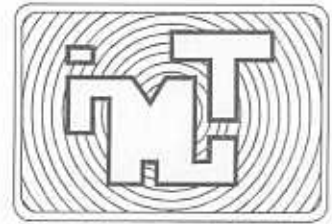
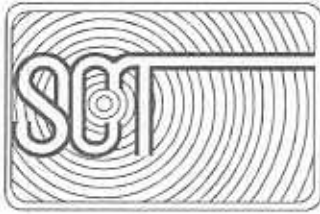


ISSN 0188-7114



---

---

# **EVALUACION ESTRUCTURAL NO DESTRUCTIVA DE PAVIMENTOS**

**Instituto Mexicano del Transporte**  
**Secretaría de Comunicaciones y Transportes**

Publicación Técnica No. 107  
Sanfandila, Qro. 1998

---

**SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES  
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Evaluación Estructural  
No Destructiva de Pavimentos**

**Publicación Técnica No. 107  
San Fandila, Gro. 1998**

---

---

Este trabajo fue elaborado en la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte, por Luis Carlos López Estrada<sup>1</sup> y Alberto Mendoza Díaz. La edición de este documento estuvo a cargo de J. Elías Jiménez Sánchez.

---

<sup>1</sup> Pasante de la Maestría en Vías Terrestres de la Universidad Autónoma de Chihuahua

---

# Índice.

---

	<u>Página</u>
Resumen.	v
Abstract.	vii
Resumen Ejecutivo.	ix
1. Introducción.	ix
1.1. Antecedentes.	1
1.2. Descripción del Problema.	5
1.3. Justificación.	6
1.4. Fundamentación Teórica.	6
1.5. Objetivos del Trabajo.	7
1.6. Hipótesis del Trabajo.	7
1.7. Alcances.	8
2. Principios de Evaluación Estructural.	9
2.1. Consideraciones Básicas.	9
2.1.1. Aspectos Generales.	9
2.1.2. Supervisión de la Red de Pavimentos.	9
2.1.3. Criterios para Realizar una Evaluación Detallada.	10
2.1.4. Evaluación Funcional contra Estructural.	10
2.1.5. Evaluación Destructiva contra No-Destructiva.	11
2.1.6. Enfoques Analíticos para la Evaluación Estructural.	11
2.2. Evaluación Estructural No Destructiva.	12
2.2.1. Equipos para la Medición de Deflexiones bajo Carga Estática o con Movimiento Lento.	13

	<u>Página</u>
2.2.1.1. Viga Benkelman.	15
2.2.1.2. Deflectómetro Viajero.	16
2.2.1.3. Deflectógrafo de Lacroix.	17
2.2.1.4. Otros Equipos.	18
2.2.2. Equipos para la Medición de Deflexiones bajo Carga Dinámica Estable.	18
2.2.2.1. Dynaflect.	20
2.2.2.2. Calificador de Caminos (Road Rater).	20
2.2.2.3. Otros Aparatos.	21
2.2.3. Equipos para la Medición de Deflexiones bajo Carga de Impacto (Deflectómetro de Impacto “Falling Weight Deflectometer, FWD”).	21
2.2.4. Medición Continua de Deflexiones bajo Carga Rodante (Deflectómetro de Peso Rodante “Rolling Wheel Deflectometer, RWD”).	24
2.2.5. Otros Métodos.	25
2.3. Evaluación Estructural Destructiva.	26
2.4. Uso de los Resultados.	27
3. Comparación de los Resultados de Algunos Métodos de Evaluación Estructural.	29
3.1. Objetivos del Capítulo.	29
3.2. El Programa de Evaluación Estructural en Puebla.	29
3.2.1. Descripción General.	29
3.2.2. Deflectómetro de Impacto Marca Dynatest.	31
3.2.3. Deflectómetro de Impacto Marca KUAB.	31

	<u>Página</u>
3.2.4. California Bearing Ratio.	33
3.2.5. Viga Benkelman.	35
3.3. Análisis de Datos.	35
3.3.1. Deflectómetros entre sí.	35
3.3.2. Deflectómetro contra California Bearing Ratio.	40
3.3.3. Deflectómetro contra Viga Benkelman.	42
4. Aplicación de la Evaluación Estructural a la Generación de Alternativas de Conservación.	45
4.1. Propósitos del Capítulo.	45
4.2. Evaluación de la Capacidad Estructural.	47
4.2.1. Metodología Propuesta.	47
4.2.2. Ejemplo 1.	52
4.2.3. Ejemplo 2.	55
4.3. Generación de Alternativas de Conservación.	59
4.3.1. Ejemplo 1.	60
4.3.2. Ejemplo 2.	63
4.4. Evaluación Económica de Alternativas.	63
5. Conclusiones y Recomendaciones.	70
5.1. Conclusiones.	69
5.2. Recomendaciones.	70
Referencias.	73
Anexos.	77





## **Resumen.**

---

El objetivo principal de este estudio, es el de establecer los elementos que permitan seleccionar técnicas y equipos de evaluación estructural de pavimentos adecuados a las necesidades específicas de los diversos organismos encargados de la conservación de caminos en México. Para lograr lo anterior, los estudios y análisis se llevaron a cabo con información obtenida de la red carretera federal del Estado de Puebla.

Inicialmente, este trabajo describe brevemente los conceptos básicos de la administración de pavimentos y se ubica a la actividad de la evaluación estructural dentro del contexto de esta disciplina. A partir de este contexto, se define una serie de principios de la evaluación estructural de pavimentos y algunos criterios para realizarla. Posteriormente, se analizan los métodos y equipos más comunes empleados en la evaluación estructural de pavimentos. De estos métodos y equipos, se destacan las características más relevantes, las ventajas y desventajas del uso de algunos de ellos, así como los resultados que producen.

Los análisis desarrollados, consistieron en comparar entre sí los datos provenientes de la excavación de "pozos a cielo abierto" (evaluación destructiva), así como la información de deflexiones obtenida con tres equipos diferentes (evaluación no destructiva) que se utilizan en México. A partir de dichos resultados, se estableció un conjunto de relaciones, las cuales permiten precisar una serie de recomendaciones a cerca de los ajustes que se pueden realizar a los métodos tradicionales.

Finalmente, se desarrolla una metodología para generar alternativas de conservación para un proyecto carretero determinado, tomando en cuenta la aplicación de los Métodos de la AASHTO y la información de evaluación estructural "no destructiva" y otros tipos de datos.



## **Abstract.**

---

The main objective of this study, is to establish the elements which allow to select appropriate techniques and equipment for structural evaluation pavements, according to the specific necessities of the diverse authorities entrusted of the conservation roads in Mexico. The studies and analysis were facts with information obtained of the net federal highway of Puebla Estate.

Initially, this work describes the basic concepts on the pavements administration and the activity on structural evaluation is located inside to the context of that discipline. From this context, is defined a serie of principles on the structural evaluation pavements and some criterials for its realization. Later, were analyzed the more common methods and equipment used on the structural evaluation, These methods and equipment, were review in detail: the main characteristics, the advantages and disadvantages of them, as well as the results that produce.

The analysis in this study consisted of compare the coming data from the excavation of "wells to open sky" (destructive evaluation), as well as the information of deflexions obtained with three different equipment (no-destructive evaluation) more used in Mexico.. This comparison permitted the development a serie of relationships, which allow to establish a group of recommendations about the adjustments that could make to the traditional methods.

Finally, a methodology is developed to generate alternative of conservation for a project road specific, considering the application of the Methods of the AASHTO and the information on structural evaluation "no-destructive" and other types of data.



# Resumen Ejecutivo.

---

## 1. Antecedentes.

En México existe la necesidad de diversos organismos encargados de la conservación de caminos, de contar con elementos que les permitan seleccionar las técnicas y equipos de evaluación estructural de pavimentos más adecuados a sus necesidades específicas. Este estudio trata de la evaluación estructural de los pavimentos, incluyendo una metodología para generar alternativas de conservación para un proyecto carretero determinado, tomando en cuenta la aplicación de los métodos de la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), de la información de evaluación estructural "no destructiva" y otros tipos de datos.

En la administración de pavimentos, básicamente existen los siguientes tipos de evaluación: de la Calidad del Servicio, de Daños, Estructural, de Seguridad, de Costos y de Estética. Al evaluar la capacidad estructural de los pavimentos, el primer paso consiste en supervisar o medir algunas características, ésta es a través de la medición de deflexiones o curvaturas de la superficie del pavimento, bajo cargas estáticas o dinámicas.

## 2. Evaluación Estructural No Destructiva.

La diferencia entre evaluación destructiva y no destructiva depende normalmente de la alteración física de los materiales, ya que la primera significa la destrucción del pavimento mediante la excavación de un pozo para muestreo, en cambio la evaluación estructural no destructiva se refiere a las mediciones de la respuesta de una estructura de pavimento a una fuerza externa o transmisión de energía, donde la estructura del pavimento no es alterada por las mediciones y tales mediciones pueden ser repetidas tantas veces como sea necesario.

Los métodos de prueba no destructivos son clasificados generalmente en cuatro categorías generales:

- ***Medición de la respuesta a una de carga estática o a la aplicación simple de una carga con movimiento lento.*** Se obtiene midiendo la deflexión de la superficie del pavimento bajo la carga. Los instrumentos más comunes que se emplean para hacer estas mediciones son la Viga Benkelman, el Deflectómetro viajero y el Deflectómetro de Lacroix. Este método no

representa adecuadamente los efectos de las cargas circulantes del tránsito y no permite fácilmente determinar el nivel de transferencia de carga en juntas y grietas de pavimentos rígidos.

- ***Medición de la respuesta a una carga compuesta por una parte estática y otra repetida o dinámica de tipo senoidal.*** Las deflexiones se miden a través de sensores inerciales de velocidad (geófonos), los equipos de este tipo más comúnmente empleados son el Dynaflect y el Calificador de Caminos (Road Rater), una desventaja es que dan lugar a deflexiones bajas no representativas, adicionalmente la frecuencia de la carga dinámica afecta la deflexión resultante, siendo generalmente difícil establecer una frecuencia de carga que sea representativa del paso de los vehículos.
- ***Medición de la respuesta a una carga dinámica de impacto.*** Se emplean geófonos para medir las deflexiones, el equipo que se utiliza es el FWD (Falling Weigh Deflectometer), una ventaja que tiene es su habilidad para modelar adecuadamente las cargas circulantes del tránsito tanto en magnitud como en duración, produciendo una deflexión causada por un vehículo en movimiento. Otras ventajas son su habilidad para medir el nivel de transferencia de carga en juntas y grietas, detecta la presencia de oquedades, registra la cuenca de deflexiones y la velocidad con que pueden realizarse las pruebas, por lo que lo hace el equipo más conveniente. Dentro de las versiones comerciales de este equipo se encuentran el Dynatest, el KUAB y el Phoenix FWD.
- ***Medición continua de la respuesta ante la aplicación de una carga rodante también continua.*** El aparato que se emplea es el RWD (Rolling Wheel Deflectometer), el cual mide deflexiones del pavimento continuamente y con buena precisión utilizando sensores a base de rayos láser, sin embargo, sus diferentes versiones actuales aún se encuentran en desarrollo.

Con el objeto de evaluar la aplicación de los equipos antes mencionados, se empleó la red carretera federal del Estado de Puebla, cuya longitud es del orden de 1,120 kilómetros, obteniéndose deflexiones mediante Viga Benkelman, así como por los deflectómetros de impacto marca Dynatest y KUAB, adicionalmente se obtuvieron valores de CBR (California Bearing Ratio) de las capas de base, subbase y subrasante de los pavimentos mediante excavación de pozos de exploración, cumpliendo con los estándares establecidos.

### 3. Comparación de Datos Obtenidos entre los Equipos Empleados.

- a) *Deflectómetros entre sí.* Para establecer las comparaciones, se realizaron mediciones en los mismos sitios de los dos carriles del tramo carretero federal entre el km 40 y 50 de la carretera federal Puebla - Huajuapán de León, obteniéndose deflexiones con el KUAB generalmente mayores a las obtenidas con el Dynatest. Un análisis sobre la congruencia de los datos medidos con los dos equipos se realiza a través del cálculo de las desviaciones medidas por cada sensor del KUAB en cada sitio, en relación con las deflexiones de referencia (medidas con el Dynatest), resultando que las desviaciones del KUAB para todos los sensores son muy significativas. Lo anterior hace evidente la necesidad de generar curvas de calibración entre las deflexiones medidas con distintos aparatos en caso de que deseen establecerse comparaciones entre ellas o con otros valores o procedimientos de referencia. Enfatizando la necesidad de introducir como una práctica a nivel nacional, la calibración de los aparatos de acuerdo con un procedimiento de referencia (estándar) con el fin de reducir las discrepancias de las mediciones y evaluaciones realizadas con distintos de ellos.
- b) *Deflectómetro contra CBR.* Se establecieron relaciones entre el módulo de resiliencia y el CBR para las distintas capas para los equipos Dynatest y KUAB, encontrándose valores menores de módulo de resiliencia para el segundo equipo. Dichas relaciones resultan congruentes con las recomendadas por la AASHTO.
- c) *Deflectómetro contra Viga Benkelman.* La Tabla 1 compara los valores promedio de las deflexiones obtenidas con Viga Benkelman, con las deflexiones promedio tanto del Dynatest como del KUAB. También presenta la desviación estándar de las deflexiones medidas, con los 3 aparatos. Cabe señalar que para éstos, las deflexiones fueron tomadas en condiciones ambientales similares (de temperatura, humedad, etc.).

**Tabla 1. COMPARACION DE LAS DEFLEXIONES PROMEDIO ENTRE LA VIGA BENKELMAN Y LOS DEFLECTOMETROS EMPLEADOS.**

APARATO	DEFLEXION PROMEDIO PARA UNA CARGA DE 6,274 KG (Milésimas de mm).	DESVIACION ESTANDAR (Milésimas de mm).
Viga Benkelman	856.50	213.00
Dynatest	838.00	238.00
KUAB	975.00	288.73

Como es evidente a partir de la información de la Tabla 1, la deflexión promedio de la Viga Benkelman es bastante similar a la del Dynatest y estas dos, un poco más bajas que las del KUAB. Lo mismo puede decirse en relación con las desviaciones estándar. Aunque los datos de la tabla anterior muestran valores bastante similares para las deflexiones medidas con los tres aparatos, este resultado no puede extrapolarse a las deflexiones específicas medidas por ellos en un mismo sitio, ya que las deflexiones de los deflectómetros sí fueron tomadas en el mismo sitio pero las de la Viga Benkelman fueron tomadas en sitios distintos a los explorados con los deflectómetros.

#### **4. Aplicación de la Evaluación Estructural a la Generación de Alternativas de Conservación.**

La generación de alternativas de conservación juega un papel esencial en los sistemas de administración o gestión de pavimentos (SGP), estas alternativas son el elemento que generalmente se ingresa en los análisis de factibilidad de cualquier nivel, para determinar aquella que resulte económicamente más conveniente.

##### **4.1 Evaluación de la Capacidad Estructural.**

Define la evolución de la calidad de servicio del pavimento en el momento de su evaluación, así como el momento en que requiere la primera acción de rehabilitación. Estos elementos son necesarios para la generación de estrategias de conservación que cubran el ciclo de vida considerado. Para este caso se utilizó el "retrocálculo" (obtención de módulos de resiliencia de todas las capas a partir de la cuenca de deflexiones), para la evaluación estructural del pavimento, transformando la capacidad en coeficientes estructurales de cada capa. La capacidad estructural actual del pavimento se obtiene con base en ciertos coeficientes dependientes de los módulos de resiliencia, así como del número estructural, el cual está en función de los distintos espesores de las capas del pavimento.

El número estructural, la calificación de servicio del pavimento en el momento de la evaluación (CSA) y el tránsito en el proyecto (así como las condiciones ambientales) se utilizaron para evaluar por tanteos el número estructural al inicio del período de comportamiento analizado (número estructural inicial), donde la AASHTO propone que el pavimento se



encuentra estructuralmente agotado cuando éste alcanza un valor de cero, o cuando se tenga un CSA final de 2.0 para alto tránsito y de 1.5 para menor tránsito.

#### 4.2 Generación de Alternativas de Conservación.

Como resultado de la etapa anterior, se obtiene un estimado de capacidad estructural remanente del pavimento en el momento de requerir la primera acción de rehabilitación, este proceso se realizó a través de tanteos. A partir de este instante, teóricamente pueden generarse una infinidad de alternativas de conservación para cubrir los requerimientos del tránsito y ambientales del siguiente período de comportamiento. La ecuación de daño de la ASSHTO para pavimentos flexibles permite estimar el correspondiente número estructural requerido sobre la subrasante; en este momento surgen las opciones de utilizar la fracción remanente de capacidad estructural del pavimento existente y completar la estructura requerida con una sobrecapa nueva de concreto asfáltico (reencarpetado), o desechar la estructura existente total o parcialmente y reconstruirla en su totalidad o sólo a partir de ciertas capas hacia arriba. La decisión en relación con estas opciones deberá tomarse con base en análisis del costo de ellas, que permita seleccionar la más económica.

