 70 lt/m<sup>3</sup> (sujeta a ajustes de laboratorio). Particularmente, en el tramo del km 0 al 4 del cuerpo A, la base estaba estabilizada con cemento Portland.

Posteriormente, sobre la base estabilizada con emulsión asfáltica tender una nueva carpeta asfáltica de 10 cm de espesor, fabricada y colocada bajo estricto control de calidad, tanto por lo que se refiere a los materiales utilizados, como en lo correspondiente a temperaturas, dosificaciones, compactaciones, geometría, etc.

Al modificar la estructura del carril de baja velocidad (por geometría y como refuerzo), se consideró la colocación de una sobrecarpeta en el carril de alta velocidad y los acotamientos. En la Tabla E.28, se presenta la estructura correspondiente a la propuesta de rehabilitación.

Tabla E.28 Estructura propuesta para la condición futura. Caso 4

CASO	CUERPO	SUBTRAMO		ESPESOR DE CAPA (cm)	PROPIEDADES MECÁNICAS		
					MÓDULO ELÁSTICO (E) (kg/cm <sup>2</sup> )	RELACIÓN DE POISSON ( $\mu$ )	
		Del km	Al km				
1	A	0.0	4.0	Carpeta asfáltica nueva	10	35,000	0.35
				Base estabilizada nueva***	25	20,000	0.35
				Base estabilizada existente**	6	2,121	0.40
				Sub base existente	38	1,595	0.40
				Capas inferiores	300	2,414	0.45
2	A	4.0	7.0	Carpeta asfáltica nueva	10	35,000	0.35
				Base estabilizada nueva***	25	20,000	0.35
				Base hidráulica existente	7	1,626	0.40
				Sub base existente	38	1,526	0.40
				Capas inferiores	300	2,158	0.45
3	A	7.0	14	Carpeta asfáltica nueva	10	35,000	0.35
				Base estabilizada nueva**	25	20,000	0.35
				Base hidráulica existente	8	751	0.40
				Sub base existente	26	673	0.40
				Capas inferiores	300	1,738	0.45

4	B	0.0	4.0	Carpeta asfáltica nueva	10	35,000	0.35
				Base estabilizada nueva***	25	20,000	0.35
				Base hidráulica existente	9	797	0.40
				Sub base existente	18	744	0.40
				Capas inferiores	300	1,925	0.45
5	B	4.0	14	Carpeta asfáltica nueva	10	35,000	0.35
				Base estabilizada nueva***	25	20,000	0.35
				Base hidráulica existente	12	801	0.40
				Sub base existente	24	760	0.40
				Capas inferiores	300	1,772	0.45
6	B	26.6	26.7	Carpeta asfáltica nueva	10	35,000	0.35
				Base estabilizada nueva***	25	20,000	0.35
				Base hidráulica existente	9	1,100	0.40
				Sub base existente	21	1,100	0.40
				Capas inferiores	300	1,625	0.45
7	B	34.95	35.05	Carpeta asfáltica nueva	10	35,000	0.35
				Base estabilizada nueva***	25	20,000	0.35
				Base hidráulica existente	11	440	0.40
				Sub base existente	20	377	0.40
				Capas inferiores	300	1,718	0.45
8	B	35.98	36.02	Carpeta asfáltica nueva	10	35,000	0.35
				Base estabilizada nueva***	25	20,000	0.35
				Base hidráulica existente	10	670	0.40
				Sub base existente	20	407	0.40
				Capas inferiores	300	2,357	0.45
9	B	37.20	37.35	Carpeta asfáltica nueva	10	35,000	0.35
				Base estabilizada nueva***	25	20,000	0.35
				Base hidráulica existente	5	1,000	0.40
				Sub base existente	22	1,000	0.40
				Capas inferiores	300	967	0.45
10	B	39.40	39.74	Carpeta asfáltica nueva	10	35,000	0.35
				Base estabilizada nueva***	25	20,000	0.35
				Base hidráulica existente	4	940	0.40
				Sub base existente	15	920	0.40
				Capas inferiores	300	1,566	0.45
11	B	41.00	43.00	Carpeta asfáltica nueva	10	35,000	0.35
				Base estabilizada nueva***	25	20,000	0.35
				Base hidráulica existente	10	989	0.40
				Sub base existente	25	905	0.40
				Capas inferiores	300	1,895	0.45

\*\* con cemento Portland  
 \*\*\* con emulsión asfáltica

### E.3.4 Comportamiento futuro del pavimento

De acuerdo con la propuesta de rehabilitación, se hace la simulación del funcionamiento del pavimento, presentando los resultados en las Tablas E.29 y E.30, de donde se comenta lo siguiente:

## Comentario

La vida esperada para la opción de rehabilitación propuesta resultó de 13 a 15 años, lo cual se considera suficiente para satisfacer los requerimientos futuros de la autopista.

Tabla E.29 Resultados obtenidos para la condición futura mediante el MEF. Caso 4

CASO	CUERPO	SUBTRAMO Del km Al km		ESPESOR DE CAPA (cm)	CARGA POR EJE (t)	DEFORMACIÓN UNITARIA		CICLOS A LA FALLA (N <sub>f</sub> )	
						COMPRESIÓN 1x10 <sup>-4</sup> (m/m)	TENSIÓN 1x10 <sup>-4</sup> (m/m)	POR COMPRESIÓN 1 x 10 <sup>7</sup>	POR TENSIÓN 1 x 10 <sup>7</sup>
1	A	0.0	4.0	Carpeta asfáltica nueva 10	6.5	2.31	0.82	20	6.18
				Base estabilizada nueva 25	11.0	3.29	1.29	3.31	0.65
				Base estabilizada existente 6	18.0	2.91	1.14	5.54	1.20
				Sub base existente 38	19.5	3.41	1.14	2.86	1.19
				Capas inferiores 300	22.5	2.56	0.88	9.48	4.25
2	A	4.0	7.0	Carpeta asfáltica nueva 10	6.5	2.34	0.83	13.70	5.95
				Base estabilizada nueva 25	11.0	3.32	1.30	3.21	0.62
				Base hidráulica existente 7	18.0	2.93	1.15	5.37	1.16
				Sub base existente 38	19.5	3.44	1.15	2.77	1.15
				Capas inferiores 300	22.5	2.58	0.89	9.19	4.09
3	A	7.0	0	Carpeta asfáltica nueva 10	6.5	1.46	0.32	28.00	27.00
				Base estabilizada nueva 25	11.0	3.37	1.37	2.97	0.47
				Base hidráulica existente 8	18.0	2.91	1.11	5.46	1.33
				Sub base existente 26	19.5	3.07	1.21	4.37	0.89
				Capas inferiores 300	22.5	2.62	0.92	8.57	3.37
4	B	0.0	4.0	Carpeta asfáltica nueva 10	6.5	3.31	0.76	3.25	8.82
				Base estabilizada nueva 25	11.0	4.82	1.30	0.67	6.17
				Base hidráulica existente 9	18.0	4.07	1.07	1.37	1.64
				Sub base existente 18	19.5	4.51	1.17	0.89	1.07
				Capas inferiores 300	22.5	3.47	0.89	2.66	4.02
5	B	4.0	0	Carpeta asfáltica nueva 10	6.5	3.36	0.68	3.04	15.40
				Base estabilizada nueva 25	11.0	4.73	1.21	0.73	0.89
				Base hidráulica existente 12	18.0	3.99	0.97	1.49	2.67
				Sub base existente 24	19.5	4.23	1.06	1.17	1.72
				Capas inferiores 300	22.5	3.48	1.27	2.63	0.70
6	B	26.6	26.7	Carpeta asfáltica nueva 10	6.5	2.00	0.78	26.40	7.89
				Base estabilizada nueva 25	11.0	2.82	1.34	6.31	0.54
				Base hidráulica existente 9	18.0	2.40	1.08	12.40	1.55
				Sub base existente 21	19.5	2.55	1.08	9.59	0.99
				Capas inferiores 300	22.5	2.10	0.92	21.50	3.58
7	B	34.95	35.05	Carpeta asfáltica nueva 10	6.5	2.04	0.80	24.60	7.23
				Base estabilizada nueva 25	11.0	2.87	1.36	5.87	0.49
				Base hidráulica existente 11	18.0	2.44	1.10	11.50	1.42
				Sub base existente 20	19.5	2.59	1.20	8.92	0.91
				Capas inferiores 300	22.5	2.14	0.93	20.00	3.28