El proyecto 1 es el tramo Amozoc - San Hipólito de 23 km, es de dos carriles y tiene un tránsito diario promedio anual (TDPA) de 10,500 vehículos, con 75% de automóviles, 5% de autobuses y 20% de camiones de carga. La tasa de crecimiento medio anual del tránsito (TCMA) es de 0.5%. La CSA del tramo es de 2.62. La estructura del pavimento está constituida por una carpeta asfáltica de 30 cm y una base de 14 cm de arcilla de alta compresibilidad, desplantada sobre una subrasante de mala calidad (CBR = 15). El horizonte de análisis seleccionado es de 15 años. Teniendo las siguientes alternativas:

- Alternativa 1. Acciones de rehabilitación en los años 0, 5 y 10.
- Alternativa 2. Una acción inicial y otra en el año 10.
- Alternativa 3. Una sola acción inicial.

El proyecto 2 es el tramo límite de los Estados Puebla y Morelos - Izúcar de Matamoros, de 31 km, es de dos carriles y tiene un TDPA de 3,920 vehículos, con 80% de automóviles, 5% de autobuses y 15% de camiones de carga. La TCMA del tránsito es de 3.1%. La CSA del tramo es de 3.48. La estructura

del pavimento está constituida por una carpeta asfáltica de 15 cm, una base de 15 cm de grava limosa compactada, una subbase de 30 cm de arena limosa; toda la estructura anterior desplantada sobre una subrasante, también de arena limosa, de mala calidad (CBR = 9). El horizonte de análisis como se señaló es de 15 años. Con las siguientes alternativas:

- Alternativa 1. Cubre los ocho últimos años del período de análisis.
- Alternativa 2. Acción inicial en el año 0 para abarcar el período total de 15 años.

#### 4.3 Evaluación Económica de Alternativas.

A partir de haber obtenido la capacidad estructural remanente del pavimento, se generan una infinidad de alternativas de conservación para cubrir los requerimientos del tránsito y ambientales del siguiente período de comportamiento. Se estimaron los costos de operación del flujo vehicular para cada uno de los años del período de análisis, de acuerdo con el valor de ISA (Índice de Servicio Actual) imperante en cada uno de ellos. Dichos valores se tomaron de estudios anteriores realizados en este instituto. Teniendo como resultado para cada alternativa un flujo anual de costos de operación para los 15 años del horizonte de análisis. Los costos anteriores se llevaron a valor presente aplicando una tasa de descuento que trata de considerar el valor del dinero en el tiempo (5%, descontando inflación). La comparación de alternativas se realizó comparando el costo total de las alternativas, en donde dicho costo es igual a la suma de los valores descontados de los costos constructivos y de operación incurridos en los distintos años del período de análisis.

La Tabla 2 resume la suma de costos descontados de construcción, de operación y total para las alternativas de ambos proyectos. También se muestra el ISA promedio en el tramo durante los 15 años del período de análisis.

A partir de la Tabla 2 son evidentes los siguientes aspectos:

- La preponderancia de los costos de operación vehicular en los costos totales (constituyendo más del 95% de estos últimos).

**Tabla 2. RESULTADOS DE ISA PROMEDIO Y COSTOS PARA CADA ALTERNATIVA EN CADA PROYECTO.**

PRO- YECTO	ALTER- NATIVA	ISA PROM.	SUMA DE COSTOS DESCONTADOS (MILES DE S / KM)					
			DE CONS- TRUCCION		DE OPE- RACION		TOTAL	
				%		%		%
1	1	3.14	2.6484	4.6	54.8022	95.4	57.4506	100.0
	2	3.17	1.8761	3.3	54.4027	96.7	56.2788	100.0
	3	3.22	1.3164	2.4	53.8622	97.6	55.1786	100.0
2	1	3.06	0.6464	2.7	23.0584	97.3	23.7048	100.0
	2	3.24	0.4322	1.9	22.3807	98.1	22.8129	100.0

- Aunque las alternativas de un mismo proyecto son prácticamente iguales, lo cual fundamentalmente se debe a que en todos los casos el ISA no se deja caer por debajo de 2.5, se observa una ligera tendencia a que las alternativas más convenientes sean aquéllas que más favorecen al mantenimiento permanente de una mejor calidad de servicio en el proyecto; es decir, aquéllas que resultan en menores costos anuales de operación vehicular durante el horizonte de análisis.
- En contraposición con la conveniencia para los costos de obra y de operación vehicular, de actuar de manera más definitiva para alcanzar mayores periodos de comportamiento, comúnmente se cuenta con la limitante de la escasez de recursos financieros. Esta realidad conduce a la selección de alternativas correspondientes a la postergación de la actuación y a la realización de las acciones menos duraderas y más frecuentes. Si bien es cierto que éstas representan costos iniciales más bajos, también lo es que conducen a soluciones menos eficientes económicamente. Una alternativa que permitiría controlar la magnitud de los costos totales en estos casos, aunque a expensas del incremento de los costos de obra globales durante el ciclo de vida, consistiría en mantener mediante acciones más frecuentes el ISA por encima de un valor relativamente elevado (ISA mayor de 2.5).

## 5. Conclusiones.

- Dados los problemas a los que se enfrenta el país, se considera que debe darse prioridad a las actividades de conservación de la red carretera principal, así como a su ampliación y modernización, ya que ésta es la que mayor sustento proporciona a la actividad económica nacional.
- Se recomienda que para la evaluación estructural de pavimentos se seleccione el equipo que más se adapte a las necesidades; dichos aparatos deben calibrarse con periodicidad para garantizar la confiabilidad de sus mediciones.
- En este trabajo se observa que las deflexiones obtenidas entre los diferentes aparatos de evaluación no destructiva, presentan una variación significativa, debido a sus diferentes características (sistema de aplicación de la carga, tiempo de duración de la carga, sistema de medición de las deflexiones, etc.), a las características de la estructura del pavimento, etc. Con el fin de minimizar estas discrepancias, sería recomendable introducir procedimientos de calibración de los resultados de los aparatos entre sí.
- En los análisis de comparación de deflexiones con los distintos aparatos se tomó como equipo de referencia al Dynatest, por ser uno de los que tienen mayor repetitividad y reproducibilidad.
- Por la importancia de los costos de operación en los costos totales del transporte, las estrategias más eficientes resultan ser aquellas que mantienen en mejor estado el nivel de servicio del pavimento durante el ciclo de vida; por lo tanto, son aquellas que consideran una actuación más inmediata y más duradera, ligadas con el suministro de estructuras iniciales fuertes y de refuerzos definitivos.
- Desde el punto de vista de los costos de conservación, éstos resultan menores si se puede aprovechar total o parcialmente la estructura existente. Cabe señalar que lo anterior sólo será posible si se cuenta con una estructura de capacidad remanente, adecuada, resultando de haber proporcionado al camino una estructura inicial adecuada y de actuar sobre ella de manera oportuna.

# 1. Introducción.

---

## 1.1. Antecedentes.

En la actualidad, México cuenta con una red carretera total de alrededor de 310,000 kilómetros, de los cuales 99,000 son pavimentados, 147,000 son revestidos, 14,000 se encuentran en terracería y los restantes 50,000 son brechas (Referencia 1). De los 99,000 kilómetros pavimentados, un poco más de 45,000 constituyen la fracción más importante, denominada como red carretera principal. Esta es la que en mayor proporción sustenta la actividad económica del país. En este trabajo fundamentalmente se hará referencia a esta fracción de la red.

En el momento presente se dice que la conservación de la red carretera principal, así como su ampliación y modernización, son actividades de mayor prioridad que la construcción de nuevos caminos (Referencia 2). Lo anterior se señala, dado que el tamaño de la red existente se considera suficiente para las necesidades actuales de cobertura del país.

Dos realidades han caracterizado a la conservación de la red de carreteras principales en México; una se refiere a la continua necesidad que ha existido de reforzar considerables porciones de la misma, y la otra se relaciona con la escasez de recursos que comúnmente ha prevalecido para realizar las inversiones necesarias. La primera se debe a que más del 55% de las carreteras principales tienen más de 30 años de servicio (y sólo el 15% tiene menos de 15 años), habiendo sido diseñadas y construidas utilizando normas y técnicas que en la actualidad ya han sido superadas ampliamente, por lo que sus propiedades geométricas y estructurales pueden considerarse como obsoletas para las necesidades actuales del transporte carretero moderno, en el cual es común la presencia de flujos vehiculares intensos con una significativa participación de vehículos muy grandes y pesados. La segunda se debe a que los recursos destinados a la conservación de la red principal históricamente han provenido del paquete fiscal que anualmente recauda el Gobierno Federal y que distribuye entre diversas actividades del desarrollo nacional, varias de las cuales se han considerado de mayor prioridad que la conservación de carreteras (educación, seguridad pública, etc), recibiendo por lo mismo la mayor proporción de dichos recursos, dejando a la conservación sólo una fracción marginal generalmente insuficiente; recientemente se han

analizado posibilidades para la creación de un fondo destinado específicamente a la conservación de las carreteras principales (por ejemplo, a través de cargos a los usuarios), que amplíe los recursos disponibles para esa actividad (Referencia 3).

La situación anterior, de grandes necesidades y significativa carencia de recursos, ha obligado a buscar métodos efectivos para la asignación eficiente de los siempre insuficientes recursos disponibles. Con este objetivo, la atención en los últimos años se ha dirigido hacia los denominados Sistemas de Gestión de Pavimentos (SGP).

Un SGP consiste de un conjunto integral y coordinado de actividades asociadas con la planeación, diseño, construcción, mantenimiento, evaluación e investigación de pavimentos (Referencia 4).

El propósito primordial de los SGP es encontrar una combinación de proyectos anuales para la red, que represente la solución económicamente más conveniente, tanto para la agencia gubernamental encargada de su conservación como para los usuarios, obviamente sujeto lo anterior al nivel de recursos disponibles y a otras restricciones que pudiesen existir (Referencia 4). Los SGP pueden evaluar varias estrategias, utilizando los efectos esperados de las medidas de mantenimiento y rehabilitación sobre el comportamiento futuro de la superficie de los caminos para identificar aquellas secciones que necesitan un tratamiento e identificar la combinación de medidas de mantenimiento y rehabilitación que proporcionen la condición global deseada de menor costo total (costo de las obras para la agencia responsable de llevarlas a cabo + costos de operación vehicular para los usuarios de los pavimentos), considerando las restricciones impuestas.

Las Referencias 4 y 5 describen ampliamente los objetivos y componentes básicos de los SGP. La gestión de pavimentos generalmente se desarrolla a dos niveles, el de red y el de proyecto.

El proceso de gestión a nivel de red tiene por objeto analizar el estado de toda la red a un nivel que permita establecer preliminarmente la estrategia de diseño inicial, mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción de menor costo total en las distintas secciones durante un cierto horizonte de análisis, a partir de un estudio de alternativas para cada una de ellas, permitiendo además seleccionar con base en un determinado criterio de priorización, las secciones que deberán repararse cada año y las acciones preliminares que deberán

emprenderse en ellas, considerando las restricciones existentes. El resultado fundamental de este proceso es la estimación de los costos de las obras y los presupuestos anuales requeridos para realizarlas. Esta información es esencial para la gestión de los recursos financieros necesarios.

El propósito de la gestión a nivel de proyecto consiste en determinar la estrategia definitiva de diseño inicial, mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción a emprender en cada una de las secciones en que deberá actuarse en un año determinado y las acciones definitivas a realizar en ellas, dado el financiamiento obtenido a partir de la gestión de recursos financieros realizada.

Los dos niveles anteriores de los SGP requieren de datos de evaluación de la condición presente de los pavimentos. Los datos necesarios para tomar decisiones a nivel de proyecto son generalmente más detallados que aquéllos requeridos para tomar decisiones a nivel de red. Ya que la recopilación de información de campo suele ser costosa, con el fin de reducir los costos de implementar un SGP, usualmente sólo se recolecta la cantidad mínima de datos requeridos y únicamente cuando son necesarios. Una buena estrategia en este sentido consiste en recolectar los datos mínimos requeridos para los análisis a nivel de red y posteriormente completarlos con información adicional de mayor detalle para los análisis a nivel de proyecto.

La función de la evaluación de pavimentos en un SGP es medir las respuestas de éstos periódicamente, con el fin de (Referencia 4):

- Proporcionar datos que permitan verificar las predicciones realizadas en el diseño de los pavimentos y actualizarlas en caso de ser necesario;
- Reprogramar las medidas de conservación según la actualización antes efectuada;
- Proporcionar datos para mejorar los modelos de diseño;
- Proporcionar datos para mejorar las técnicas de construcción y mantenimiento;
- Proporcionar información para actualizar los programas de mejoramiento de la red.

Por lo tanto, la evaluación de pavimentos es útil en las actividades de planeación y diseño de la administración o gestión de pavimentos y también en las de construcción y mantenimiento. Es un componente esencial de los SGP que proporciona los medios para determinar las necesidades tanto a nivel de red como de proyecto.

En la administración de pavimentos, básicamente existen los siguientes tipos de evaluación (Referencia 4):

- De la calidad del servicio proporcionada a los usuarios de un pavimento por su superficie de rodamiento en un momento determinado; a este tipo generalmente se le conoce como evaluación funcional; se realiza periódicamente (por ejemplo, anualmente) a través de algún tipo de calificación de servicio actual (CSA) o de medición del perfil del camino que conduzca a la obtención de un cierto índice de servicio actual (ISA); aunque CSA e ISA no son estrictamente lo mismo (ya que la primera es asignada por personas y el segundo es obtenido a partir de mediciones con equipos), en este trabajo frecuentemente se utilizan indistintamente;
- De daños; se refiere a la exploración visual y el registro de la frecuencia y severidad de los distintos tipos de daños presentes en un pavimento;
- Estructural; se refiere a la evaluación de la capacidad de una estructura de pavimento para soportar las cargas del tránsito; se realiza a través del análisis de los materiales que componen las capas del pavimento o mediante equipos que aplican una carga determinada al pavimento, midiendo su respuesta inmediata en términos de deflexiones; suele también complementarse con información de los daños en el pavimento ocasionados por las cargas del tránsito (Referencia 6). En el capítulo siguiente se hará una descripción detallada de los distintos procedimientos y equipos empleados para esta evaluación;
- De seguridad; en el contexto de los pavimentos, se maneja comúnmente a través de la medición de la resistencia al derrapamiento de la superficie de aquéllos, aunque también puede incluir factores tales como la profundidad de las roderas que pueden afectar el control de la dirección vehicular por parte del conductor, el potencial de deslizamiento cuando el pavimento se encuentra mojado o congelado, etc;



- De costos; se refiere a la determinación y el registro de los costos iniciales y futuros de construcción y conservación; suele llevarse por separado para las acciones de distinta envergadura (mantenimiento rutinario, conservación preventiva, conservación correctiva, etc).
- Estética; se refiere a la apreciación del diseñador y los usuarios sobre la apariencia del pavimento.

Los tipos de evaluación anteriores interactúan y, de hecho, tienen aspectos en común entre ellos. Tradicionalmente, los de mayor importancia han sido los tres primeros.

Este estudio trata de la evaluación estructural de los pavimentos, incluyendo el análisis detallado de diversas técnicas y equipos existentes para su realización. Es importante señalar que los métodos de evaluación estructural de pavimentos suelen clasificarse en destructivos y no-destructivos, dependiendo del nivel de alteraciones físicas al que se sujeta a los materiales de las capas del pavimento durante su evaluación. Los primeros involucran la ruptura del pavimento, al excavar en el mismo un “pozo a cielo abierto” para muestrear y probar, generalmente en el sitio (in-situ), los materiales componentes de las distintas capas. Los segundos se refieren a técnicas efectivas de evaluación que involucran la medición superficial de deflexiones o curvaturas (ante la aplicación de una cierta carga), combinada con la obtención de “calas” del pavimento, con el fin de obtener espesores y muestras de los materiales de las distintas capas que permitan probarlos posteriormente en el laboratorio; este tipo de evaluación no involucra alteraciones significativas de los materiales de las capas del pavimento.

Este trabajo se refiere fundamentalmente a evaluación estructural no-destructiva de pavimentos.

## **1.2. Descripción del Problema.**

En este trabajo se busca realizar una descripción de las técnicas y equipos que existen para la evaluación estructural no destructiva de pavimentos y comparar las ventajas y desventajas del uso de algunos de ellos, así como los resultados que producen.

### **1.3. Justificación.**

La realización de este estudio se justifica por la necesidad que tienen los diversos organismos encargados de la conservación de caminos en el país de contar con elementos que les permitan seleccionar las técnicas y equipos de evaluación estructural de pavimentos más adecuados a sus necesidades específicas. Asimismo se busca orientar la utilización de la información obtenida mediante esas técnicas y equipos, en la generación de alternativas de conservación.

### **1.4. Fundamentación Teórica.**

En los análisis teóricos que se realizan, se aplican principios de las siguientes áreas del conocimiento:

- La Ingeniería de Sistemas, en cuanto a que ésta proporciona las bases sobre las que se desarrollan gran parte de los conceptos de la administración de pavimentos y de la ingeniería de conservación de caminos.
- La Mecánica de Suelos, en cuanto a que esta disciplina de la ingeniería proporciona técnicas que permiten evaluar, in-situ o en el laboratorio, la calidad de los materiales de las capas de los pavimentos.
- La Mecánica de Materiales, en cuanto a que ésta proporciona modelos que a partir de mediciones superficiales de deflexiones o curvaturas, también permiten evaluar la calidad de los materiales de los pavimentos.
- El Análisis Estadístico de Datos, en cuanto a que esta disciplina permite analizar los datos provenientes de los distintos métodos de evaluación estructural considerados en este trabajo, compararlos entre sí y establecer las correlaciones pertinentes.

### **1.5. Objetivos del Trabajo.**

Los objetivos específicos de este trabajo son:

- Realizar una investigación detallada sobre algunas de las técnicas existentes para la evaluación estructural de pavimentos, obteniéndose para ellas datos sobre sus características particulares (potencialidades, limitaciones, costos, etc).
- Analizar y comparar entre sí, los datos obtenidos con algunos de los métodos anteriores en la red de carreteras federales del Estado de Puebla.
- Ilustrar la utilización de la información anterior, analizar y comparar entre sí, los datos obtenidos con algunos de los métodos anteriores en la red de carreteras federales del Estado de Puebla.

## **1.6. Hipótesis del Trabajo.**

Pueden identificarse las siguientes tres hipótesis en este trabajo:

- Que mediante la evaluación estructural es posible detectar problemas estructurales actuales en el pavimento, anticipar problemas futuros de la misma índole y determinar las medidas de refuerzo necesarias.
- Que la teoría elástica aplicada a sistemas multicapa puede utilizarse para predecir el comportamiento de los pavimentos ante la aplicación de cargas, por lo cual puede emplearse junto con las deflexiones medidas en pavimentos para determinar las propiedades de resistencia de las capas.
- Que los Métodos de la AASHTO (Referencia 7) pueden emplearse, a partir de información obtenida mediante métodos de evaluación estructural no-destructiva y otros tipos de datos, para generar alternativas de conservación para un proyecto carretero considerado.

Los análisis mostrados en este trabajo de alguna manera validan la veracidad de las hipótesis anteriores.

## **1.7. Alcances.**

Los alcances de este trabajo están contenidos en los siguientes capítulos que lo constituyen:

- Este capítulo muestra la introducción, en la cual se describen brevemente los principios básicos de la administración de pavimentos y se ubica a la actividad de la evaluación estructural dentro del contexto de esta disciplina. Se presenta también el problema específico que se aborda, la justificación del tema, algunos detalles de las hipótesis y la fundamentación teórica del trabajo, así como los objetivos y alcances particulares del mismo.
- El Capítulo 2 señala una serie de principios de la evaluación estructural de pavimentos, así como algunos criterios para realizarla. Describe también los métodos y equipos más comunes empleados en la evaluación estructural no-destructiva, indicándose sus características más relevantes.
- En el Capítulo 3 se analizan los datos provenientes de la excavación de “pozos a cielo abierto” en la red carretera federal del Estado de Puebla (evaluación destructiva), así como la información de deflexiones obtenida con tres equipos diferentes (evaluación no-destructiva). Se establecen comparaciones y relaciones entre los resultados obtenidos con las distintas técnicas.
- En el Capítulo 4 se establecen los principios para la aplicación de los Métodos de la AASHTO en la generación de alternativas de conservación para un proyecto carretero dado, a partir de información de evaluación estructural no-destructiva y otros tipos de datos.
- El Capítulo 5 presenta las conclusiones y recomendaciones más importantes derivadas de los análisis realizados en este estudio.

Los análisis de deflexiones referidos en los Capítulos 3 y 4 sólo se realizan para los tres equipos de medición a que puede tenerse acceso actualmente en México.

## **2. Principios de Evaluación Estructural.**

---

### **2.1. Consideraciones Básicas.**

#### **2.1.1. Aspectos Generales.**

Hay varias razones para evaluar la capacidad estructural de los pavimentos y muchas maneras de hacerlo. En cada caso, sin embargo, el primer paso consiste en supervisar o medir algunas características del pavimento. Así, la evaluación involucra el análisis de los datos obtenidos, a través de algún proceso teórico o empírico, para estimar con un razonable grado de precisión la capacidad de carga y la vida de servicio del pavimento bajo las condiciones esperadas del tránsito.

En relación con el tema de la evaluación estructural, es importante tomar en cuenta las necesidades de la red total de carreteras de la unidad administrativa considerada (el país, un estado, un municipio, etc.) y las necesidades de un proyecto en particular dentro de la red. Por ejemplo, el comportamiento de los tramos de la red bajo diferentes acciones o la asignación de recursos se determinarán a partir de análisis a nivel de red y estos criterios de decisión eventualmente influirán en la disponibilidad de fondos para la rehabilitación de algún proyecto en particular. Los sistemas de administración o gestión de pavimentos (SGP) deben incluir procedimientos para analizar la red en su conjunto, por lo menos al suficiente nivel de detalle para establecer una imagen inicial que permita definir proyectos candidatos. Asimismo, las decisiones sobre las acciones específicas de mantenimiento a realizar en cada proyecto deberán tomarse con base en información más detallada. Por lo tanto, los SGP deben tomar en cuenta los requerimientos de información tanto del nivel de red como del nivel de proyecto (Referencia 4).

Este capítulo describe brevemente varios de los métodos más comunes para la evaluación estructural no destructiva y destructiva de pavimentos.

#### **2.1.2. Supervisión de la Red de Pavimentos.**

El primer paso en cualquier evaluación estructural es encontrar un indicador con el cual trabajar. Sus valores específicos para los diferentes segmentos de la red bajo estudio pueden obtenerse a partir del plan general de supervisión

de la red, aplicable a todos los tipos de datos de evaluación (Referencia 4). La supervisión estructural casi siempre se realiza a través de la medición de deflexiones o curvaturas de la superficie del pavimento, bajo cargas estáticas o repetidas (dinámicas).

La necesidad de realizar una evaluación estructural puede ser señalada por otros tipos de evaluación, tales como la revisión de la calidad de servicio de la superficie o la supervisión de los daños sobre la misma. Como otro ejemplo, si la resistencia al derrapamiento cae por debajo de un cierto nivel aceptable, indicando ésto la necesidad de mantenimiento o rehabilitación, un buen administrador de pavimentos realizará una evaluación estructural antes de proceder al diseño, con el fin de asegurar que el dinero se gaste convenientemente. Sería absurdo proporcionar una delgada superficie con buena resistencia al derrapamiento para restaurar la seguridad, sin antes verificar la condición estructural, ya que el pavimento existente pudiese ser inadecuado para resistir las cargas pronosticadas del tránsito. De esta manera, podría requerirse una sobrecarpeta gruesa o aún una reconstrucción, en lugar de sólo una simple capa para restaurar la fricción, a menos que ésta sea parte de un mejoramiento planeado por etapas.

### **2.1.3. Criterios para Realizar una Evaluación Detallada.**

En el programa de evaluación preliminar o de nivel de red se requieren algunos valores límite o criterios que ayuden a determinar el momento en que deba realizarse una evaluación más detallada. Estos pueden ser indicadores provenientes de otros tipos de evaluación, pero para supervisión estructural comúnmente se utilizan niveles límite de deflexión para una prueba de carga específica. Con este fin, puede también emplearse la información proveniente de otros tipos de evaluación periódica (anual, bianual, etc.), como la de resistencia al derrapamiento, calidad de servicio de la superficie y el registro de daños sobre la misma. Estos elementos deben ser complementados con la continua observación del ingeniero de mantenimiento vial, una parte muy importante del equipo de administración de pavimentos, quien debe reportar cualquier cambio rápido o inusual en el comportamiento o condición de los pavimentos (Referencia 5).

### **2.1.4. Evaluación Funcional contra Estructural.**

Tanto la evaluación funcional (de la calidad del servicio proporcionada a los usuarios de un pavimento por su superficie de rodamiento) como la estructural son importantes, complementándose entre ellas en vez de reemplazarse. Una observación de nivel de servicio por debajo de un cierto límite aceptable es una forma de detectar la necesidad de realizar una evaluación estructural. Un pavimento rugoso puede ser fuerte y requerir únicamente una capa de nivelación sobre su superficie, o puede ser estructuralmente débil y requerir ser reemplazado o de la colocación de una sobrecarpeta gruesa. La evaluación estructural se requiere para determinar la respuesta a lo anterior. Para completar la interrelación, la evaluación estructural debe ser capaz de predecir la capacidad del pavimento de soportar cargas y su proyección de vida para el tránsito esperado.

### **2.1.5. Evaluación Destructiva contra No-Destructiva.**

La clasificación de los métodos de prueba en no-destructivos o destructivos es común en la ingeniería de materiales. La diferencia entre estos métodos depende normalmente de la alteración física de los materiales. En pavimentos, la evaluación destructiva significa la destrucción del pavimento mediante la excavación de un pozo para muestreo y prueba de los materiales del pavimento, usualmente en el lugar.

Muchas técnicas efectivas de evaluación involucran la medición de deflexiones o curvaturas de la superficie de rodamiento bajo cargas estáticas o dinámicas, combinándolas con pequeños corazones o testigos para obtener los espesores y muestras de los materiales subyacentes para probarlos posteriormente en el laboratorio. Estos métodos serán considerados como no destructivos en discusiones subsiguientes, ya que no involucran alteraciones graves del pavimento.

### **2.1.6. Enfoques Analíticos para la Evaluación Estructural.**

En principio, es importante reconocer que existen muchos métodos analíticos para la evaluación estructural de pavimentos. Las cuatro clases más importantes de ellos son (Referencia 4):

- La comparación empírica del comportamiento medido, usualmente deflexiones, con deflexiones permisibles estimadas a partir del comportamiento pasado observado de pavimentos.

- La comparación del comportamiento medido (generalmente deflexiones) contra criterios permisibles calculados a partir de modelos de sistemas multicapa, usualmente en términos de deflexiones.
- El uso de un método de diseño existente para estimar la vida remanente de un pavimento o su capacidad para soportar cargas de tránsito, a partir del comportamiento observado (generalmente deflexiones).
- Métodos combinados que utilizan pruebas de materiales para generar datos de entrada a análisis teóricos de fatiga y mediciones de comportamiento (generalmente deflexiones) para proporcionar criterios límite.

Los tres primeros enfoques han sido usados exitosamente bajo condiciones limitadas. Estos son difíciles de adaptar a cambios en los materiales, los medios ambientes o los límites de carga. El cuarto método ofrece la solución más general al problema de la evaluación estructural. La Referencia 6 muestra una serie de recomendaciones sobre el método analítico más adecuado a emplear en distintos casos.

## **2.2. Evaluación Estructural No Destructiva.**

Una evaluación de la capacidad estructural y para soportar cargas de tránsito de un pavimento existente y de sus componentes sin perturbar o destruir dichos componentes es sumamente conveniente. Para realizarla, deben tomarse mediciones en o cerca de la superficie del pavimento, y los resultados de ellas relacionarse de alguna manera con las propiedades estructurales de la sección de pavimento. Las mediciones de la respuesta de una estructura de pavimento a una fuerza externa o transmisión de energía son generalmente referidas como “no-destructivas”, porque la estructura del pavimento no es alterada por las mediciones y tales mediciones pueden ser repetidas tantas veces como sea necesario. Los métodos de prueba no-destructivos son generalmente clasificados en cinco categorías generales:

- Medición de la respuesta a una carga estática o a la aplicación simple de una carga con movimiento lento.



- Medición de la respuesta a una carga compuesta por una parte estática y otra repetida o dinámica de tipo senoidal.
- Medición de la respuesta a una carga dinámica de impacto.
- Medición continua de la respuesta ante la aplicación de una carga rodante también continua.

De alguna manera, el orden anterior de presentación señala la secuencia en que dichos métodos han sido desarrollados tecnológicamente y utilizados en la práctica de la conservación vial.

La Tabla 2.1 muestra las características básicas de algunos equipos existentes de evaluación estructural no-destructiva de pavimentos; todos ellos pueden adquirirse desde México. Los factores básicos que deben considerarse en la selección de un equipo determinado son (Referencia 6):

- Características operativas (capacidad de recolección y almacenamiento de datos, demoras causadas al tránsito, requisitos de calibración, facilidad para ser transportado y necesidades de capacitación de los operadores).
- Calidad de los datos (conveniencia, repetibilidad y precisión).
- Versatilidad (número de sensores, configuración y movilidad del sistema de sensores y rango de niveles de carga).
- Costo (inicial y por secuencia de pruebas).

### **2.2.1. Equipos para la Medición de Deflexiones bajo Carga Estática o con Movimiento Lento.**

La respuesta de un pavimento a la aplicación sencilla de una carga estática o de una carga de movimiento lento generalmente se obtiene midiendo la deflexión de la superficie del pavimento bajo la carga. Hay numerosos instrumentos que se han empleado para hacer estas mediciones, siendo los más comunes la Viga Benkelman, el Deflectómetro Viajero y el Deflectógrafo de Lacroix. Los principios básicos de operación de cada uno de estos aparatos es similar.

Tabla 2.1 Características Básicas de Equipos para la Evaluación Estructural No Destructiva de Pavimentos.

Aparato	Tipo de Unidad	Carga Principal	Sistema de Carga	Carga Estática (kg)	Fuerza Dinámica (lbf)	Carga Transmitida por	Dispositivo para la Lectura	Método para la Recolección de Datos
Viga Benkelman	Operación Manual	Rueda en Movimiento	Camión cargado	(a)	N / A	Ruedas de Camión	Manómetro *	Manual
Deflectómetro Viajero de California	Control Automatizado	Rueda en Movimiento	Camión Cargado en Movimiento	(a)	N / A	Ruedas de Camión	Traductor de Deflexiones	Manual, Impreso o Automatizado
Deflectógrafo La Croix	Control Automatizado	Rueda en Movimiento	Camión en Movimiento Cargado con Blocks o Agua	(a)	N / A	Ruedas de Camión	Traductor de Deflexiones	Manual, Impreso o Automatizado
Dynalect	Montado en Remolque	Vibración Uniforme (frecuencia-8Hz)	Vibración por Rotación de Masas	953	1,000	Dos Ruedas de Acero (diam. 40 cm) Cubiertas de Uretano	5 Geófono	Manual, Impreso o Automatizado
Model 400 B Road Rater	Montado en Remolque	Vibración Uniforme (frecuencia-6-60Hz)	Movimiento de Masas por Sistema Hidráulico	1,090	200- 3,000	Dos blocks de 10*17.5 cm	4 Geófono	Manual, Impreso o Automatizado
Model 2000 Road Rater	Montado en Remolque	Vibración Uniforme (frecuencia-6-60Hz)	Movimiento de Masas por Sistema Hidráulico	1,589	200- 5,500	Plato Circular (diam. 45 cm)	4 Geófono	Manual, Impreso o Automatizado
Model 2008 Road Rater	Montado en Remolque	Vibración Uniforme (frecuencia-5-80Hz)	Movimiento de Masas por Sistema Hidráulico	3,405	500- 9,000	Plato Circular (diam. 45 cm)	4 Geófono	Manual, Impreso o Automatizado
KUAB150 FWD	Montado en Remolque	Impacto	Caída de masas	908	2,700-11,300	Plato Circular (diam. 30 cm)	Mas de 5 Sismómetros	Manual, Impreso o Automatizado
KUAB50 FWD	Montado en Remolque	Impacto	Caída de masas	908	2,700-33,700	Plato Circular (diam. 30 cm)	Mas de 12 Sismómetros	Manual, Impreso o Automatizado
Dynatest 8000 FWD	Montado en Remolque	Impacto	Caída de masas	908	1,500-27,000	Plato Circular (diam. 30 cm)	7 Geófono	Manual, Impreso o Automatizado
Dynatest 800 FWD	Montado en Remolque	Impacto	Caída de masas	908	6,500-19,000	Plato Circular (diam. 30 cm)	7 Geófono	Manual, Impreso o Automatizado
Phoenix ML10000 FWD	Montado en Remolque	Impacto	Caída de masas	863	2,300-23,000	Plato Circular (diam. 30 cm)	3 ó 6 Geófono	Manual, Impreso o Automatizado
CEBTP Curviometer	Control Automatizado	Rueda en Movimiento	Camión en Movimiento Cargado con Placa de Acero	(a) ó Variable	N / A	Ruedas de Camión	1 Geófono	Automatizado

La punta de una viga de sondeo de 8 a 10 pies de longitud es colocada sobre la superficie del pavimento muy cerca de la llanta cargada o en una posición tal que la llanta cargada pase lo más cerca posible de ella. Para ejes de ruedas duales, la punta de la viga usualmente se coloca entre las dos llantas. Al pasar la llanta cerca de la punta de la viga, el movimiento de la superficie del pavimento es registrado por una rotación angular de la viga.