8	B	35.98	36.02	Carpeta asfáltica nueva	10	6.5	2.03	0.79	24.60	7.24
				Base estabilizada nueva	25	11.0	2.87	1.36	5.87	0.49
				Base hidráulica existente	10	18.0	2.44	1.10	11.50	1.42
				Sub base existente	20	19.5	2.59	1.20	8.93	0.91
				Capas inferiores	300	22.5	2.14	0.93	20.10	3.29
9	B	37.20	37.35	Carpeta asfáltica nueva	10	6.5	2.03	0.79	25.00	7.40
				Base estabilizada nueva	25	11.0	2.86	1.36	5.98	0.50
				Base hidráulica existente	5	18.0	2.43	1.10	11.70	1.46
				Sub base existente	22	19.5	2.58	1.20	9.10	0.93
				Capas inferiores	300	22.5	2.13	0.93	20.40	3.36
10	B	39.40	39.74	Carpeta asfáltica nueva	10	6.5	2.01	0.78	25.80	7.69
				Base estabilizada nueva	25	11.0	2.83	1.33	6.18	0.52
				Base hidráulica existente	4	18.0	2.41	1.08	12.10	1.51
				Sub base existente	15	19.5	2.56	1.17	9.39	0.97
				Capas inferiores	300	22.5	2.11	0.91	21.10	3.49
11	B	41.00	43.00	Carpeta asfáltica nueva	10	6.5	2.00	0.78	2.20	7.82
				Base estabilizada nueva	25	11.0	2.82	1.34	6.26	5.32
				Base hidráulica existente	10	18.0	2.40	1.08	12.30	1.54
				Sub base existente	25	19.5	2.55	1.18	9.53	0.99
				Capas inferiores	300	22.5	2.10	0.92	21.40	3.55

*Tabla E.30 Vida esperada para la condición futura. Caso 4*

CASO SIMULADO	CUERPO	SUBTRAMO Del km al km		ESPESOR DE CAPA (cm)		VIDA ESPERADA (AÑOS)
1	A	0.0	4.0	Carpeta asfáltica nueva	10	80
				Base estabilizada nueva	25	
				Base estabilizada existente	6	
				Sub base existente	38	
				Capas inferiores	300	
2	A	4.0	7.0	Carpeta asfáltica nueva	10	38
				Base estabilizada nueva	25	
				Base hidráulica existente	7	
				Sub base existente	38	
				Capas inferiores	300	
3	A	7.0	0	Carpeta asfáltica nueva	10	13.21
				Base estabilizada nueva	25	
				Base hidráulica existente	8	
				Sub base existente	26	
				Capas inferiores	300	
4	B	0.0	4.0	Carpeta asfáltica nueva	10	13.29
				Base estabilizada nueva	25	
				Base hidráulica existente	9	
				Sub base existente	18	
				Capas inferiores	300	

5	B	4.0	0	Carpeta asfáltica nueva	10	13.53
				Base estabilizada nueva	25	
				Base hidráulica existente	12	
				Sub base existente	24	
				Capas inferiores	300	
6	B	26.6	26.7	Carpeta asfáltica nueva	10	01
				Base estabilizada nueva	25	
				Base hidráulica existente	9	
				Sub base existente	21	
				Capas inferiores	300	
7	B	35.0	35.1	Carpeta asfáltica nueva	10	13.09
				Base estabilizada nueva	25	
				Base hidráulica existente	11	
				Sub base existente	20	
				Capas inferiores	300	
8	B	36.0	36.0	Carpeta asfáltica nueva	10	13.11
				Base estabilizada nueva	25	
				Base hidráulica existente	10	
				Sub base existente	20	
				Capas inferiores	300	
9	B	37.20	37.35	Carpeta asfáltica nueva	10	13.34
				Base estabilizada nueva	25	
				Base hidráulica existente	5	
				Sub base existente	22	
				Capas inferiores	300	
10	B	39.40	39.74	Carpeta asfáltica nueva	10	13.74
				Base estabilizada nueva	25	
				Base hidráulica existente	4	
				Sub base existente	15	
				Capas inferiores	300	
11	B	41.00	43.00	Carpeta asfáltica nueva	10	13.92
				Base estabilizada nueva	25	
				Base hidráulica existente	10	
				Sub base existente	25	
				Capas inferiores	300	

## E.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### E.4.1 Conclusiones

Única. Fue necesario revisar históricamente el comportamiento real del pavimento, a fin de proponer una solución al deterioro presentado en el mismo.

### **E.4.2 Recomendaciones**

- Primera Como medida correctiva para mejorar la condición estructural del pavimento en el carril de baja velocidad de los tramos estudiados, se planteó la opción de rehabilitar el pavimento mediante el siguiente procedimiento:
- a) Cortar y recuperar una capa de 25 cm de espesor, la cual incluye 10 cm de carpeta y 15 cm de base hidráulica (estabilizada con cemento Portland en el tramo del km 0 al km 4 del cuerpo A)
  - b) Estabilizar el material recuperado mediante la incorporación de emulsión de rompimiento lento en una proporción aproximada de  $70 \text{ lt/m}^3$  (sujeta a ajustes de laboratorio)
  - c) Mezclado, tendido y compactado de la base estabilizada
  - d) Riego de liga sobre la nueva capa de base extendida, conformada y compactada a 100% de su peso volumétrico seco máximo (asegurar un módulo elástico de  $20,000 \text{ kg/cm}^2$ )
  - e) Tender una nueva carpeta asfáltica de 10 cm de espesor, fabricada y colocada bajo estricto control de calidad, tanto por lo que se refiere a los materiales utilizados, como en lo correspondiente a temperaturas, proporcionamientos, compactaciones, geometría, etc. (asegurar un módulo elástico de  $35,000 \text{ kg/cm}^2$ )
  - f) Durante el control de calidad del pavimento deben certificarse que las deflexiones medidas con viga Benkelman en cada capa, sean las de proyecto, acordes con los módulos elásticos sugeridos.
- Segunda Al modificar la estructura del carril de baja velocidad (por geometría y como refuerzo), debe considerarse la colocación de una sobrecarpeta en el carril de alta velocidad y los acotamientos, de manera que se logre un bombeo mayor al actual (asegurar de 2.5 a 3%)
- Tercera Revisar el estado de conservación del drenaje superficial y subdrenaje, a fin de desalojar eficazmente todos los escurrimientos o flujos que se presenten. Como parte de esta recomendación, resulta conveniente evitar en lo posible el uso de bordillos que detengan los escurrimientos en la corona.

**CASO 5: Asunción – Tejocotal (México – Tuxpan; RVO y Cía., 2004).****E.1 EVALUACIÓN SUPERFICIAL**

Se efectuaron recorridos en el tramo de estudio, con el fin de llevar a cabo la inspección visual del deterioro superficial del pavimento.

**E.1.1 Índice de Irregularidad Internacional (III)**

No se utilizó el perfilómetro láser y, por lo tanto, no se obtuvo el III.

**E.1.2 Profundidad de rodera**

Las mediciones precisas de la profundidad de rodera mediante el uso del perfilómetro láser no se obtuvieron en esta evaluación; sin embargo, con la inspección visual se determinó la siguiente condición:

Para ambos carriles se detecta la presencia de rodera de intensidad ligera, en casi toda el área de ambos carriles.

**E.1.3 Levantamiento de deterioro**

El daño más representativo del tramo es el agrietamiento tipo "piel de cocodrilo", con intensidad moderada a severa en toda el área de ambos carriles.

**E.2 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL (Plano 9)****E.2.1 Medición de desplazamientos verticales**

Los resultados de las mediciones de los desplazamientos verticales se pueden observar en en Plano 9, en donde aparecen gráficas del cadenamiento (eje horizontal) y el desplazamiento vertical registrado por cada sensor (eje vertical). Cada una de estas gráficas tiene el registro para siete sensores ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$ ,  $S_5$ ,  $S_6$  y  $S_7$ ).

- En el carril derecho, el promedio de los desplazamientos verticales en el sensor bajo la carga ( $S_1$ ) es de 1.192 mm; en el carril izquierdo, el promedio de desplazamientos verticales en el mismo sensor resultó de 1.237 mm.

**E.2.2 Índice Estructural del pavimento ( $I_e$ )**

En el Plano 9 se presenta gráficamente el  $I_e$  correspondiente a cada punto de medición, incluyendo el valor medio ( $\bar{I}_e$ ) así como la Calificación Estructural ( $C_e$ ) equivalente. Los resultados más importantes son los siguientes:

- En ambos carriles, los valores de  $\bar{I}_e$  se encuentran entre 0.326 y 0.337 (carril derecho y izquierdo respectivamente).
- Es oportuno aplicar ya una estrategia de rehabilitación, para que no decaiga el  $I_e$  del pavimento y se llegue al deterioro crítico por fatiga que implique una reconstrucción costosa e imprevista.

### ***E.2.3 Módulos elásticos de las capas***

En el Plano 9 se presentan gráficamente los módulos elásticos calculados para la carpeta asfáltica, la base y las capas inferiores, con los siguientes resultados:

En el carril derecho, los valores promedio de los módulos elásticos de las capas de carpeta, base y subrasante son de 4099, 3036 y 695 kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente. En el carril izquierdo, estos valores corresponden respectivamente a 4631, 3221 y 726 kg/cm<sup>2</sup>.

## **E.3 SIMULACIÓN ESTRUCTURAL**

### ***E.3.1 Estado actual del pavimento***

Para este ejemplo se efectuó el cálculo de los módulos elásticos y de la vida útil esperada mediante el empleo de un programa de computadora alternativo llamado ELMOD (Owners Manual, 2001) basado en la teoría elástica de capas. Por tal motivo los resultados se presentan de forma diferente.

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis de desplazamientos verticales, las características de los materiales que conforman el pavimento y el deterioro que se presenta en la superficie de los mismos, no se consideró necesario dividir el tramo del estudio (del km 106.795 al 124.280) en subtramos.