#### 2.2.1.1. Viga Benkelman.

La Viga Benkelman, desarrollada durante la prueba de carreteras WASHO (Referencia 8), es un instrumento sencillo de operación manual y es probablemente el método más usado para medir deflexiones en pavimentos. Consiste básicamente en una palanca simple sujeta a un marco de aluminio ligero o de madera que puede ser movido a mano. Este aparato se ilustra en la Figura 2.1. Típicamente, la punta de sondeo se coloca entre las llantas duales y el movimiento de la viga se observa en un medidor, el cual registra la deflexión máxima con una aproximación de 0.001 pulgadas. Típicamente la carga aplicada por las llantas duales es de 4,086 kg, equivalente a una carga por eje sencillo dual de 8,172 kg (18,000 lb). Es particularmente importante asegurar que los apoyos de la viga no se encuentren dentro de la cuenca de deflexiones o zona de influencia de las llantas cargadas en el momento de realizar la lectura inicial de la viga. Por esta razón, en la prueba de la AASHO (Referencia 9) y en estudios canadienses (Referencias 10 y 11) se desarrolló un procedimiento en el cual la punta de la viga se coloca en el sitio en el que se determinará la deflexión e inmediatamente entre las llantas dobles. Se fija el medidor y se aleja el vehículo cargado del sitio, registrándose en el medidor el movimiento hacia arriba de recuperación del pavimento.

Este equipo es versátil, simple, barato de operar y actualmente se tiene una gran experiencia derivada de su uso durante muchos años; sin embargo, por ser un método de medición relativamente estático, es bastante difícil de utilizar en caminos de tránsito elevado con vehículos que circulan a gran velocidad; otras desventajas se refieren a la dificultad para asegurar que los soportes de la viga no se encuentren en la cuenca de deflexiones, a la incapacidad del aparato para determinar la forma y tamaño de dicha cuenca, a la escasa repetibilidad de las medidas obtenidas, a que su uso generalmente requiere de mano de obra intensiva y suele ser fastidioso, a que el método estático o casi estático de aplicación de la carga no representa adecuadamente

los efectos de las cargas circulantes del tránsito y a que no permite fácilmente determinar el nivel de transferencia de carga en juntas y grietas de pavimentos rígidos (Referencia 6).

El costo actual de la Viga Benkelman es de poco menos de 3,000 dólares.

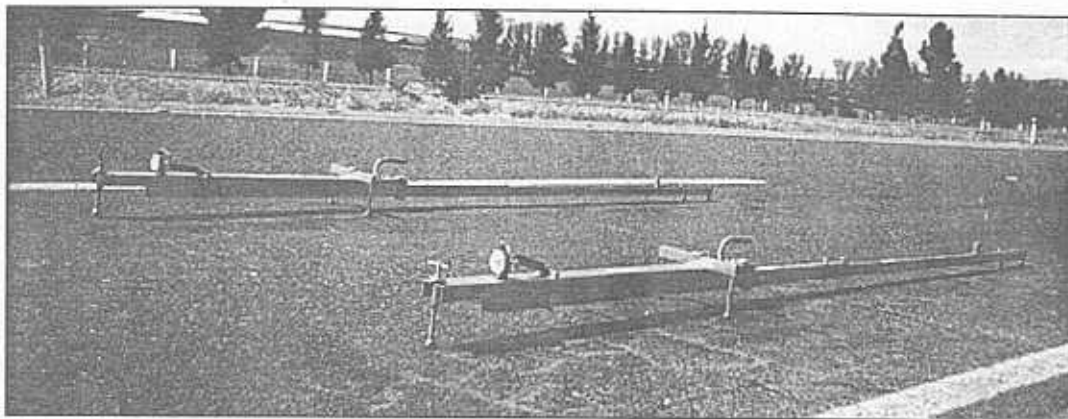


Figura 2.1 Vigas Benkelman para medir deflexiones.

#### 2.2.1.2. Deflectómetro Viajero.

El deflectómetro viajero es un aparato automático para medir deflexiones desarrollado por la División de Carreteras de California, que opera bajo los mismos principios de la Viga Benkelman (Referencia 12). Combina una unidad camión-remolque con un simple eje trasero cargado con 18,000 lbs o alguna otra carga deseada y con un aparato tipo Viga Benkelman sujeto al remolque. La unidad es capaz de avanzar automáticamente a lo largo del camino e ir colocando continuamente la punta de sondeo bajo las llantas cargadas. Este aparato es un instrumento electromecánico que mide las deflexiones del pavimento cada 20 pies a lo largo de la carretera, a medida que el vehículo viaja uniformemente a una velocidad aproximada de 0.5 millas por hora (mph). Las deflexiones se registran con un nivel de precisión de 0.001 pulgadas (en papel gráfico) por medio del brazo de la viga. Varios tipos de instrumentos electrónicos de almacenamiento de información se han utilizado con varios modelos de este aparato, pero ello de ninguna manera afecta los principios de operación del mismo. Según informes de la División de Carreteras de California, pueden tomarse entre 1,500 y 2,000 mediciones

individuales durante una jornada promedio de labores con un solo deflectómetro, un camión y una cuadrilla de dos personas.

### 2.2.1.3. Deflectógrafo de Lacroix.

El deflectógrafo de Lacroix es también un deflectómetro de registro automático. Opera bajo el principio de la Viga Benkelman pero se mueve a lo largo de la carretera a velocidad constante, de manera similar al deflectómetro viajero. Este aparato fue desarrollado por el Laboratorio Nacional de Caminos y Puentes en París, Francia, y se utiliza ampliamente en ese país, así como en Gran Bretaña. Va montado en un vehículo de carga, registrando las deflexiones al viajar a una velocidad de 1.8 km/h. El aparato cuenta con dos Vigas Benkelman, una a cada lado del vehículo. Inicialmente la punta de sondeo de éstas se hace descansar sobre el pavimento, delante del eje trasero del vehículo en tres puntos ubicados fuera de la zona de influencia de la carga. Al avance del vehículo se registra la deflexión hasta que los pares de llantas de cada lado llegan al nivel de las puntas de sondeo de las vigas. Estas son levantadas y llevadas nuevamente hacia adelante a una velocidad del doble de la del vehículo y colocadas sobre el pavimento en su posición inicial frente al vehículo para una nueva medida, sin que éste interrumpa su movimiento. Este aparato se muestra en la Figura 2.2.



**Figura 2.2** Equipo Automatizado para Medir Deflexiones Desarrollado en Francia (Deflectógrafo de Lacroix).

Este aparato ha demostrado ser muy útil y práctico para medir deflexiones. De manera similar al Deflectómetro Viajero, pueden tomarse con él cerca de 2,000 mediciones individuales por jornada de trabajo. Su costo actualmente es de alrededor de 500,000 dólares, incluyendo todo el equipo (vehículo, sistema electro-mecánico de medición, sistema de almacenamiento de datos, etc).

#### **2.2.1.4. Otros Equipos.**

Otros equipos de diversa índole han sido utilizados en el pasado para medir o estimar deflexiones y seguramente otros también serán desarrollados en el futuro. En cada caso, es altamente necesario verificar la precisión y repetibilidad de tales equipos antes de utilizar las mediciones resultantes. Cualquier aparato para la medición de deflexiones que se evalúe y calibre cuidadosamente, puede utilizarse para registrar deflexiones bajo carga estática. Los datos resultantes deflexión-carga pueden ser analizados posteriormente en muy diversas formas.

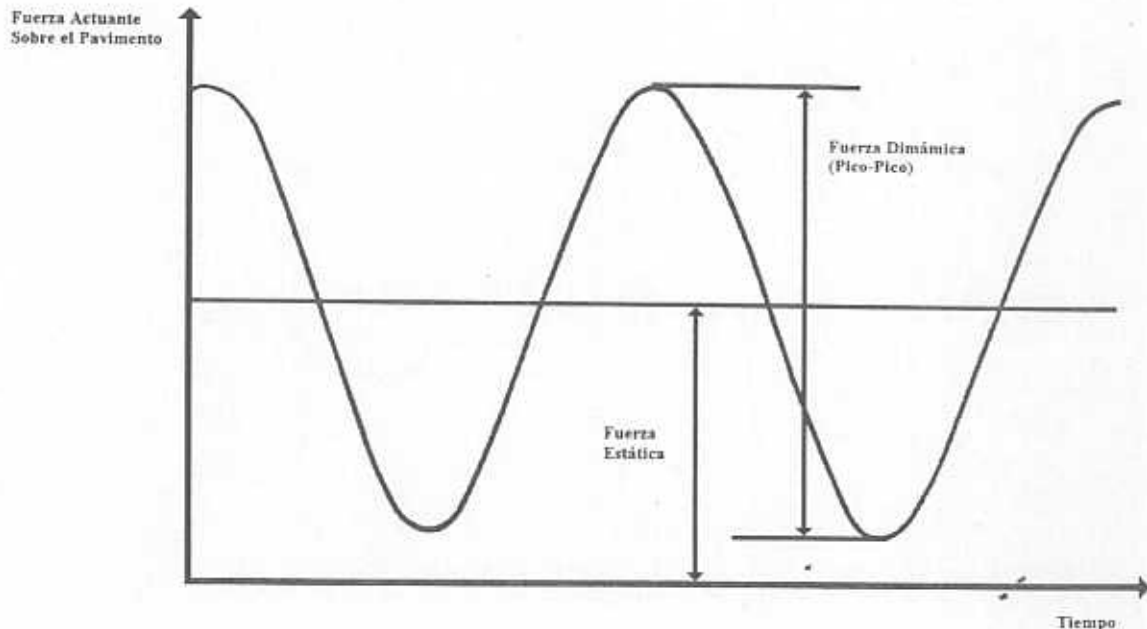
Las pruebas de carga a través de platos, las cuales se han utilizado muy ampliamente por organismos aeroportuarios, también pueden emplearse. Esta prueba puede ser no-destructiva si se aplica sólo a la superficie del pavimento, aunque puede ser destructiva si se aplica a las capas inferiores (sobre la superficie de la base, la subbase o la subrasante).

#### **2.2.2. Equipos para la Medición de Deflexiones bajo Carga Dinámica Estable.**

Estos aparatos aplican una precarga estática (peso estático del aparato) y una vibración senoidal al pavimento mediante un generador de fuerza dinámica. Lo anterior se ilustra en la Figura 2.3. Para asegurar que el equipo no brinque sobre la superficie del pavimento, la magnitud de la fuerza dinámica valle-a-cresta debe ser menor que dos veces la precarga estática. Consecuentemente, esta última debe incrementarse si la fuerza dinámica valle-a-cresta se incrementa.

Los equipos de este tipo más comúnmente empleados son el Dynaflect y el Calificador de Caminos (Raod Rater). En éstos, las deflexiones generalmente se miden a través de sensores inerciales de velocidad denominados geófonos. Estos sensores son pequeños, siendo posible colocar varios de ellos cerca del generador de fuerza dinámica y registrar la cuenca de

deflexiones en las inmediaciones del área cargada. En estos equipos, hay dos métodos comunes de generación de fuerza: mecánica a través de pesos rotantes en sentidos opuestos e hidráulica a través de una bomba hidráulica y un generador de fuerza.



**Figura 2.3** Curva Típica de la Generación de Fuerza Bajo Carga Dinámica Estable.

La secuencia normal de operación consiste en trasladar el aparato al punto de prueba e hidráulicamente bajar las ruedas de carga y los geófonos a la superficie del pavimento. Se realiza la prueba, se registran los datos y el aparato se traslada al siguiente sitio de prueba.

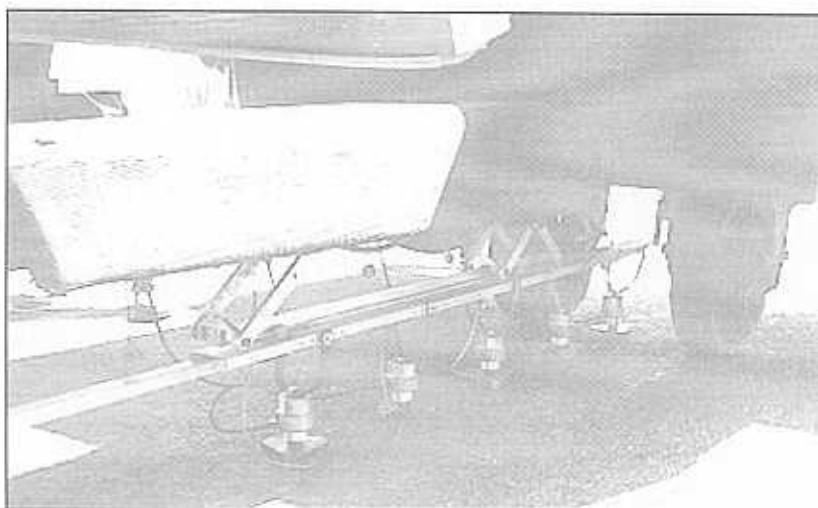
Este tipo de equipos representan un avance en relación con los equipos de toma de deflexiones bajo carga estática (ya que no necesitan un punto de referencia). Sin embargo, la precarga estática en este caso todavía presenta algún problema técnico. Este consiste en que dicha carga es relativamente grande en comparación con la carga dinámica valle-a-cresta. Dado que la mayoría de los materiales son sensibles a los esfuerzos (los suelos finos se ablandan bajo carga y los gruesos por lo contrario se endurecen), su estado de esfuerzos y su rigidez pueden ser modificados por la precarga estática. Adicionalmente esta última puede cerrar algunas oquedades existentes debajo de los pavimentos, dando lugar a deflexiones bajas no representativas. Finalmente, la frecuencia de la carga dinámica afecta la deflexión resultante,

siendo generalmente difícil establecer una frecuencia de carga que sea representativa del paso de los vehículos.

#### 2.2.2.1. Dynaflect.

En este aparato, la carga cíclica es generada mediante ruedas desbalanceadas que giran en direcciones opuestas a 480 revoluciones por minuto (rpm). La magnitud de la carga cíclica generada es de 1,000 lb valle-a-cresta. Las deflexiones resultantes son obtenidas mediante 5 geófonos colocados sobre la superficie del pavimento, separados 12 pulgadas entre sí. En la Figura 2.4 se ilustra este equipo. Las deflexiones obtenidas con él han sido frecuentemente correlacionadas con las obtenidas usando la Viga Benkelman; sin embargo, tales correlaciones han variado significativamente entre organismos que las han desarrollado. Algunas limitaciones técnicas de este aparato incluyen su incapacidad para permitir variaciones en la magnitud y frecuencia de la carga cíclica; además, la deflexión directamente bajo la carga no puede ser medida y es difícil determinar el área de contacto.

Este equipo cuesta actualmente entre 30,000 y 50,000 dólares.



**Figura 2.4 Equipo para la Medición de Deflexiones bajo Carga Dinámica Estable (Dynaflect).**

#### 2.2.2.2. Calificador de Caminos (Road Rater).

Este equipo es manufacturado por la Corporación Wile de los Estados Unidos. En este caso, la generación de la fuerza cíclica es hidráulica (así como también en el Vibrador Cox, manufacturado por la Empresa Cox e



Hijos y en el Vibrador de Carga Pesada WES construido y operado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos).