En general, el pavimento se encuentra en condiciones regulares desde el punto de vista estructural, ya que los materiales que conforman la capa de base hidráulica se encuentran en buenas condiciones, de acuerdo con los resultados obtenidos de laboratorio y campo, además de las mediciones. Por lo tanto, es conveniente proponer una estructura capaz de soportar el tránsito vehicular que circula sobre el tramo en estudio.

### ***E.3.2 Análisis del tránsito***

#### ***a) Condición actual***

A partir de los datos de tránsito (proporcionados por CAPUFE, por indicaciones del Fideicomiso Autopistas y Puentes del Golfo Centro FAPGC), se determinó un tránsito diario promedio anual (TDPA) de 6,171 vehículos; asimismo, la distribución del tránsito por tipo de vehículo es la siguiente:

VEHÍCULO	FRECUENCIA (%)
A	73
B2	4
B3	4
C2	7
C3	4
T3-S2	4
T3-S3	3
T3-S2-R4	1

### ***b) Condición futura***

La tasa de crecimiento vehicular que se consideró es de 3 %.

Se presenta a continuación la distribución de vehículos para el carril de proyecto.

VEHÍCULO	TRÁNSITO INICIAL DIARIO (CARRIL DE PROYECTO)
A	2254
B2	123
B3	123
C2	216
C3	123
T3-S2	123
T3-S3	93
T3-S2-R4	31

### ***E.3.3 Comportamiento actual del pavimento***

En la Tabla E.31 se presenta un resumen del resultado obtenido para la condición actual.

*Tabla E.31 Vida esperada para la condición actual. Caso 5*

TRAMO		ESPESOR PROMEDIO (cm)			VIDA ESPERADA
Del km	Al km	CARPETA	BASE	SUBRASANTE	
106.795	124.280	6.0	34.0	30.0	Menor a 1 año

Se proponen las siguientes opciones más prometedoras:

#### **Opción 1**

Remoción de 4 cm en la carpeta existente (sin llegar a la base) y construcción de una carpeta asfáltica de 10 cm.

## Opción 2

Recuperación de 25 cm en la carpeta asfáltica existente conjuntamente con parte de la base hidráulica, mezclado y compactado por medios mecánicos con 4% (en peso) de cemento Portland, a fin de formar una base estabilizada, sin que ésta llegue a rigidizarse. Después se efectúa la construcción de una carpeta asfáltica de 10 cm como capa de rodamiento.

## Opción 3

Igual a la Opción 2, pero utilizando emulsión asfáltica en lugar de cemento Portland.

## Opción 4

Remoción de la carpeta asfáltica existente y construcción de una losa de concreto hidráulico de 25 cm de espesor.

### E.3.4 Comportamiento futuro del pavimento

Se simuló el comportamiento del pavimento para todo el tramo (del km 106.795 al km 124.280) con las cuatro opciones de rehabilitación descritas anteriormente, presentando los resultados en la Tabla E.32.

Tabla E.32 *Vida esperada para la condición futura. Caso 4*

Opción 1	Carpeta nueva	Base actual	Subrasante actual		VIDA ÚTIL ESPERADA
	10 cm	34 cm	30 cm		
Opción 2	Carpeta nueva	Carpeta y base mezclada con 4% cemento Portland	Base remanente	Subrasante actual	21 años
	10 cm	25 cm	15 cm	30 cm	
Opción 3	Carpeta nueva	Carpeta y base mezclada con emulsión asfáltica	Base remanente	Subrasante actual	19 años
	10 cm	25 cm	15 cm	30 cm	
Opción 4	Losa de concreto hidráulico	Base actual	Subrasante actual		46 años
	25 cm	34 cm	30 cm		

## E.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### E.4.1 Conclusiones

- Primera En general, el pavimento se encuentra en condiciones regulares para el tránsito actual. La carpeta asfáltica presenta agrietamiento por fatiga en la mayor parte del tramo estudiado.
- Segunda La capa de base se encuentra en buen estado, no presenta excesos de humedad y, en general, cumple con las especificaciones de la SCT, aunque hay heterogeneidad en la plasticidad de los finos.
- Tercera La vida útil esperada para el pavimento existente en el tramo estudiado es inferior a un año.
- Cuarta En general, aunque el pavimento se encuentra transitable, ya resulta onerosa la conservación del mismo. Aunado a esto, el paso de los vehículos que circulan sobre el tramo ha provocado la fatiga de la carpeta asfáltica delgada, por lo que resulta necesario realizar una rehabilitación y/o reconstrucción del pavimento lo antes posible, debido a que el agrietamiento de la carpeta pueden provocar que se infiltre el agua pluvial y otros agentes dañinos a las capas subyacentes.
- Quinta La opción de rehabilitación que aporta mayor vida esperada es la 4, pero requiere de la construcción de una capa de rodamiento de concreto hidráulico de 25 cm. La vida esperada resultó de 46 años, con la inversión inicial más alta (\$172,2 millones), pero se estima que los gastos de conservación sean mínimos.
- Sexta La opción 3 es muy prometedora para la restitución de la capacidad estructural del pavimento, con una carpeta de 10 cm apoyada en una capa de 25 cm, construida ésta mediante la recuperación integral de la carpeta asfáltica existente y parte de la base hidráulica, con emulsión asfáltica como aglutinante. De esta manera se logra una base de apoyo firme, homogénea y uniforme, que mejora notablemente la estructura del pavimento a corto y largo plazo. La vida esperada es de 19 años, con una inversión inicial de (\$ 84 millones), que reduce la posibilidad de colocar concreto hidráulico posteriormente.
- Séptima La opción 2 es muy similar a la 3, pero utilizando cemento Portland en lugar de emulsión asfáltica. La vida útil esperada es de 21 años y su inversión inicial de \$ 75.4 millones, pero disminuye la posibilidad de colocar posteriormente concreto hidráulico.
- Octava La opción 1, con una inversión inicial de \$ 38.5 millones, aunque su vida útil es la más baja (9 años), es la más prometedora por que da oportunidad de reforzar posteriormente la estructura del pavimento con losas de concreto hidráulico, ya que se apoyarían sobre una capa de concreto asfáltico (10 cm) y la base hidráulica existente, después de fresar (4 cm, aproximadamente) y remover la carpeta agrietada existente.

### **E.4.2 Recomendaciones**

- Primera Con el fin de conocer la evolución del comportamiento del pavimento en función del tiempo, se recomienda evaluarlo periódicamente desde el punto de vista superficial y estructural, en forma oportuna.
- Segunda Superficialmente se deberán realizar recorridos cada año, para medir el III y evaluar el estado del deterioro del pavimento.
- Tercera Estructuralmente, es recomendable efectuar pruebas no destructivas en el pavimento con una periodicidad de 2 años.
- Cuarta Llevar un control de flujo vehicular a través del tiempo (especialmente de los vehículos pesados) y un estricto control de la carga máxima transportada por éstos (instalación de básculas).
- Quinta Realizar los trabajos de conservación mayor de acuerdo con un programa maestro de actividades.
- Sexta Efectuar los trabajos de conservación de las obras de drenaje y obras complementarias, cuando menos dos veces por año (antes y después del periodo de lluvias).

### **REFERENCIAS**

Owners Manual, 2001: Dynatest ELMOD 4.5, Pavement Evaluation Manual

RVO y Cía., 2001a: Parte I. Evaluación del Pavimento en la Carretera Aguascalientes-Zacatecas (Tramo: Rincón de Romos-Entronque Guadalupe) del km 45 al 79 (25 km). Parte II. Evaluación del Pavimento en la Carretera Villahermosa-Ciudad del Carmen (Tramo Villahermosa-Zacatal) del km 30 al 160 (130 km). Para Dirección General de Carreteras Federales Subsecretaría de Infraestructura. Secretaría de Comunicaciones y Transportes

RVO y Cía., 2001b: Evaluación Superficial y Estructural del Pavimento en la carretera Coatzacoalcos-Salina Cruz (Tramo: Acayucan-Lim. Edos. Ver./Oax. Del km 112 al km 139.94 (27.94 km). Para Centro SCT, Veracruz

RVO y Cía., 2001c: Dictamen Técnico de la Estructura del Pavimento Autopista Córdoba-Veracruz; carriles de baja velocidad, cuerpo A: km 0 a 14 Cuerpo B. km 0 a 14, 26.6 a 26.7, 34.95 a 35.05, 35.98 a 36.02, 37.20 a 37.35, 39.40 a 39.74 y 41 a 43. Para CAPUFE, Delegación Regional Zona VII Golfo

RVO y Cía., 2004: Estudio del Pavimento de la Autopista México-Tuxpan, Tramo: Entronque Asunción-Entronque Tejocotal. Para Fideicomiso Autopistas y Puentes del Golfo Centro