El Road Rater es también un equipo de medición de deflexión vibratorio estático que se coloca en un trailer y es tirado por un vehículo. Los modelos viejos se colocan en la parte delantera del vehículo. Las máximas cargas estáticas son 2,400 lbs y 5,800 lbs para los modelos 400B, 2,000 y 2,008, respectivamente. Se carga el pavimento a través de un plato metálico, cuyas dimensiones standard son paneles metálicos de 4 x 7 pulgadas (102 x 178 mm) con un espacio central de 0.55 pulgadas (14 mm) de diámetro para los modelos 2,000 y 2,008. El generador de fuerza dinámica utiliza una masa metálica rellena de plomo que se acelera hacia arriba y hacia abajo hidráulicamente y tanto la amplitud como la frecuencia pueden ser cambiadas por el operador, lo que permite lograr cargas dinámicas de 500 a 3,000 lbs para el modelo 400 B, de 1,000 a 5,500 lbs para el modelo 2,000 y de 1,200 a 8,000 lbs para el modelo 2,008. La frecuencia de carga puede variarse continuamente de 5 a 70 ciclos por segundo. La deflexión se mide utilizando por lo menos cuatro geófonos que se encuentran en el centro del área cargada y por lo general espaciados a partir de ese punto 30 cm.

### 2.2.2.3. Otros Aparatos.

Algunos otros aparatos de aplicación de fuerza senoidal de frecuencia variable que se han empleado en diversas partes del mundo consisten en analizar las características de las ondas que se propagan bajo la aplicación de la carga variable. A partir de la longitud de las ondas que se generan, se obtienen los módulos dinámicos de las diferentes capas del pavimento utilizando teoría elástica multicapa.

### 2.2.3. Equipos para la Medición de Deflexiones bajo Carga de Impacto (Deflectómetro de Impacto "Falling Weight Deflectometer, FWD").

El deflectómetro de impacto es un equipo de medición que levanta un peso hasta una altura determinada sobre una guía y lo deja caer. Dicho peso choca contra un plato especialmente diseñado, transmitiendo la fuerza al pavimento para producir un pulso de onda que se aproxima a lo que ocurre en la realidad. La magnitud de la carga puede variarse de 1,500 a 24,000 lbs (680 a 10,886 kg) en los equipos comúnmente utilizados en calles y caminos, variando la magnitud del peso que se deja caer o la altura desde donde se le deja caer. La

carga se transmite a un plato de carga de 40 cm de diámetro para carreteras y de 45 cm para pavimentos de aeropuertos; un sensor de tensiones mide la magnitud de la carga. Dentro de las versiones comerciales de este aparato se cuentan el Dynatest, el KUAB y el Phoenix FWD.

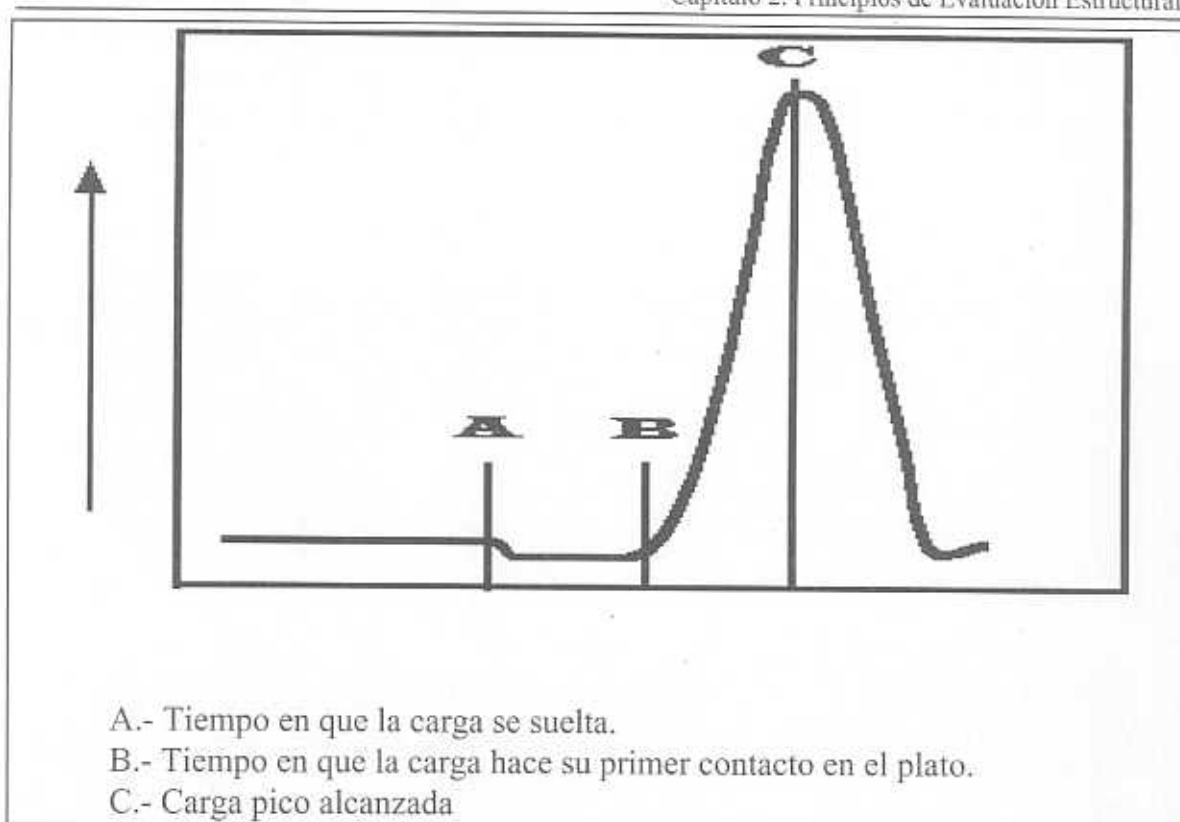
Las deflexiones se miden utilizando hasta siete geófonos que se colocan en línea recta a distancias variables en una barra y se bajan automáticamente hasta la superficie del pavimento con el plato de carga. Un sensor se coloca en el centro del plato y los otros en diferentes sitios entre dicho sensor y una distancia de hasta 2.25 m. Todo el sistema se coloca en un trailer.

En la secuencia normal de operación, el aparato se mueve al sitio de prueba y el plato y los geófonos son bajados hidráulicamente hasta colocarlos sobre el pavimento. Se realizan las pruebas correspondientes a las combinaciones de pesos y alturas seleccionados. Se levantan hidráulicamente el plato de carga y los sensores y el aparato se mueve al siguiente sitio de prueba.

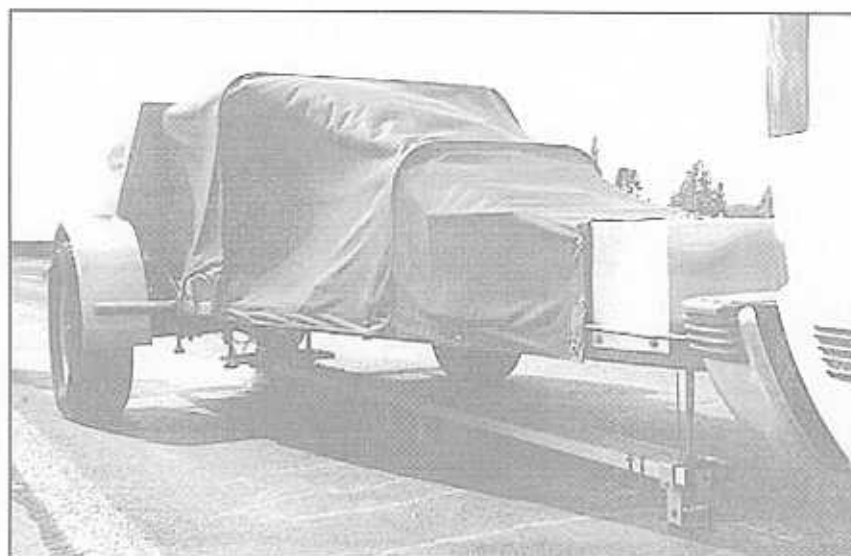
Una ventaja de estos aparatos es su habilidad para modelar adecuadamente las cargas circulantes del tránsito tanto en magnitud como en duración, produciendo una deflexión que simula la deflexión causada por un vehículo en movimiento. Asimismo, como se ilustra en la Figura 2.5, la precarga estática debida al peso propio del equipo es relativamente pequeña en comparación con la fuerza dinámica de impacto generada. Obviamente la precarga estática varía dependiendo del equipo utilizado, pero está generalmente en el rango del 8 al 18% de la carga máxima dinámica de impacto (antes de soltar los pesos). Durante el período en que los pesos se dejan caer, la precarga se reduce a entre 5 y 14% de la carga máxima de impacto.

El FWD tiene otras ventajas que lo hacen el equipo más conveniente actualmente, como es su habilidad para medir el nivel de transferencia de carga en juntas y grietas, detectar la presencia de oquedades, su habilidad para registrar la cuenca de deflexiones y la velocidad con que pueden realizarse las pruebas. Algunas versiones permiten obtener el espesor de las capas del pavimento mediante la realización de calas. La Figura 2.6 ilustra una de las versiones comerciales de este equipo.

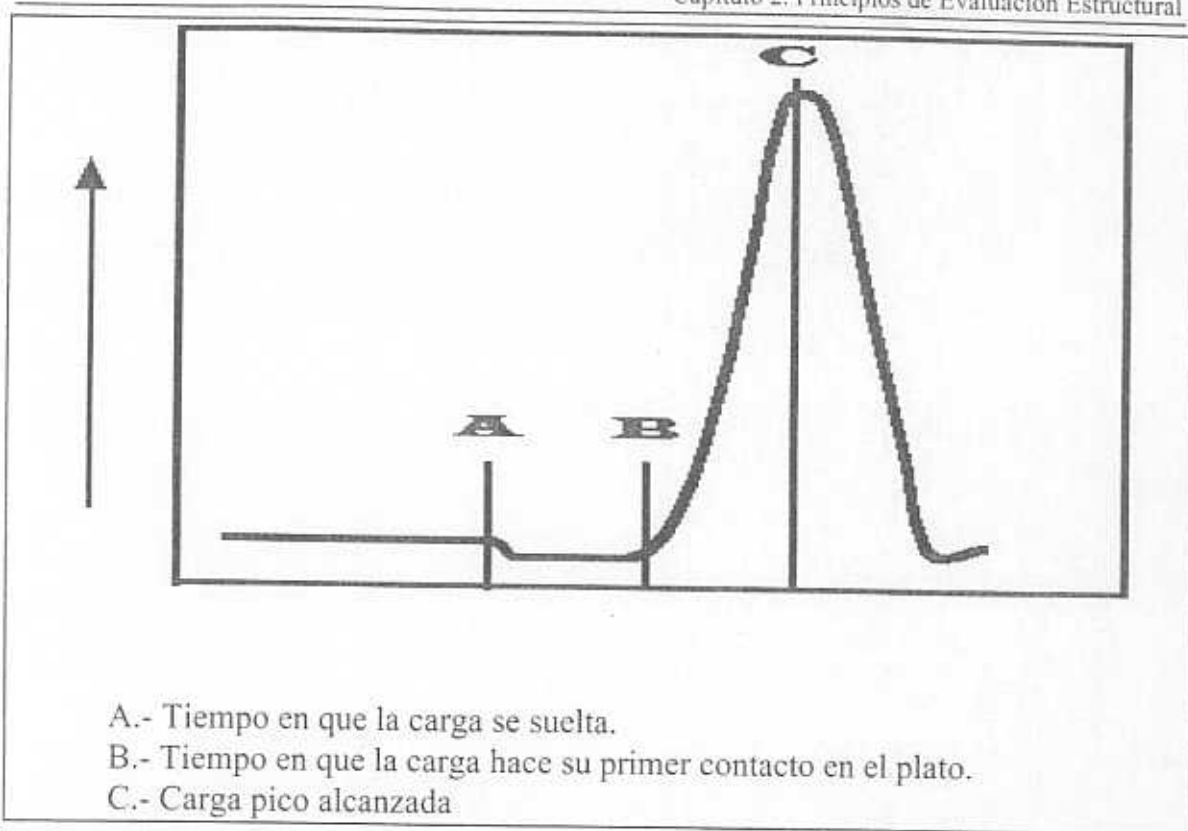
El precio actual de las diferentes versiones de este aparato oscila entre 200,000 y 300,000 dólares.



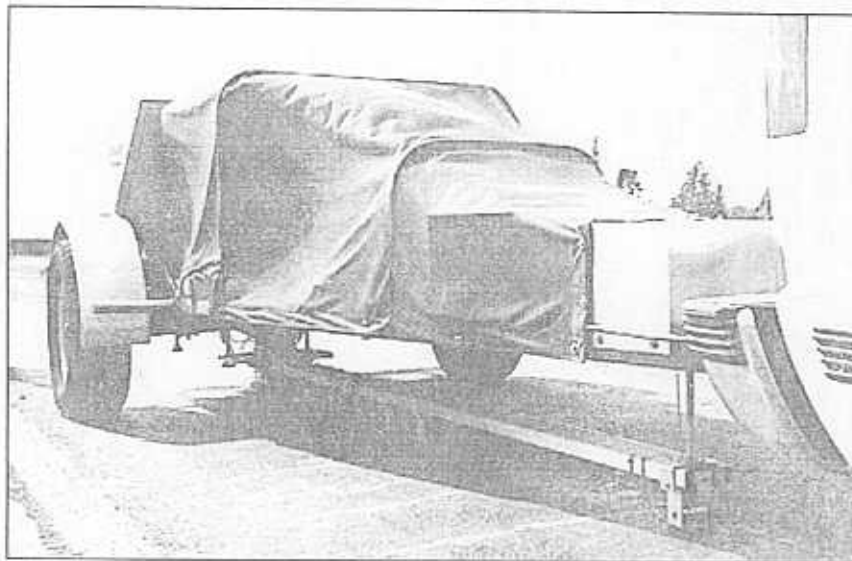
**Figura 2.5.- Pulso de Carga Típico Producido por un Deflectómetro de Impacto.**



**Figura 2.6 Equipo para Medir Deflexiones bajo Carga de Impacto (Deflectómetro de Impacto "Falling Weight Deflectometer, FWD").**



**Figura 2.5.- Pulso de Carga Típico Producido por un Deflectómetro de Impacto.**

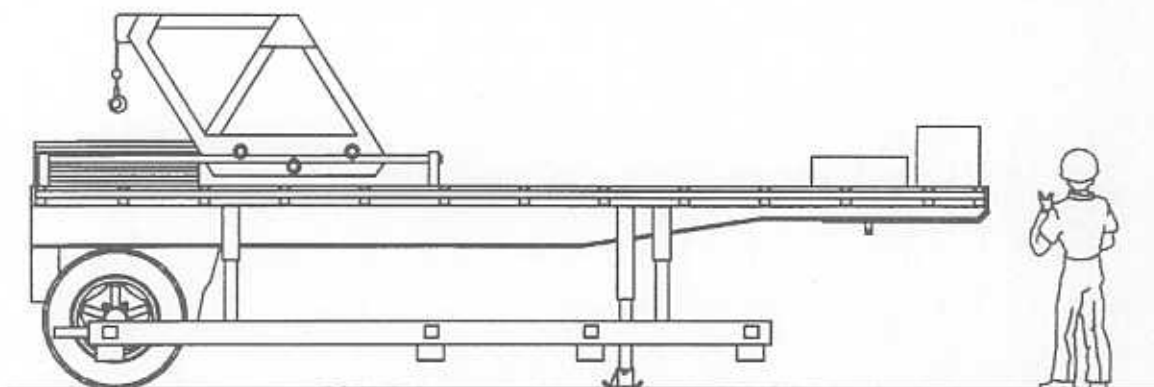


**Figura 2.6 Equipo para Medir Deflexiones bajo Carga de Impacto (Deflectómetro de Impacto "Falling Weight Deflectometer, FWD").**

#### 2.2.4. Medición Continua de Deflexiones bajo Carga Rodante (Deflectómetro de Peso Rodante “Rolling Wheel Deflectometer, RWD”).

Estos aparatos permiten medir las deflexiones del pavimento continuamente y con buena precisión, a velocidades máximas que van desde 35 hasta 50 mph (55-90 km/h). Sin embargo, sus diferentes versiones actuales aún se encuentran en desarrollo y no están listas para ser implementadas y aplicadas en carreteras. Para la medición de deflexiones, utilizan una nueva generación de sensores a base de rayo láser que son más precisos que los sensores de contacto con el pavimento que actualmente existen. Permiten medir y almacenar información sobre la temperatura del pavimento, la carga instantánea aplicada y su localización sobre la superficie terrestre. Asimismo, algunas versiones pueden ser programadas para pintar una raya donde las deflexiones excedan un cierto valor de umbral. Lo anterior, con propósitos de identificación de tramos carreteros con deflexiones excesivas, para análisis posteriores. Estos aparatos pueden generar una medición de deflexión por cada pie de longitud.

La Figura 2.7 presenta un esquema de una de las versiones comerciales de este aparato. El precio de las distintas versiones existentes oscila entre 600,000 y 700,000 dólares.



**Figura 2.7 Deflectómetro de Peso Rodante (Rolling Wheel Deflectometer, RWD) para Medir Deflexiones bajo Carga Rodante.**

### 2.2.5. Otros Métodos.

Se ha utilizado también la medición de deflexiones bajo cargas rodantes mediante transformadores diferenciales variables lineales (“linear variable differential transformers, LVDT”) instalados dentro de la estructura del pavimento. La Referencia 9 presenta una cantidad considerable de información sobre la aplicación de este método en la prueba de la AASHO. A pesar de que este método es no-destructivo, requiere de una instalación permanente en un sitio determinado del pavimento. La influencia de esta instalación, que es ajena a los materiales del pavimento, crea la duda sobre su efecto en las mediciones obtenidas. Adicionalmente, el hecho de que la instalación sea fija, dificulta el traslado a muchos sitios de prueba y la recabación de datos múltiples. Por lo tanto, estas instalaciones han sido utilizadas primordialmente con propósitos de investigación.

También se ha utilizado la medición de la respuesta de los pavimentos ante una fuente controlada de radiación nuclear. En este caso, la respuesta es medida mediante un aparato denominado “Radar de Penetración”. En general estas pruebas son usadas únicamente para estimar la densidad de los materiales de las capas subyacentes. Estas mediciones por supuesto se relacionan con el comportamiento de los pavimentos, pero se utilizan más directamente para determinar las propiedades de las capas. La profundidad de respuesta de la radiación nuclear y por lo tanto las mediciones derivadas de este método normalmente proporcionan información sobre la capa superficial. Las pruebas de radiación nuclear o de densidad nuclear no se utilizan generalmente en la evaluación estructural de pavimentos sino, más bien, en la evaluación de las capas individuales, fundamentalmente durante la fase de construcción. El “Radar de Penetración” puede utilizarse para determinar el espesor de las capas de los pavimentos y también para localizar áreas con alto contenido de humedad dentro de la estructura del pavimento.

Existen otros métodos que se están investigando y ensayando para ser utilizados en las evaluaciones estructurales, tales como el análisis espectral de ondas superficiales, la respuestas a los impulsos, las velocidades de onda, resonancia e impedancias. En los últimos años se han realizado muchos avances en esta área y se esperan cambios más dramáticos en los próximos años.

### **2.3. Evaluación Estructural Destructiva.**

Aunque la condición de los pavimentos se puede evaluar a través de mediciones de las irregularidades de la superficie o el registro de los defectos en el pavimento como grietas y roderas, en ocasiones es necesario remover partes de la estructura del pavimento para determinar dónde ocurren las fallas y porqué. El término "prueba destructiva" se aplica a estos métodos de evaluación porque la estructura original del pavimento completo se destruye en un sitio determinado. En general, tales procedimientos de evaluación se restringen a pavimentos que muestran evidencias de falla.

Las técnicas usadas dependen del tipo de información deseada, pero generalmente involucran la realización de cortes en cada capa del pavimento y la obtención de muestras para pruebas posteriores. A veces, el objetivo es obtener muestras inalteradas de las distintas capas. Sin embargo, este objetivo no siempre puede lograrse exitosamente dadas las circunstancias prevalecientes.

La sección transversal real de las diferentes capas de un pavimento flexible con roderas puede ser estudiada para analizar el comportamiento de cada capa y el funcionamiento del sistema. Uno de estos estudios realizado en Kentucky (Referencia 13) reveló que el material de la subrasante se había incrustado en el material de textura abierta de la base, sugiriendo la necesidad de cambiar la graduación del material de base y modificar ciertos procedimientos constructivos.

En la prueba de la AASHO se excavaron zanjas transversales con el fin de obtener información sobre la magnitud de las roderas en la parte superior de cada una de las capas componentes de la estructura, así como para obtener información sobre la condición existente y resistencia de los materiales. Se encontró que las roderas en los pavimentos se deben fundamentalmente a la reducción del espesor de las capas, lo cual fue atribuido al desplazamiento lateral de los materiales. Estos resultados, junto con la realización de pruebas de densidad y resistencia sobre muestras del material extraído, proporcionaron considerable información sobre la capacidad estructural del pavimento.

También se realizan pruebas de degradación de los materiales de base, después de haber estado sometidos a las cargas reales del tránsito. Se obtienen muestras de la capa de base en distintos intervalos de tiempo y se

prueban en el laboratorio con el fin de cuantificar el incremento en la cantidad de finos. La destrucción de la superficie existente para muestrear el material de la base es indeseable por sí misma, pero la información obtenida a través del muestreo y prueba de los materiales que han estado expuestos a las condiciones reales de servicio, lo justifica.

Frecuentemente se excavan y examinan puntos problemáticos aislados para determinar la causa del problema en particular y tomar las medidas que permitan corregir la situación. Estas investigaciones individuales generalmente no se reportan en publicaciones; de hecho, la información rara vez se conoce por personas diferentes a aquéllas que forman el grupo involucrado en el problema. Consecuentemente, la información disponible sobre métodos destructivos de prueba y los resultados obtenidos con ellos sólo se limita a aquellos casos en que dichos métodos fueron incorporados a un programa general de evaluación, tal como el de la AASHO.

Las ventajas de romper pavimentos para realizar investigaciones detalladas bajo la superficie deben ser ponderadas contra las desventajas de remover porciones del pavimento y reemplazarlo con parches. Los defectos superficiales frecuentemente pueden utilizarse para valorar las condiciones en profundidad; sin embargo, a menudo es necesario determinar la ubicación y causa de la falla en la estructura para poder realizar un análisis confiable.

## **2.4. Uso de los Resultados.**

Los resultados de las pruebas no-destructivas y destructivas deben utilizarse de manera conjunta con información sobre las fallas, drenaje y materiales para determinar la condición estructural del pavimento. En particular, la información de deflexiones puede emplearse para los siguientes fines:

- Valorar la uniformidad de la estructura a lo largo de un tramo carretero.
- Determinar los módulos de elasticidad de las capas del pavimento.
- Diseñar el espesor de refuerzo de sobrecarpeta requerido por un pavimento.



- Generar alternativas de conservación para un pavimento que abarquen las acciones requeridas para cubrir un horizonte determinado de análisis (“ciclo de vida del pavimento”).
- Determinar la cuenca de deflexiones, con el fin de identificar sitios de debilidad en la estructura (en las capas del pavimento o en la subrasante).
- Localización de áreas del pavimento con deficiencia de soporte (existencia de oquedades).
- Determinación del nivel de transferencia de carga en grietas de pavimentos y juntas de pavimentos rígidos.

La Referencia 6 describe la metodología para el uso de la información anterior con cada uno de los fines señalados.

### **3. Comparación de los Resultados de Algunos Métodos de Evaluación Estructural.**

---

#### **3.1. Objetivos del Capítulo.**

En este capítulo se analizan y comparan entre sí los resultados de diferentes técnicas de evaluación estructural destructiva y no-destructiva de pavimentos que se utilizan en México. Se busca establecer relaciones entre los resultados generados por ellas. La información que se maneja proviene de un programa de evaluación implementado en las carreteras federales del Estado de Puebla (Referencias 14, 15, y 16).

Los procesos de evaluación no-destructiva a que se hace referencia consisten en obtener información de deflexiones en los pavimentos bajo la aplicación de una carga determinada y posteriormente utilizar dicha información para evaluar los módulos de las capas. En general en este trabajo, cuando se mencione el término módulo de una capa, deberá entenderse que se está haciendo referencia al módulo de resiliencia de la misma (cociente entre el esfuerzo y la deformación recuperable, bajo carga repetida) (Referencia 4).

#### **3.2. El Programa de Evaluación Estructural en Puebla.**

##### **3.2.1. Descripción General.**

El mapa en la Figura 3.1 ilustra la red de carreteras federales del Estado de Puebla, a partir de la cual se obtuvo la información que sirvió de base para los análisis mostrados en este capítulo. La longitud total de la red en la Figura 3.1 es del orden de 1,118 kilómetros. En diferentes segmentos de esta red, se obtuvo la siguiente información de evaluación estructural:

- Deflexiones mediante deflectómetro de impacto marca Dynatest.
- Deflexiones mediante deflectómetro de impacto marca KUAB.
- Valor de CBR (California Bearing Ratio) de las capas de base, subbase y subrasante de los pavimentos, mediante la excavación de pozos de exploración en 27 sitios de la red.



Figura 3.1. Red Carretera Federal Evaluada en el Estado de Puebla.

- Deflexiones mediante Viga Benkelman.

A continuación se describen algunas características del proceso de exploración empleado en cada caso.

### **3.2.2. Deflectómetro de Impacto Marca Dynatest.**

El mapa en la Figura 3.2 ilustra la fracción de la red en la cual se tomaron deflexiones utilizando este equipo. La Tabla 3.1 define los tramos específicos que fueron evaluados. Como puede observarse en esta tabla, la fracción de la red evaluada en este caso es de 413 kilómetros de longitud aproximadamente. El equipo empleado fue un Dynatest 8081 HWD (Heavy Weight Deflectometer). Las deflexiones se tomaron a cada 100 metros alternadamente en cada carril. Estas fueron producidas en el pavimento bajo el impacto de una carga nominal de 6,000 kilogramos, midiéndose las deflexiones a distancias de 0, 20, 30, 60, 90, 120 y 150 centímetros del sitio de impacto mediante sismómetros o geófonos del aparato. También se registró la carga real aplicada al pavimento. El impacto se aplicó mediante una placa de 30 centímetros de diámetro. La información obtenida en campo fue posteriormente analizada, interpretada y transformada en datos útiles tales como módulos de los materiales "in-situ", vida remanente, etc. El procedimiento de evaluación con este equipo exigió que también se efectuasen calas a cada 2 kilómetros, con el fin de determinar el espesor de las capas del pavimento en los diferentes tramos y clasificar visual y manualmente los materiales constitutivos de cada una de ellas (incluyendo capa subrasante en caso de existir). La Referencia 14 reporta las deflexiones obtenidas en cada sitio, la carga real aplicada en cada prueba, los resultados de las calas, los módulos calculados para las capas, los valores de vida remanente evaluados y otros datos generados.

### **3.2.3. Deflectómetro de Impacto Marca KUAB.**

El mapa en la Figura 3.3 muestra la fracción de la red evaluada con este equipo. La Tabla 3.2 define los tramos específicos explorados. La fracción de la red evaluada en este caso tiene una longitud aproximada de 414 kilómetros. El equipo empleado fue un KUAB-2m-FWD (Falling Weight Deflectometer). Este equipo simula el efecto producido por el tránsito vehicular al dejar caer unas pesas sobre una placa segmentada, transmitiendo



Figura 3.2. Tramos Carreteros Evaluados con Equipo Dynatest (Tramos Marcados en Líneas Negras)

**Tabla 3.1 Tramos Carreteros Evaluados con Equipo Dynatest.**

Carretera	Del km	Al km	Longitud (km)
Cuatla - Izúcar de Matamoros	103+200	134+500	31.30
El Seco - Azumbilla	0+000	74+020	74.02
México - Puebla (Cholula-Ecatepec)	0+000	7+200	7.20
México - Zacatepec	177+900	187+900	10.00
Pachuca - Tuxpan	82+900	186+600	103.70
Pachuca - Tuxpan (Ramal Vega de Suchil)	0+000	4+800	4.80
Pachuca - Tuxpan (Ramal V. Carranza)	0+000	4+500	4.50
Puebla - Huajuapán de León	2+000	60+000	58.00
Puebla - Tlaxcala	2+500	11+800	9.30
San Hipólito - Jalapa	0+000	83+300	83.30
San Martín Texmelucan - Tlaxcala	0+000	2+900	2.90
Tehuacán - Córdoba	0+000	23+740	23.74
Total			412.76

así una carga al pavimento. La carga promedio aplicada fue de 6,100 kilogramos y el diámetro de la placa de 30 centímetros. Las pruebas se realizaron en la rodada derecha de cada carril a una distancia de 100 metros alternadamente (“a tresbolillo”). Los desplazamientos verticales fueron registrados por siete geófonos o sismómetros colocados a una distancia de 0, 20, 30, 45, 90, 120 y 150 centímetros a partir del punto de aplicación de la carga. La información obtenida se procesó mediante un programa especial de cómputo para obtener los módulos de resiliencia de las capas. La Referencia 15 presenta las deflexiones y temperaturas obtenidas en cada sitio, la carga real aplicada en cada prueba, los resultados de las calas, los módulos obtenidos para las capas, los valores de vida remanente calculados así como otros datos generados.

### 3.2.4. California Bearing Ratio.

Se obtuvo el CBR en el lugar para las capas del pavimento de base, subbase y subrasante, en los 27 sitios indicados en el mapa en la Figura 3.4. Con este fin, en cada uno de dichos sitios se excavó un pozo a cielo abierto. La ubicación de los pozos fue definida por personal de la Residencia de Conservación adscrito al Centro SCT del Estado de Puebla. Adicionalmente se obtuvieron muestras representativas de los materiales de las diferentes capas, para su ensayo en laboratorio. La Referencia 14 presenta en forma gráfica los valores de CBR obtenidos en cada capa del pavimento en los sitios explorados, el espesor de las capas y tipo de material constitutivo así como gráficas carga-penetración.



Figura 3.3. Tramos Carreteros Evaluados con Equipo KUAB.  
(Tramos Marcados con Líneas Negras)

**Tabla 3.2 Tramos Carreteros Evaluados con Equipo KUAB.**

Carretera	Del km	Al km	Longitud (km)
Puebla-Tehuacán	4+000	119+000	115.00
México-Puebla	45+500	113+000	67.50
Tehuacán-Huajuapán de León	0+000	55+700	55.70
Apizaco-Huauchinango	34+800	110+500	75.70
Puebla-Huajuapán de León	100+000	200+400	100.40
Total			414.30

### 3.2.5. Viga Benkelman.

En todos los segmentos de 5 kilómetros de la red en la Figura 3.1 se midieron deflexiones utilizando Viga Benkelman. Específicamente, éstas se tomaron en los 500 metros de menor calidad de servicio de cada segmento, midiéndose 25 deflexiones, una a cada 20 metros. La Referencia 16 reporta las 25 deflexiones de cada segmento, así como la temperatura de la carpeta en el momento de las mediciones.

## 3.3. Análisis de Datos.

### 3.3.1. Deflectómetros entre sí.

Este análisis se establece en términos del conjunto de deflexiones medidas mediante los dos aparatos empleados, corregidas para llevarlas a una temperatura de referencia de 21°C (Referencia 17). Ya se describió con anterioridad el procedimiento de obtención de deflexiones seguido en cada caso.

Para establecer las comparaciones que a continuación se señalan, se realizaron mediciones en los mismos sitios de los dos carriles del tramo carretero federal entre el Km. 40 y el 50 de la Carretera Puebla - Huajuapán de León en el





Figura 3.4. Pozos para la Obtención del CBR en el Lugar.

Estado de Puebla. En todo este tramo se registró prácticamente la misma estructura de pavimento (Referencia 15). Las deflexiones fueron tomadas a cada 100 m., como ya se indicó, "a tresbolillo". Por lo tanto, los análisis que se muestran se basan en un conjunto de 100 deflexiones medidas con cada aparato, 50 en cada dirección.

La Tabla A.1, en el Anexo A, presenta los datos obtenidos con cada aparato en cada uno de los 100 sitios diferentes. Esta tabla incluye una clave correspondiente al carril evaluado en el sentido de Puebla a Huajuapán ("D" para el carril derecho e "I" para el carril izquierdo), el kilometraje en donde se realizó cada medición, la carga aplicada y las siete deflexiones registradas. La información anterior se muestra para el deflectómetro marca Dynatest y junto a ella, la correspondiente al deflectómetro marca KUAB. Las mediciones con ambos equipos fueron realizadas en condiciones ambientales similares (de temperatura, humedad, etc.). En la Tabla A.1 es evidente que las deflexiones medidas con el KUAB son generalmente mayores a las obtenidas con el Dynatest.

En los análisis siguientes se toman como referencia las deflexiones del Dynatest. Cabe señalar que en la literatura se reporta que éste es uno de los equipos que muestran mejores niveles de repetibilidad (es decir, que genera datos consistentes de carga y deflexiones al realizar varias pruebas en un mismo sitio) y de reproducibilidad (que en distintos sitios, en los que reproducen las mismas condiciones, se generan resultados similares) (Referencia 18). De esta manera, las deflexiones obtenidas con el deflectómetro KUAB fueron normalizadas linealmente a la carga aplicada en cada sitio por el equipo Dynatest, con el fin de hacer las deflexiones de ambos equipos comparables.