# PLANOS

# ÍNDICE DE PLANOS

---

DESCRIPCIÓN	NÚMERO
Evaluación Superficial. Carretera: Aguascalientes – Zacatecas; Tramo: Rincón de Romos – Entronque Guadalupe; Subtramo: km 45 al 70; Cuerpo: Único; Carril: Derecho e Izquierdo	1
Evaluación Estructural. Carretera: Aguascalientes – Zacatecas; Tramo: Rincón de Romos – Entronque Guadalupe; Subtramo: km 45 al 70; Cuerpo: Único; Carril: Derecho e Izquierdo	2
Evaluación Superficial. Carretera: Villahermosa – Cd. del Carmen; Tramo: Villahermosa – Zacatal; Subtramo: km 30 al 160; Cuerpo: Único; Carril: Derecho e Izquierdo	3
Evaluación Estructural. Carretera: Villahermosa – Cd. del Carmen; Tramo: Villahermosa – Zacatal; Subtramo: km 30 al 160; Cuerpo: Único; Carril: Derecho e Izquierdo	4
Evaluación Superficial. Carretera: Coatzacoalcos – Salina Cruz; Tramo: Acayucan – L. E. Ver/Oax; Subtramo: km 112 a 140; Cuerpo: Único; Carril: Derecho e Izquierdo	5
Evaluación Estructural. Carretera: Coatzacoalcos – Salina Cruz; Tramo: Acayucan – L. E. Ver/Oax; Subtramo: km 112 al 140; Cuerpo: Único; Carril: Derecho e Izquierdo	6
Evaluación Superficial. Autopista: Córdoba – Veracruz; Tramo: km 0 al 44; Cuerpo: "A" y "B"; Carril: Baja velocidad	7
Evaluación Estructural. Autopista: Córdoba – Veracruz; Tramo: km 0 al 44; Cuerpo: "A" y "B"; Carril: Baja velocidad	8
Evaluación Estructural: Autopista: México – Tuxpan; Tramo: Ent. Asunción – Ent. Tejocotal; Subtramo: km 106.795 al 124.180; Cuerpo: Único; Carril: Derecho e Izquierdo	9

## Evaluación Superficial

Carretera: Aguascalientes - Zacatecas  
Tramo: Rincón de Romos - Entronque Guadalupe  
Subtramo: km 45 al 70  
Cuerpo: Único  
Carril: Derecho  
Carril: Izquierdo  
Plano: 1

## Evaluación de Pavimentos Flexibles con Métodos no Destructivos



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

TESIS DOCTORAL EN  
MECÁNICA DE SUELOS  
RAÚL VICENTE OROZCO SANTOYO



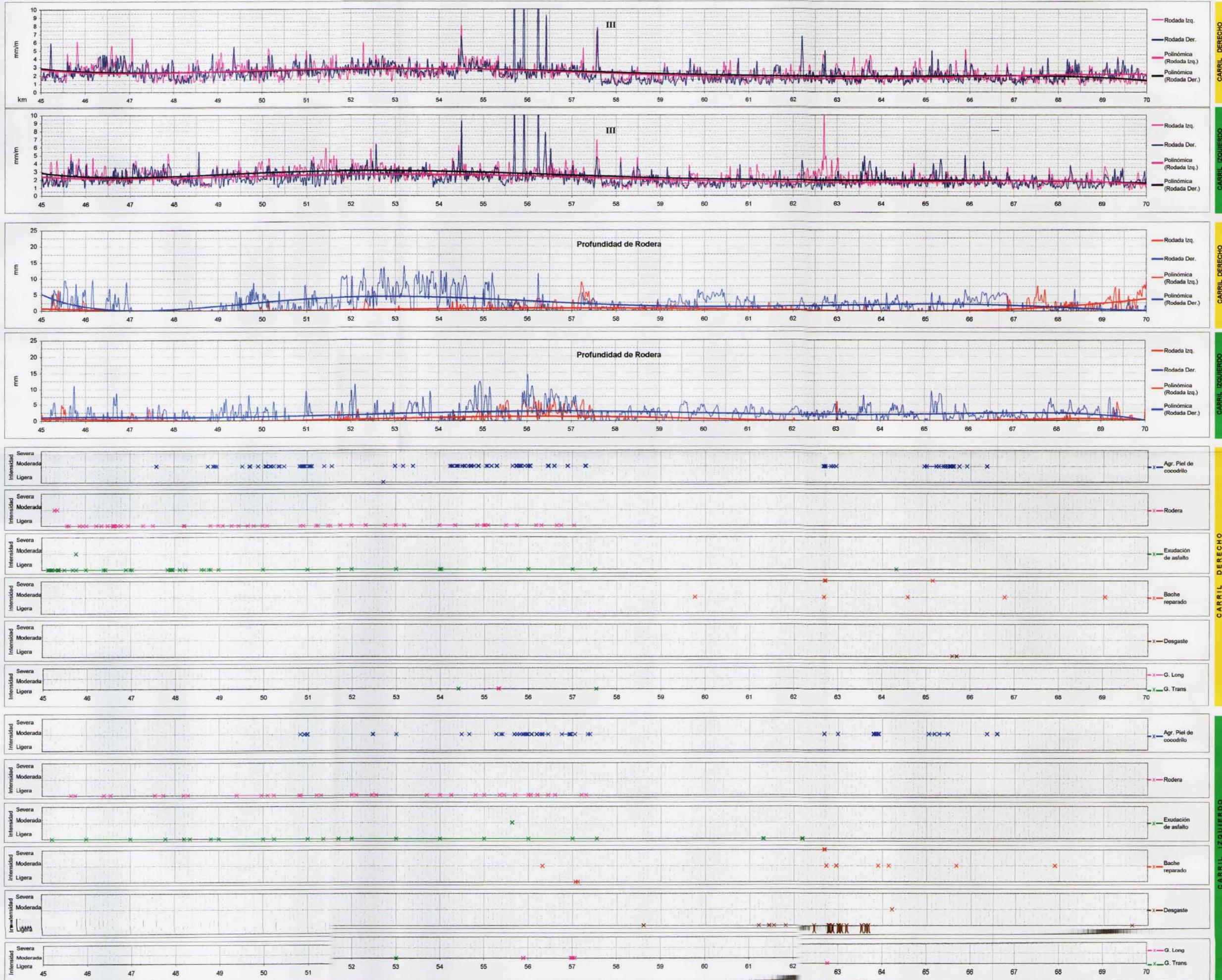
### Evaluación Superficial

Carretera: Aguascalientes - Zacatecas

Tramo: Rincón de Romos - Entronque Guadalupe

Subtramo: km 45 al 70

Plano : 1



CARRIL DERECHO

CARRIL IZQUIERDO

CARRIL DERECHO

CARRIL IZQUIERDO

CARRIL DERECHO

CARRIL IZQUIERDO

CARRIL DERECHO

CARRIL IZQUIERDO

## Evaluación Estructural

Carretera: Aguascalientes - Zacatecas  
Tramo: Rincón de Romos - Entronque Guadalupe  
Subtramo: km 45 al 70  
Cuerpo: Único  
Carril: Derecho  
Carril: Izquierdo  
  