Un análisis sobre la congruencia de los datos medidos con los dos equipos se realiza a través del cálculo de las desviaciones de las deflexiones medidas por cada sensor del KUAB en cada sitio, en relación con las deflexiones de referencia (medidas con el Dynatest). La fórmula de cálculo de dichas desviaciones es la siguiente:

$$\text{dev}_{ijk} = \frac{d_{ijk} - dr_{ij}}{dr_{ij}} \times 100 \% \quad (3.1)$$

donde:

- $dev_{ijk}$  = Desviación de la deflexión con referencia al valor medido por el KUAB (k) en la estación j por el sensor i;
- $d_{ijk}$  = Deflexión normalizada medida por el KUAB (k) en la estación j por el sensor i (milésimas de mm); y
- $dr_{ij}$  = Deflexión de referencia (medida con el Dynatest) en la estación j por el sensor i (milésimas de mm).

Esta información de desviaciones también se presenta en la Tabla A.1 en el Anexo A. Asimismo, en las Figuras A.1 a A.7 (también en el Anexo A), correspondientes a los sensores 0 (ubicado en el sitio de aplicación de la carga) a 6 (el más alejado a la carga) respectivamente, se grafican las desviaciones a lo largo de ambos sentidos del tramo. A partir de toda esta información, es evidente que las desviaciones del KUAB para todos los sensores son muy significativas (rebasan en la mayoría de los casos el 10%, valor que frecuentemente se utiliza como desviación máxima razonable) (Referencia 18). Lo anterior hace evidente la necesidad de generar curvas de calibración entre las deflexiones medidas con distintos aparatos en caso de que deseen establecerse comparaciones entre ellas o con otros valores o procedimientos de referencia.

Se destaca que el factor de calibración de un aparato dado depende de la configuración del pavimento, es decir, no sólo de la resistencia estructural del mismo (Referencia 18). Lo anterior obliga a que deba generarse un factor específico para cada circunstancia.

Para los deflectómetros, comúnmente se realizan dos procedimientos de calibración:

- Uno denominado como “independiente”, el cual consiste en generar una ecuación de corrección de las deflexiones para cada sensor, dependiendo del nivel de las deflexiones y de pulso o duración de aplicación de la carga (o de la deflexión); y
- Otro conocido como “calibración relativa”, dirigida a hacer comparables las deflexiones medidas por los distintos sensores de un mismo equipo.

En la actualidad, ya han sido desarrollados procedimientos estándar para realizar los dos tipos anteriores de calibración en estos equipos. En varios países desarrollados existen centros específicos para la calibración de éstos y otros aparatos de evaluación estructural no destructiva (Referencia 19).

Todo lo anterior enfatiza la necesidad de introducir como una práctica a nivel nacional, la calibración de los aparatos de acuerdo con un procedimiento de referencia (estándar) con el fin de reducir las discrepancias de las mediciones y evaluaciones realizadas con distintos de ellos. Puede decirse que esta práctica es completamente ignorada actualmente en México. La carencia de este procedimiento es lo que genera los resultados inesperados, atípicos y que no son comparables entre equipos, que frecuentemente se reportan (Referencia 20). El nivel de incongruencia entre las deflexiones medidas con diferentes equipos varía dependiendo no sólo con la estructura del pavimento evaluado sino también con diferencias en la magnitud y el pulso de las cargas aplicadas por ellos. Obviamente, a mayor carga, las deflexiones serán mayores; sin embargo, esta relación normalmente no es lineal. Asimismo, a menor pulso o duración de aplicación (correspondiente a un vehículo más rápido), las deflexiones serán menores. La diferencia de pulso entre los deflectómetros se debe a variaciones en las características físicas de sus sistemas de generación de la carga (peso que dejan caer, altura de caída del mismo, características del plato, etc.). Debe destacarse que la no-linealidad de la relación carga-deflexiones no introdujo imprecisiones significativas en la normalización lineal de las deflexiones del KUAB a las cargas del Dynatest, por haber sido muy similares las cargas aplicadas con ambos aparatos.

Por todo lo anterior, es importante tener presente que evaluaciones estructurales con equipos distintos pueden generar diferentes resultados de módulos de las capas del pavimento y de evaluación estructural (aún tratándose de las mismas marcas). En esta sección no se comparan módulos evaluados a partir de las deflexiones de ambos deflectómetros, ya que en los dos casos prácticamente se utilizan los mismos principios o teorías. Esto significa que las diferencias de módulos que se obtuviesen con ambos aparatos sólo serían reflejo de diferencias en las deflexiones medidas con ellos. En el capítulo siguiente se hará mención más detallada de los métodos (“de retrocálculo”) que se aplican con ambos aparatos para la obtención de módulos a partir de deflexiones.

### 3.3.2. Deflectómetro contra California Bearing Ratio.

La información de los valores de CBR de las capas de base, subbase y subrasante en los 27 pozos de exploración excavados y los módulos calculados a partir de las deflexiones medidas con los deflectómetros en las inmediaciones de dichos pozos (500 metros antes y después del pozo), permitieron establecer relaciones entre el módulo de resiliencia y el CBR para las distintas capas y para ambos equipos. La información empleada en el desarrollo de estas relaciones se reporta en el Anexo B.

Con base en la información de los sitios en los que se empleó el Dynatest, se obtuvo la siguiente relación que resultó válida para todas las capas (relaciones obtenidas de manera separada para las distintas capas no mostraron diferencia significativa):

$$E = 15.26 * CBR \quad (3.2)$$

$(R^2 = 0.62)$

donde:

$$E = \text{Módulo de Resiliencia (kg/cm}^2\text{); y}$$

$$CBR = \text{Valor Relativo de Soporte.}$$

Para el caso del KUAB, se obtuvieron resultados similares y la siguiente función de relación:

$$E = 11.20 * CBR \quad (3.3)$$

donde:

E y CBR, ya fueron definidos (Ecuación. 3.10).

Como puede observarse la ecuación del KUAB (Ec. 3.3) genera, para el mismo CBR, valores menores de módulo que la ecuación del Dynatest (Ec. 3.2). Este resultado es congruente con el hecho, ya señalado, de que las deflexiones del KUAB resultaron en general mayores que las del Dynatest.

Un análisis multicapa realizado para los distintos sitios en donde se excavaron pozos, indicó que la suma de los esfuerzos principales  $[q = s_1 + s_2 + s_3]$ , según

la prueba AASHTO T274 (Referencia 21)] en todas las capas fue menor que  $0.70 \text{ kg/cm}^2$ . Para esta condición y para capas granulares, la AASHTO recomienda el uso de la siguiente relación entre módulo y CBR (Referencia 7):

$$E = 17.59 * \text{CBR} \quad (3.4)$$

donde:

E y CBR, ya fueron definidos (Ecuación 3.2).

Como es evidente, esta relación es bastante congruente con las antes desarrolladas para el caso específico de Puebla.

Para otros valores de q, la AASHTO recomienda las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} \text{Para } q &= 20 \\ E &= 23.93 * \text{CBR} \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \text{Para } q &= 30: \\ E &= 30.96 * \text{CBR} \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \text{Para } q &= 100: \\ E &= 52.07 * \text{CBR} \end{aligned} \quad (3.7)$$

donde:

E y CBR, ya fueron definidos.

Para q = 20

El valor de q en las relaciones anteriores puede estimarse a través de algún programa computacional que permita obtener los esfuerzos principales bajo carga en sistemas multicapa, como es el ELSYM5 (Referencia 22).

Cabe señalar que todas las ecuaciones anteriores sólo son aplicables a materiales granulares de base, subbase y algunas subrasantes mejoradas. El CBR promedio de las capas de base, subbase y subrasante de los 27 sitios explorados en Puebla fue de alrededor de 80, oscilando entre un mínimo de 20 y un máximo de 200. Para materiales más finos de subrasante y terracería

(con  $CBR < 10$ ), la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (Referencia 23) recomienda el uso de la siguiente expresión:

$$E = 105.56 * CBR \quad (3.8)$$

donde:

E y CBR, ya fueron definidos.

### 3.3.3. Deflectómetro contra Viga Benkelman.

Las deflexiones medidas con Viga Benkelman en el tramo de 10 km considerado en este análisis fueron obtenidas dividiendo previamente dicho tramo en dos subtramos de 5 km. De acuerdo con recomendaciones para la toma de deflexiones con Viga Benkelman en el Sistema Mexicano para la Administración de Pavimentos (Referencia 24), se tomaron 25 deflexiones (una a cada 20 metros) en los 500 metros de menor calificación de servicio actual (CSA) de cada uno de los dos subtramos. Por lo tanto, se tomaron un total de 50 deflexiones de Viga Benkelman en el tramo completo. Al igual que para los deflectómetros, las deflexiones obtenidas con este aparato fueron corregidas para llevarlas a una temperatura de referencia de 21°C. La Tabla 3.3 compara los valores promedio de las deflexiones obtenidas con Viga Benkelman (las cuales resultaron bastante homogéneas entre los dos subtramos de 5 km), con las deflexiones promedio del sensor 0 (sitio de aplicación de la carga) tanto del Dynatest como del KUAB. También se presenta la desviación estándar de las deflexiones medidas con los tres aparatos. La información de la Viga Benkelman en la Tabla 3.3 ya ha sido normalizada linealmente a la carga promedio de 6,274 kg aplicada por el Dynatest en las 100 pruebas realizadas con este último. Se recuerda que en el caso de la Viga Benkelman, se aplica una carga de 8,172 kg (18,000 lb) a través de un eje sencillo dual; es decir, la carga en el sitio donde se toma la deflexión es de la mitad del valor anterior, o sea de 4,086 kg. Debe tomarse en cuenta que como esta carga si es bastante menor a la aplicada por los deflectómetros, la no-linealidad de la relación carga-deflexiones probablemente si introdujo imprecisiones significativas en el proceso de normalización lineal de las deflexiones de la Viga Benkelman.

Cabe señalar que para los tres aparatos ahora considerados, las deflexiones fueron tomadas en condiciones ambientales similares (de temperatura, humedad, etc.).

**Tabla 3.3. Comparación de las Deflexiones Promedio entre la Viga Benkelman y los Deflectómetros Empleados.**

Aparato	Deflexión Prom. para una Carga de 6,274 kg (milésimas de mm)	Desviación Estándar (milésimas de mm)
Viga Benkelman	856.50	213.00
Dynatest	838.00	238.00
KUAB	975.00	288.73

Como es evidente a partir de la información en la Tabla 3.3, la deflexión promedio de la Viga Benkelman es bastante similar a la del Dynatest y estas dos, un poco más bajas que las del KUAB. Lo mismo puede decirse en relación con las desviaciones estándar. Aunque los datos de la tabla anterior muestran valores bastante similares para las deflexiones medidas con los tres aparatos, este resultado no puede extrapolarse a las deflexiones específicas medidas por ellos en un mismo sitio, ya que las deflexiones de los deflectómetros sí fueron tomadas en el mismo sitio pero las de la Viga Benkelman fueron tomadas en sitios distintos a los explorados con los deflectómetros.

La Referencia 18 demuestra que frecuentemente existen desviaciones importantes de las deflexiones medidas con Viga Benkelman en relación con los aparatos de referencia (usualmente Dynatest), las cuales suelen crecer con la magnitud de las deflexiones. Estas desviaciones se deben a las diferentes características de la carga aplicada en cada caso en términos de magnitud, duración del pulso, etc. También influye de manera determinante el hecho de que la deflexión de la Viga Benkelman se toma al retirar la carga (es de rebote o recuperación), en tanto que la de los deflectómetros se registra al aplicar la misma (es de aplicación). Por esta razón también se recomienda la calibración de la Viga Benkelman, previamente a la realización de algún trabajo de medición de deflexiones con ese aparato.





## **4. Aplicación de la Evaluación Estructural a la Generación de Alternativas de Conservación.**

---

### **4.1. Propósitos del Capítulo.**

Este capítulo tiene por objeto proporcionar una metodología para generar alternativas de conservación de diferente envergadura para un proyecto carretero determinado.

En este trabajo se entiende por proyecto carretero, a una unidad o segmento que en toda su longitud guarda condiciones homogéneas de los diferentes factores que influyen en el comportamiento de su pavimento (por ejemplo, tráfico, estructura, nivel de servicio, estado de deterioro, etc.). Por lo tanto, dicho segmento podrá sujetarse a una misma medida de conservación en toda su longitud.

Se entiende por conservación de pavimentos a cualquier acción sobre ellos conducente a preservarlos en condiciones operativas adecuadas. Se divide en mantenimiento y rehabilitación. El primero, que a su vez suele dividirse en rutinario y periódico, se refiere a trabajos superficiales que reducen la tasa de deterioro del pavimento pero que no mejoran significativamente su estructura (tiene por objeto básico minimizar el daño producido por factores ambientales). El segundo, por el contrario, tiene como finalidad incrementar la vida funcional del pavimento, mejorando substancialmente su resistencia y rugosidad (está dirigido fundamentalmente a reparar el daño producido por las cargas del tránsito).

Como las acciones de rehabilitación son las que primordialmente influyen en el comportamiento del nivel de servicio ofrecido por un pavimento durante un horizonte determinado de tiempo ("ciclo de vida del pavimento"), serán ellas primordialmente en las que se fundamente la generación de alternativas en este trabajo. Por lo tanto, no se incluyen alternativas basadas en acciones de mantenimiento, estimándose que la necesidad de éste puede manejarse a través de una cantidad fija de recursos asignados por kilómetro y por año. El mismo tratamiento se da a las acciones requeridas para el mejoramiento del drenaje del proyecto. En este trabajo se asume que se proporcionarán los recursos suficientes para realizar estas dos últimas acciones a niveles

adecuados. La insuficiencia de ellas suele reducir la vida estructural del pavimento.

En este trabajo se entiende por alternativa de conservación al conjunto de acciones de rehabilitación que permiten cubrir el horizonte de análisis o ciclo de vida del pavimento con una cierta evolución de la calidad de servicio. Se denomina como "período de comportamiento" al lapso de tiempo transcurrido entre dos acciones de rehabilitación consecutivas. La generación de alternativas que se aborda en este trabajo se basa en opciones de rehabilitación típicamente empleadas en México. En general se realiza a través de los métodos propuestos para tal fin por la AASHTO (Referencia 7).

La generación de alternativas de conservación juega un papel esencial en los sistemas de administración o gestión de pavimentos (SGP), tanto a nivel de proyecto como a nivel de red, variando entre ambos niveles para un proyecto específico, sólo la precisión con que se realice el diseño de las medidas correspondientes a las alternativas de cada nivel, obviamente mucho más detallado para el primero que para el segundo. Estas alternativas son el elemento que generalmente se ingresa en los análisis de factibilidad de cualquiera de los dos niveles, para determinar aquélla que resulte económicamente más conveniente.

Se aborda este tema con el fin de proporcionar una orientación técnica a la generación de alternativas de conservación de proyectos específicos, a ser evaluadas posteriormente por sistemas de gestión de pavimentos como el Sistema Mexicano para la Administración de Pavimentos (SIMAP) desarrollado por el Instituto Mexicano del Transporte (Referencias 24 a 27). Las recomendaciones que se presentan conducen a la generación de alternativas de conservación de naturaleza preliminar, por lo cual sólo son aplicables al nivel de red de los SGP.

En este capítulo, inicialmente se describen los principios que son congruentes con las recomendaciones de la AASHTO para la evaluación de la capacidad estructural del pavimento. Posteriormente se presentan algunas recomendaciones para la generación de alternativas de conservación del proyecto considerado. Finalmente se reseñan los principios de evaluación económica de las alternativas antes generadas. Los pasos anteriores se ejemplifican aplicándose a dos proyectos específicos de la red carretera evaluada en el Estado de Puebla, uno con tránsito alto y otro con mediano.

## **4.2. Evaluación de la Capacidad Estructural.**

En esta sección se busca establecer procedimientos para la determinación de la capacidad estructural del pavimento en el momento de su evaluación con deflexiones (capacidad estructural actual) así como en el momento en que requiera la primera acción de rehabilitación. Se busca también definir la evolución de la calidad de servicio del pavimento entre ambos momentos anteriores. Estos elementos son necesarios para la generación de estrategias de conservación que cubran el ciclo de vida considerado.

### **4.2.1. Metodología Propuesta.**

La capacidad estructural actual del pavimento se evalúa de manera bastante directa a partir de las deflexiones medidas. Es más conveniente contar con datos de la cuenca de deflexiones que sólo con la deflexión máxima, ya que la primera proporciona información más completa sobre la resistencia tanto de la subrasante como de las demás capas de la estructura.