Plano: 2

## Evaluación de Pavimentos Flexibles con Métodos no Destructivos



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

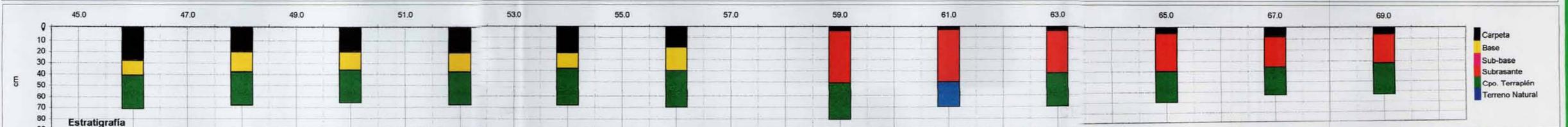
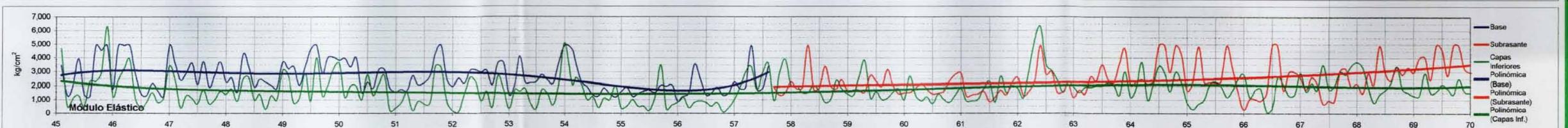
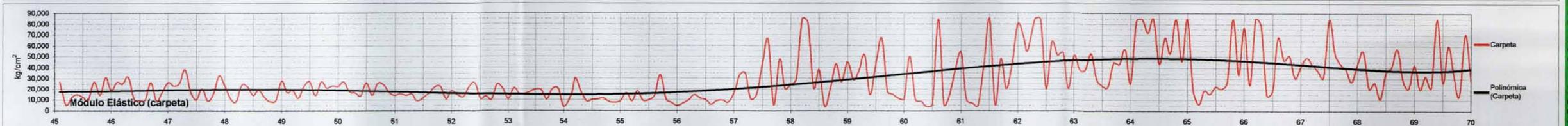
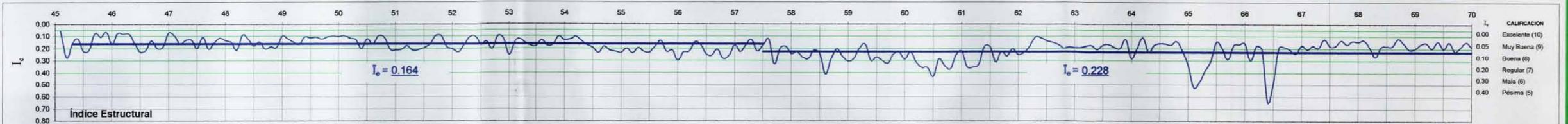
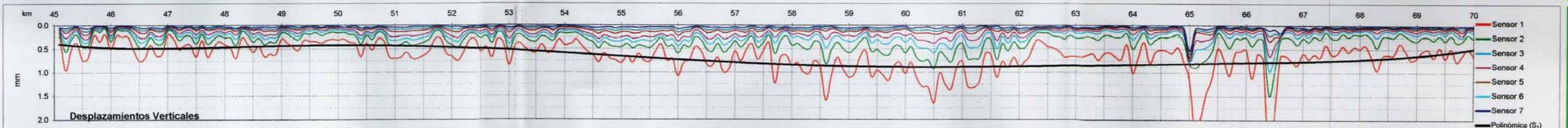
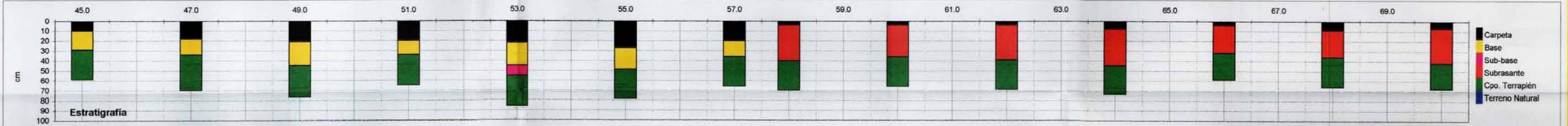
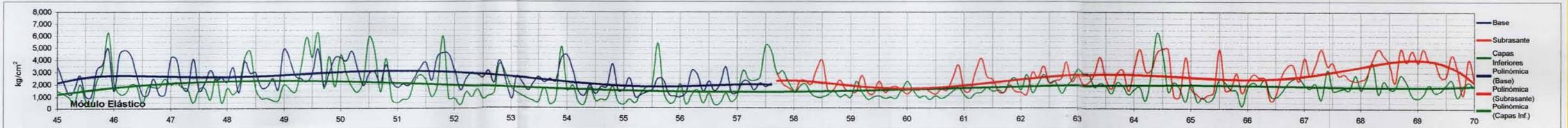
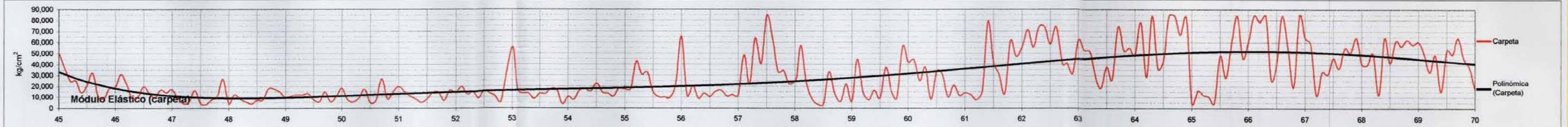
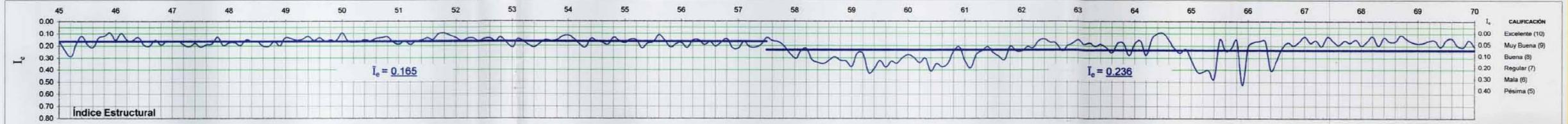
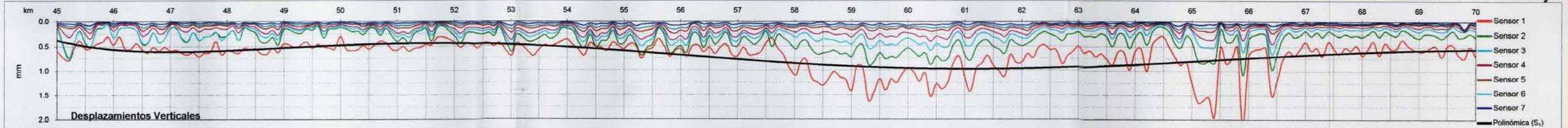
TESIS DOCTORAL EN  
MECÁNICA DE SUELOS  
RAÚL VICENTE OROZCO SANTOYO



### Evaluación Estructural

Carretera: Aguascalientes - Zacatecas  
Tramo: Rincón de Romos - Entronque Guadalupe  
Subtramo: km 45 al 70

Plano : 2



## Evaluación Superficial

Carretera: Villahermosa - Cd. del Carmen

Tramo: Villahermosa - Zacatal

Subtramo: km 30 al 160

Cuerpo: Único

Carril: Derecho

Carril: Izquierdo

Plano: 3

## Evaluación de Pavimentos Flexibles con Métodos no Destructivos



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

TESIS DOCTORAL EN  
MECÁNICA DE SUELOS  
RAÚL VICENTE OROZCO SANTOYO



### Evaluación Superficial

Carretera: Villahermosa - Cd. del Carmen

Tramo: Villahermosa - Zacatal

Subtramo: km 30 al 160

Plano : 3



## Evaluación Estructural

Carretera: Villahermosa - Cd. del Carmen

Tramo: Villahermosa - Zacatal

Subtramo: km 30 al 160

Cuerpo: Único

Carril: Derecho

Carril: Izquierdo

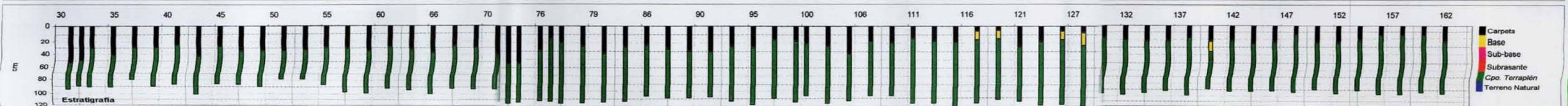
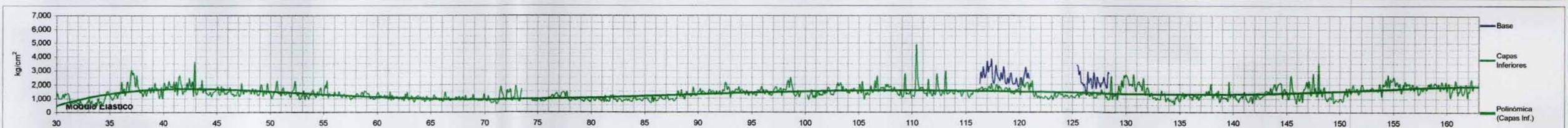
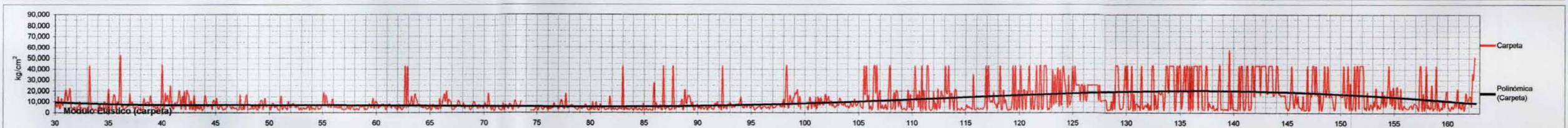
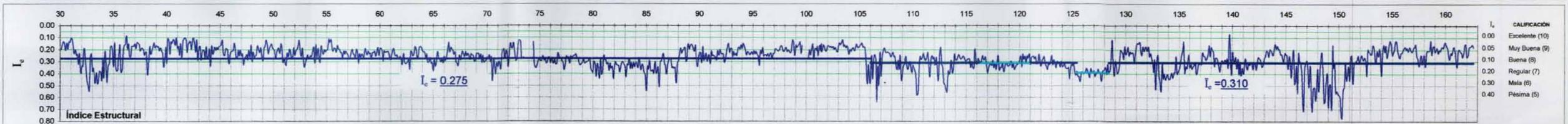
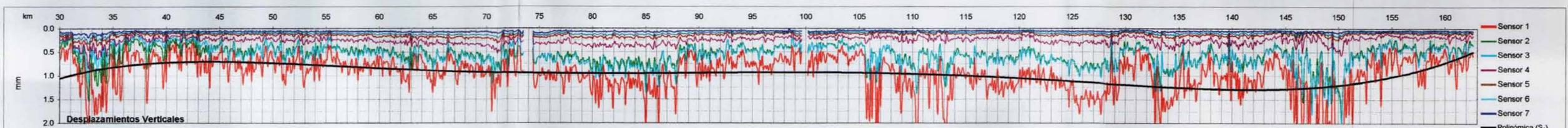
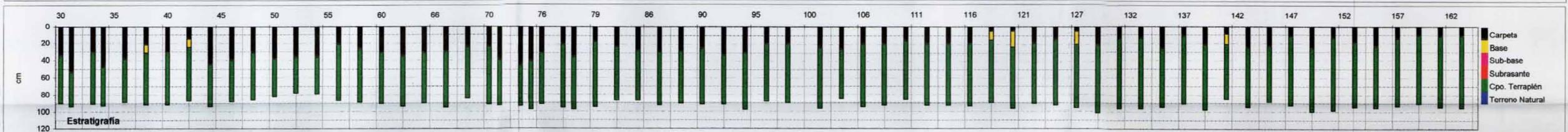
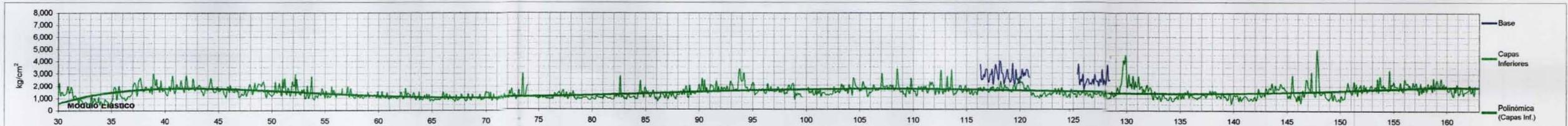
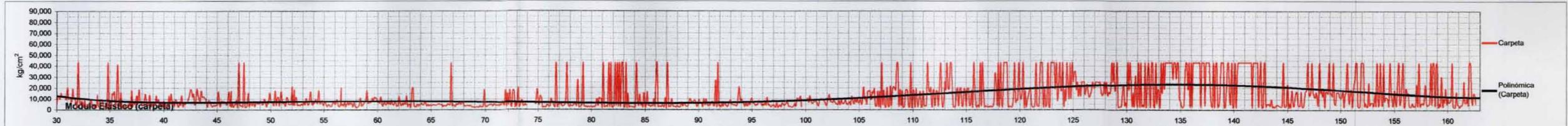
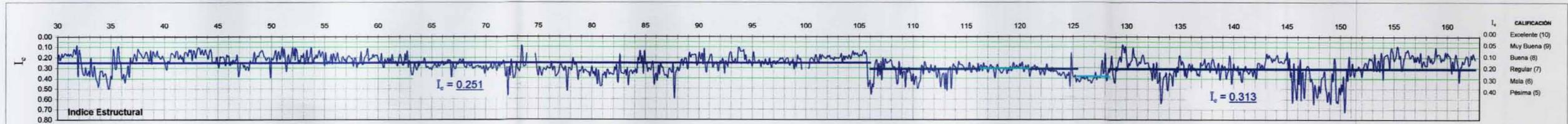
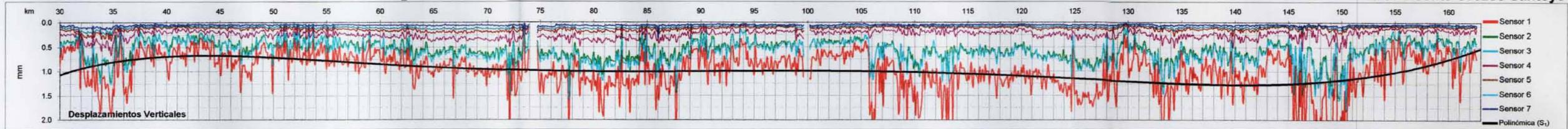
Plano: 4

## Evaluación de Pavimentos Flexibles con Métodos no Destructivos



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

TESIS DOCTORAL EN  
MECÁNICA DE SUELOS  
RAÚL VICENTE OROZCO SANTOYO



## **Evaluación Superficial**

**Carretera:** Coatzacoalcos - Salina Cruz

**Tramo:** Acayucan - L. E. Ver/Oax

**Subtramo:** km 112 a 140

**Cuerpo:** Único

**Carril:** Derecho

**Carril:** Izquierdo

**Plano:** 5

## **Evaluación de Pavimentos Flexibles con Métodos no Destructivos**



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**TESIS DOCTORAL EN  
MECÁNICA DE SUELOS**  
RAÚL VICENTE OROZCO SANTOYO



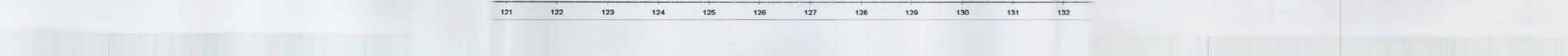
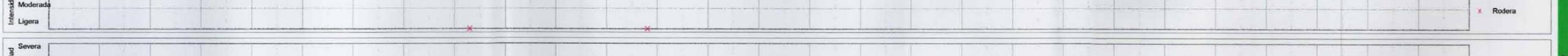
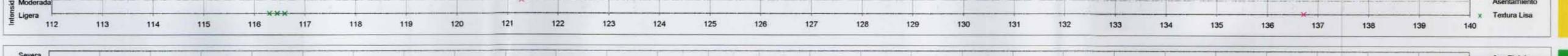
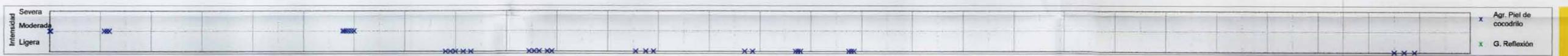
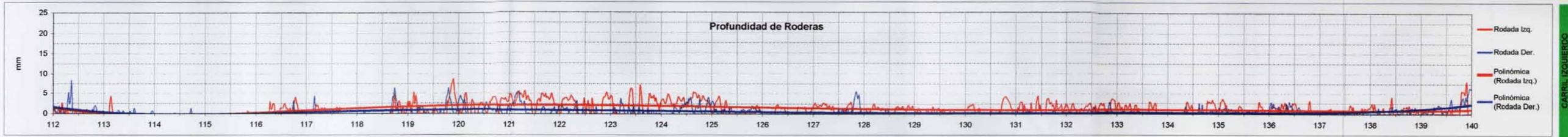
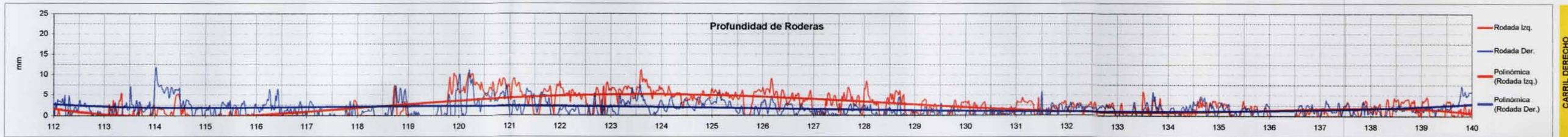
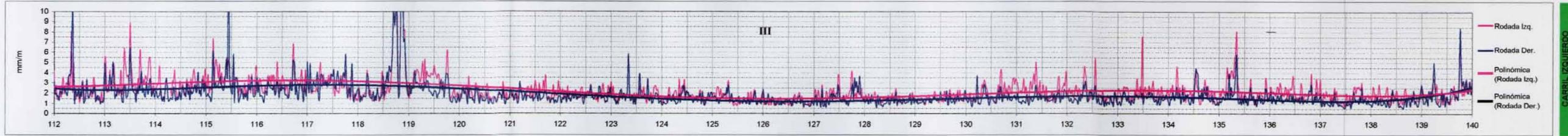
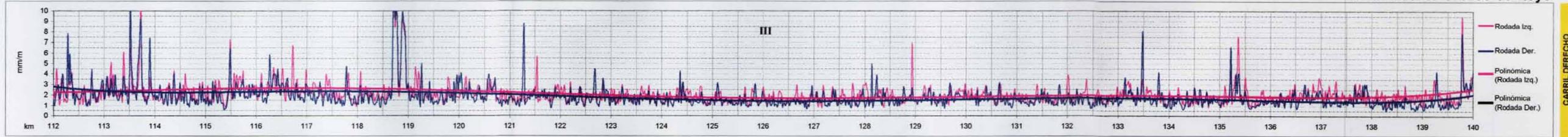
### Evaluación Superficial

Carretera: Coatzacoalcos - Salina Cruz

Tramo: Acayucan - L. E. Ver/Oax

Subtramo: km 112 a 140

Plano : 5



CARRIL DERECHO

CARRIL IZQUIERDO

CARRIL DERECHO

CARRIL IZQUIERDO

CARRIL DERECHO

CARRIL IZQUIERDO

CARRIL DERECHO

CARRIL IZQUIERDO

CARRIL DERECHO

## Evaluación Estructural

Carretera: Coatzacoalcos - Salina Cruz

Tramo: Acayucan - L. E. Ver/Oax

Subtramo: km 112 a 140

Cuerpo: Único

Carril: Derecho

Carril: Izquierdo

Plano: 6

## Evaluación de Pavimentos Flexibles con Métodos no Destructivos



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

TESIS DOCTORAL EN  
MECÁNICA DE SUELOS  
RAÚL VICENTE OROZCO SANTOYO



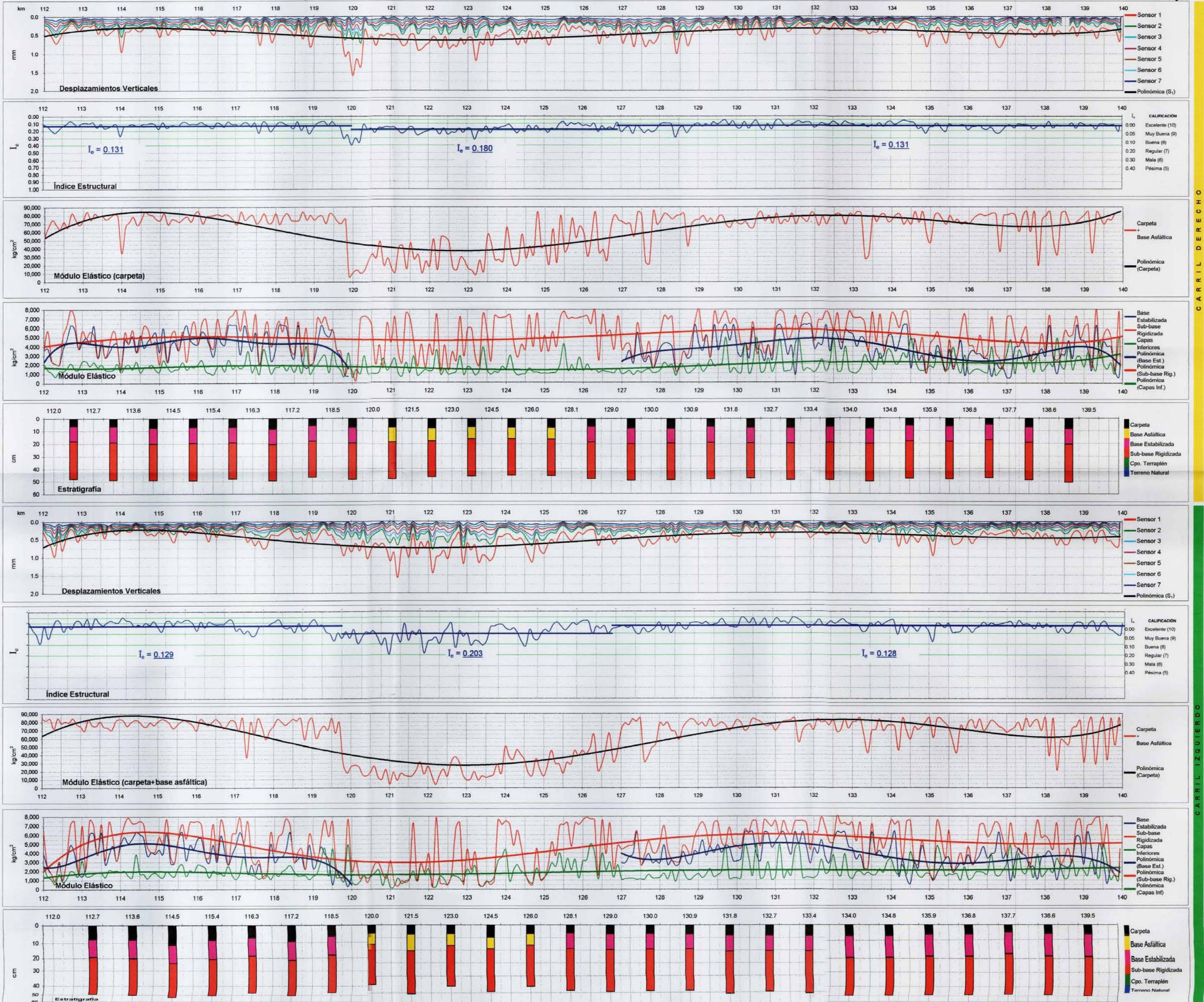
### Evaluación Estructural

Carretera: Coatzacoalcos - Salina Cruz

Tramo: Acayucan - L. E. Ver/Oax

Subtramo: km 112 a 140

Plano: 6



CARIL DERECHO

CARIL IZQUIERDO

## Evaluación Superficial

Carretera: Córdoba - Veracruz

Tramo: km 0 a 44

Cuerpo: " A "

Cuerpo: " B "

Carril: Baja velocidad

Plano: 7

## Evaluación de Pavimentos Flexibles con Métodos no Destructivos



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

TESIS DOCTORAL EN  
MECÁNICA DE SUELOS  
RAÚL VICENTE OROZCO SANTOYO



### Evaluación Superficial

Carretera: Córdoba - Veracruz

Subtramo: km 0 a 44

Plano : Z



CUERPO "A"

CUERPO "B"

CUERPO "A"

CUERPO "B"

CUERPO "A"

CUERPO "B"

CUERPO "A"

CUERPO "B"

CUERPO "A"

## Evaluación Estructural

Carretera: Córdoba - Veracruz

Tramo: km 0 a 44

Cuerpo: " A "

Cuerpo: " B "

Carril: Baja velocidad

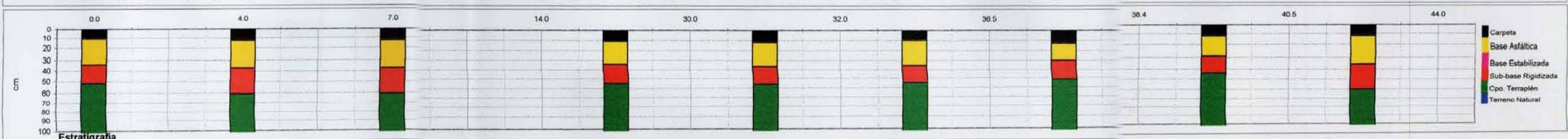
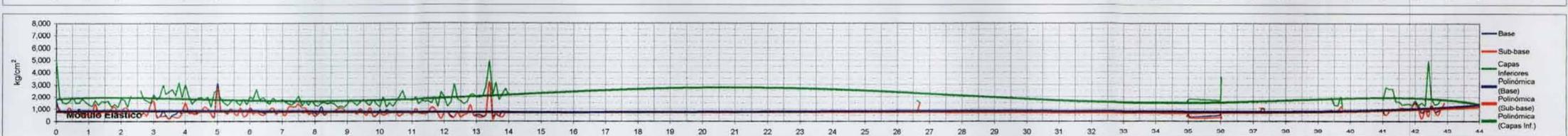
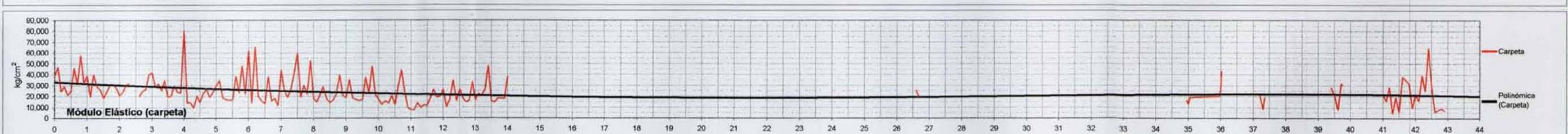
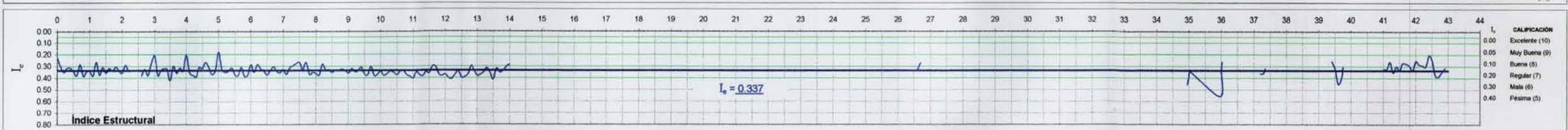
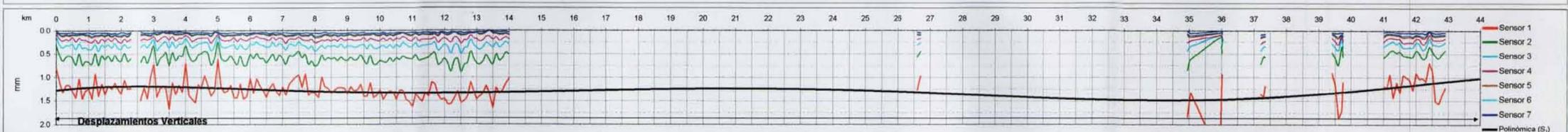
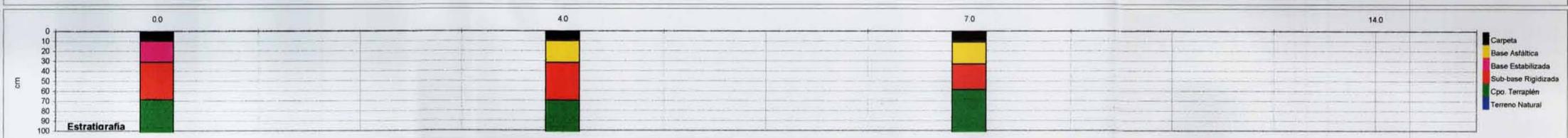
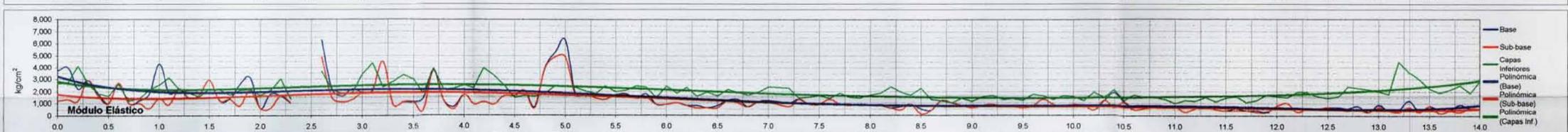
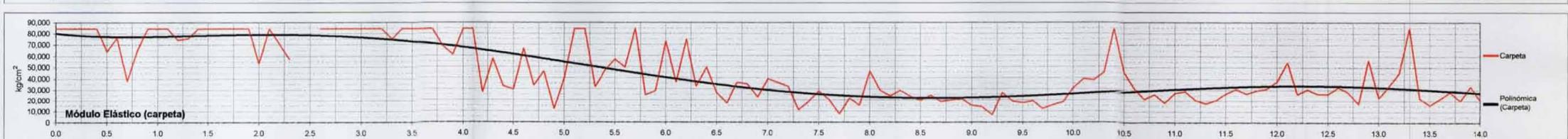
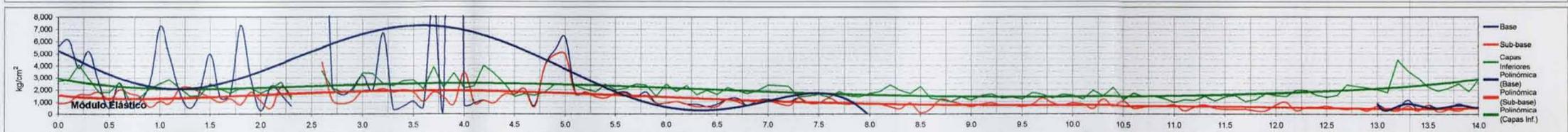
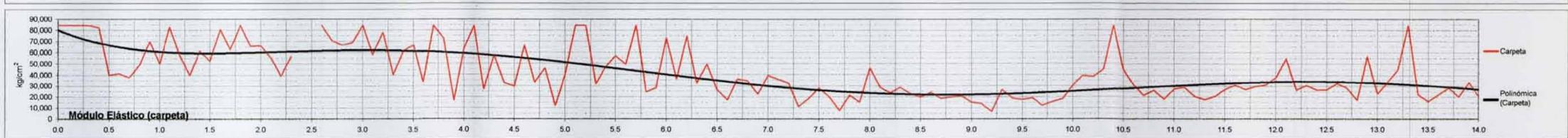
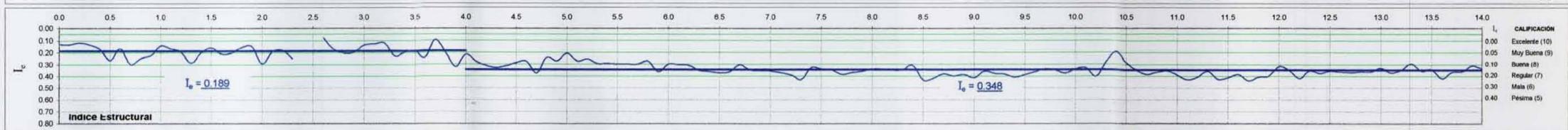
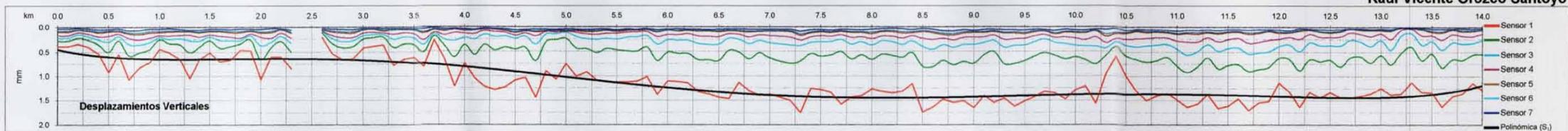
Plano: 8

## Evaluación de Pavimentos Flexibles con Métodos no Destructivos



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

TESIS DOCTORAL EN  
MECÁNICA DE SUELOS  
RAÚL VICENTE OROZCO SANTOYO



C U E R T O

## Evaluación Estructural

Carretera: México - Tuxpan  
Tramo: Ent. Asunción - Ent. Tejocotal  
Subtramo: km 106+795 a 124+180  
Cuerpo: Único  
Carril: Derecho  
Carril: Izquierdo  
  
Plano: 9

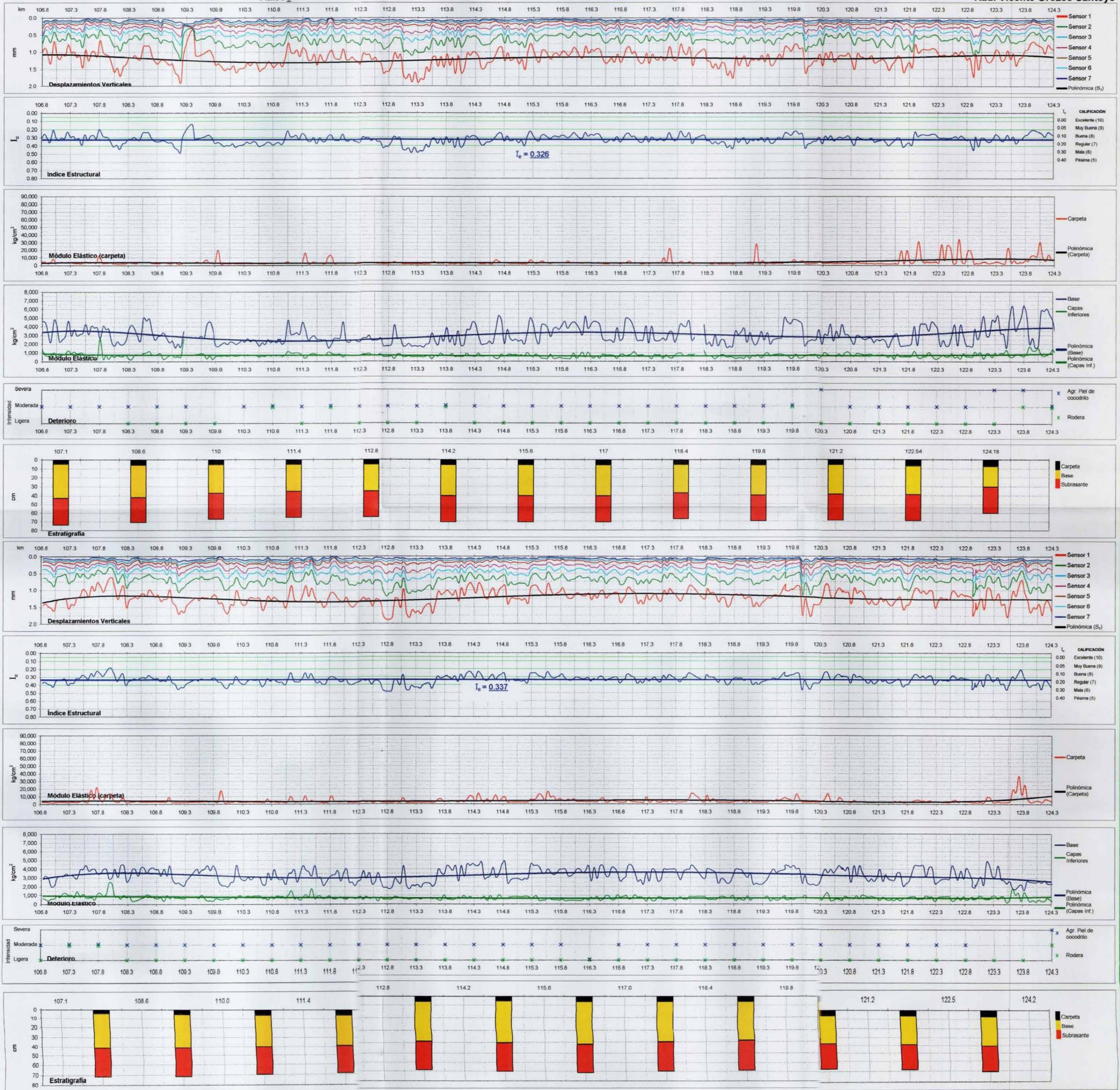
## Evaluación de Pavimentos Flexibles con Métodos no Destructivos



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

TESIS DOCTORAL EN  
MECÁNICA DE SUELOS  
RAÚL VICENTE OROZCO SANTOYO

Plano : 9



CARRIL DERECHO

CARRIL IZQUIERDO