La cuenca de deflexiones en un sitio dado puede obtenerse a partir de la mayoría de los aparatos ya descritos en este trabajo. En el caso de los ejemplos mostrados en este capítulo, la información de deflexiones fue obtenida con el Dynatest y el KUAB empleados en la evaluación realizada en Puebla. Ya se describió la información de deflexiones que estos aparatos proporcionan para un tramo considerado. Ellos también cuentan con programas de modelación de estructuras de varias capas que permiten determinar los módulos de las mismas (dentro de un rango posible de valores según su calidad) a partir de las deflexiones (Referencias 28 y 29). Estos programas también requieren de información sobre el espesor de las capas. El Dynatest empleado en Puebla utiliza el programa denominado "Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design (ELMODE)" (Referencia 28) en tanto que el KUAB utiliza el programa "Pavement Evaluation Based on Dynamic Deflections (PEDD1-Versión 1.1)" (Referencia 29).

Al proceso de cálculo de módulos de las capas (incluyendo la subrasante) a partir de la cuenca de deflexiones suele denominársele como de "retrocálculo". Este procedimiento, ya bastante estandarizado en el momento actual (Referencia 30), no es objeto fundamental de este trabajo. Sí lo es, por otra parte, la utilización que puede darse a la información generada de módulos para valuar la capacidad estructural del pavimento ante el uso que

tendrá en un horizonte futuro de tiempo y para la generación de alternativas de mejoramiento dirigidas a afrontar ese horizonte.

Con base en los módulos evaluados para las distintas capas, la capacidad estructural actual puede obtenerse transformando dichos valores en coeficientes estructurales de capa de acuerdo con las siguientes funciones (Referencia 7):

- Para capas superficiales de concreto asfáltico:

$$a_{CA} = 0.4 \log_{10}(14.21 E_{CA}) - 1.822 \quad (4.1)$$

donde:

$a_{CA}$  = Coeficiente de la capa.

$E_{CA}$  = Módulo de la capa ( $\text{kg/cm}^2$ ).

- Para capas granulares de base:

$$a'_B = 0.249 \log_{10}(14.21 E_B) - 0.977 \quad (4.2)$$

donde:

$a'_B$  = Coeficiente de la capa.

$E_B$  = Módulo de la capa ( $\text{kg/cm}^2$ ).

- Para capas de base tratadas con cemento:

$$a_B = 0.485 \log_{10}(14.21 E_B) - 2.65 \quad (4.3)$$

donde:

$a_B$  = Coeficiente de la capa.

$E_B$  = Módulo de la capa ( $\text{kg/cm}^2$ ).

- Para capas de base tratadas con materiales bituminosos:

$$a_B = 0.321 \log_{10}(14.21 E_B) - 1.48 \quad (4.4)$$

donde:

$$\begin{aligned} a_B &= \text{Coeficiente de la capa.} \\ E_B &= \text{Módulo de la capa (kg/cm}^2\text{).} \end{aligned}$$

- Para capas granulares de subbase:

$$a_{SB} = 0.227 \log_{10}(14.21 E_{SB}) - 0.839 \quad (4.5)$$

donde:

$$\begin{aligned} A_{sb} &= \text{Coeficiente de la capa.} \\ E_{SB} &= \text{Módulo de la capa (kg/cm}^2\text{).} \end{aligned}$$

La capacidad estructural actual del pavimento puede calcularse a través del número estructural correspondiente, como sigue (Referencia 7):

$$Ne_a = a_{CA} (D_{CA}/2.54) + a'_B (D_B/2.54) + a'_{SB} (D_{SB}/2.54) \quad (4.6)$$

donde:

$$Ne_a = \text{Número estructural actual.}$$

$$D_{CA} = \text{Espesor de la capa de concreto asfáltico (cm).}$$

$$a'_B = \text{Coeficiente efectivo de la base (modificado para materiales granulares según la calidad del drenaje, de acuerdo con recomendaciones de la AASHTO [Referencia 7]).}$$

$$D_B = \text{Espesor de la capa de base (cm).}$$

$$a'_{SB} = \text{Coeficiente efectivo de la subbase (también modificado para materiales granulares según la calidad del drenaje).}$$

$$D_{SB} = \text{Espesor de la capa de subbase (cm).}$$

los demás términos ya han sido definidos.

El número estructural antes calculado, la calificación de servicio del pavimento en el momento de la evaluación (CSA) y el tránsito en el proyecto (así como las condiciones ambientales) pueden utilizarse junto con las

Ecuaciones 4.7 y 4.8 para evaluar por tanteos el número estructural del pavimento al inicio del período de comportamiento analizado (número estructural inicial).

La Ecuación 4.7, que se muestra enseguida, es la ecuación de daño de la AASHTO para pavimentos flexibles (Referencia 7):

$$\log_{10} W = Z_R S_o + 9.36 \log_{10} (NE + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \frac{\Delta ISA}{4.2 - 1.5}}{0.40 + \frac{1094}{(NE + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10} (14.21 M_R) - 8.07 \quad (4.7)$$

donde:

W = Número de aplicaciones de eje simple equivalente (eje sencillo de 8.2 ton y llantas con presión de contacto de 5.8 kg/cm<sup>2</sup>).

Z<sub>R</sub> = Valor de la distribución normal estandarizada correspondiente al nivel de confiabilidad R.

S<sub>o</sub> = Error estándar en las predicciones del tránsito y el comportamiento del pavimento (entre 0.4 y 0.5 para pavimentos flexibles).

Δ ISA = Diferencia entre los índices (o calificaciones) de servicio inicial y el que se tiene después de las W aplicaciones de eje simple equivalente.

NE = Número estructural inicial del pavimento.

$M_R =$  Módulo de resiliencia de la subrasante o capa de apoyo  
( $\text{kg/cm}^2$ ).

La Ecuación 4.8, mostrada a continuación, es una expresión que permite estimar a partir del número estructural inicial, el número estructural del pavimento después de  $W$  aplicaciones de eje simple equivalente (Referencia 31):

$$NE_W = NE (1 - W/W_t) \quad (4.8)$$

donde:

$NE_W =$  Número estructural del pavimento después de  $W$  aplicaciones de eje simple equivalente.

$W_t =$  Número de aplicaciones de eje simple equivalente hasta la falla o momento terminal.  
los demás términos ya han sido definidos.

Según la AASHTO (Referencia 7), deberá considerarse que el pavimento ha llegado al momento terminal o que se encuentra estructuralmente agotado ( $NE_W = 0$ ) cuando alcance una calificación de servicio terminal ( $CSA_t$ ) de 2.0. En carreteras de menor tránsito, el valor anterior deberá ser 1.5.

El factor  $(1 - W/W_t)$  en la Ec. 4.8 es un estimado de la fracción de vida remanente del pavimento después de  $W$  aplicaciones de eje simple equivalente. Este factor es también aplicable a los coeficientes estructurales de las capas por encima de la subrasante para valorar su capacidad individual en dicho momento.

Una vez valuado el número estructural inicial del pavimento, la Ecuación 4.7 puede también aplicarse para determinar la evolución de la calidad de servicio del pavimento entre el momento actual (de la evaluación) y el momento en que sea necesaria la primera acción de rehabilitación. La AASHTO recomienda que en carreteras principales se actúe con este tipo de acciones cuando el pavimento alcance una calificación de servicio final ( $CSA_f$ ) de 2.5. En carreteras de menor tránsito, el valor anterior deberá ser 2.0.



#### 4.2.2. Ejemplo 1.

El proyecto es el tramo Amozoc-San Hipólito de 23 kilómetros, de la carretera Puebla-Tehuacán. Es de dos carriles (uno por sentido) y tiene un tránsito diario promedio anual (TDPA) de 10,500 vehículos, con 75% de automóviles, 5% de autobuses y 20% de camiones de carga. La tasa de crecimiento media anual del tránsito (TCMA) es de 0.5%. La CSA del tramo es de 2.62. La estructura del pavimento está constituida por una carpeta asfáltica de 30 cm y una base de 14 cm de material CL (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos [Referencia 32]), desplantada sobre una subrasante de mala calidad (CBR=15). El horizonte de análisis seleccionado es de 15 años.

La Tabla 4.1 muestra la evolución del número de aplicaciones de eje simple equivalente para cada uno de los años del horizonte de análisis. Los valores en esta tabla fueron obtenidos considerando el TDPA del tramo, su TCMA y coeficientes unitarios de daño calculados para los distintos tipos de vehículos en la composición vehicular, según la distribución promedio del peso de los mismos detectada en carreteras mexicanas (Referencia 33). También se asumieron un factor de distribución direccional de 50% y un factor de distribución por carril de 100%, por tratarse de una carretera de un carril por sentido.

La Tabla 4.2 presenta la cuenca promedio de deflexiones medida en el tramo con el KUAB, así como los correspondientes módulos calculados.

Los coeficientes de la carpeta asfáltica y de la base según las Ecs. 4.1 y 4.2 respectivamente, son:

$$a_{CA} = 0.135$$

$$a_B = 0.067$$

Por lo tanto, el número estructural actual del pavimento es:

$$NE_a = 1.964$$

**Tabla 4.1 Evolución del Tránsito Convertido a Ejes Simples Equivalentes; Proyecto 1.**

Años	Ejes Simples Equivalentes W
1	2'147,838
2	4'306,416
3	6'475,786
4	8'656,004
5	10'847,122
6	13'049,196
7	15'262,281
8	17'486,430
9	19'721,701
10	21'968,148
11	24'225,827
12	26'494,794
13	28'775,107
14	31'066,821
15	33'369,993

**Tabla 4.2 Cuenca Promedio de Deflexiones Obtenida en el Tramo y Módulos Calculados; Proyecto 1.**

Sensor	Deflexión (mm)	Capa del Pavimento	Módulo (kg/cm <sup>2</sup> )
D0	0.880	Carpeta Asfáltica	5,500
D1	0.714	Base	1,100
D2	0.608	Subrasante	1,100
D3	0.477		
D4	0.247		
D5	0.157		
D6	0.114		

La Tabla 4.3 ilustra el proceso de tanteos para determinar el número estructural inicial a partir del número estructural actual ( $NE_a$ ), la CSA del pavimento y las aplicaciones de eje simple equivalente acumuladas hasta el momento actual desde diferentes años considerados de inicio del periodo de

comportamiento. Primero se presenta el cálculo de las caídas de la CSA (ó ISA) entre el momento inicial y el momento actual ( $D\ ISA$ ) y entre el momento inicial y el momento terminal ( $D\ ISA_t$ ). Posteriormente se muestran 19 tanteos realizados, correspondiendo cada uno de ellos a un número diferente de años desde el inicio del período de comportamiento. Para cada tanteo se presenta el número de aplicaciones acumuladas ( $W$ ) obtenido a partir de estimaciones del tránsito pasado; el número estructural inicial ( $NE$ ) que permite resistir dichas aplicaciones, obtenido por tanteos a partir de la Ec. 4.7; el número de aplicaciones hasta el momento terminal ( $W_t$ ) con ese número estructural inicial, también obtenido a partir de la Ecuación 4.7; el número estructural actual ( $NE_a$ ), obtenido a partir de la Ec. 4.8; y la vida remanente calculada ( $VR$ ). Como es evidente en la tabla, se obtiene que el inicio del período de comportamiento de este pavimento fue hace 19 años, el número acumulado de aplicaciones desde ese momento hasta el momento de la evaluación (período en el cual el ISA pasó de 4.6 a 2.62) es del orden de 39 millones, el número estructural inicial es de 4.78, el número de aplicaciones hasta el momento terminal es de poco más de 66 millones y la vida remanente en el momento actual (de la evaluación) es de 41%. Al final de la tabla se presenta el cálculo, mediante la Ec. 4.7, del número de aplicaciones (con el número estructural inicial antes obtenido) entre el inicio del período de comportamiento (en que el CSA del pavimento es 4.6) y el momento en que el pavimento alcanza una calificación de servicio final ( $CSA_f$ ) de 2.5. Este valor resultó del orden de 43.8 millones.

Al aplicarse la Ec. 4.7 (con el número estructural inicial anterior,  $Z_R = -1.645$  para  $R = 95\%$ ,  $S_o = 0.45$  y  $M_R = 1,100\text{ kg/cm}^2$ ) se obtiene que la CSA del pavimento pasará de 4.6 (inicial) a 2.5 (final) (ó un  $D\ ISA = 2.1$ ) después de la aplicación de 43.8 millones de ejes simples equivalentes. Dado que según la Tabla 4.3 ya se han aplicado 38.8 millones, restan por aplicarse alrededor de 5 millones. Según la Tabla 4.1, estas aplicaciones se tendrán en algún momento del Año 3 a partir del momento actual. Dada la cercanía de este momento con el actual (de la evaluación con deflexiones), en este trabajo se considerarán para este ejemplo acciones de rehabilitación a partir del momento actual. Por lo tanto, en este caso no es necesario determinar la evolución de la calidad de servicio entre el momento actual y el momento final.

**Tabla 4.3 Determinación del Número Estructural Inicial; Proyecto 1.**

AÑOS	Wa	NEo	Wt	NEa	VR
0					
-1	2137153	3.10	2759644	0.70	0.23
-2	4263673	3.45	5883787	0.95	0.28
-3	6379613	3.67	9188658	1.12	0.31
-4	8485026	3.83	12543378	1.24	0.32
-5	10579965	3.96	16032591	1.35	0.34
-6	12664481	4.07	19636402	1.45	0.36
-7	14738626	4.16	23105863	1.51	0.36
-8	16802452	4.24	26639304	1.57	0.37
-9	18856011	4.31	30119285	1.61	0.37
-10	20899352	4.38	34000318	1.69	0.39
-11	22932528	4.44	37676577	1.74	0.39
-12	24955588	4.49	41007485	1.76	0.39
-13	26968584	4.54	44599427	1.79	0.40
-14	28971564	4.59	48470311	1.85	0.40
-15	30964580	4.63	51780566	1.86	0.40
-16	32947680	4.67	55291682	1.89	0.40
-17	34920914	4.71	59014350	1.92	0.41
-18	36884330	4.74	61951889	1.92	0.40
-19	38837979	4.78	66071983	1.97	0.41

ISAO	4.60
ISAA	2.50
D ISA	2.10
NEo	4.78
W <sub>2.5</sub>	43869291

### 4.2.3. Ejemplo 2.

Este proyecto es el tramo límite de Edos. Pue/Mor-Izúcar de Matamoros, de 31 kilómetros, de la carretera Sta. Bárbara-Izúcar de Matamoros. Es de dos carriles y tiene un TDPA de 3,920 vehículos, con 80% de automóviles, 5% de autobuses y 15% de camiones de carga. La TCMA del tránsito es de 3.1%. La CSA del tramo es de 3.48. La estructura del pavimento está constituida

por una carpeta asfáltica de 15 cm, una base de 15 cm de grava limosa compacta, una subbase de 30 cm de arena limosa; toda la estructura anterior desplantada sobre una subrasante, también de arena limosa, de mala calidad (CBR=9). El horizonte de análisis, como ya se señaló, es de 15 años.

La Tabla 4.4 muestra la evolución del número de aplicaciones de eje simple equivalente para los diferentes años del horizonte de análisis. La Tabla 4.5, por su parte, muestra la cuenca promedio de deflexiones obtenida con el Dynatest en este caso y los módulos calculados para cada una de las capas. Los coeficientes estructurales de la carpeta asfáltica, de la base y de la subbase, evaluados a partir de los módulos, son:

$$a_{CA} = 0.221$$

$$a_B = 0.132$$

$$a_{SB} = 0.104$$

Por lo tanto, el número estructural actual del pavimento es:

$$NE_a = 3.307$$

La Tabla 4.6 ilustra el proceso de tanteos para valuar el número estructural inicial del pavimento. Se obtiene que el inicio del período de comportamiento considerado ocurrió hace poco más de 4 años, el número de aplicaciones entre ese momento y el momento de la evaluación (período en el cual el ISA pasó de 4.6 a 3.48) es de alrededor de 2.5 millones, el número estructural inicial es del orden de 4.35, el número de aplicaciones hasta el momento terminal es de alrededor de 10.6 millones y la vida remanente en el momento actual es de 77%. La tabla también muestra un estimado del número de aplicaciones (con el número estructural inicial anterior) entre el momento inicial y el final (momento en que el pavimento alcanza una  $CSA_f$  de 2.5). Este valor resultó del orden de 7.3 millones.

La Tabla 4.7 presenta la evolución de la CSA entre el momento actual y el final, calculada a partir de los datos anteriores y las aplicaciones de ejes simples equivalentes mostradas en la Tabla 4.4. De acuerdo con los principios ya establecidos, el número estructural del pavimento en el momento final ( $NE_f$ ) será:

$$NE_f = 4.35 [1 - (7.3 \times 10^6 / 10.6 \times 10^6)]$$

$$= 1.354$$

El porcentaje de vida remanente en el momento final es de 31%.

**Tabla 4.4 Evolución del Tránsito Convertido a Ejes Simples Equivalentes; Proyecto 2.**

Años	Ejes Equivalentes W
1	623,836
2	1'267,011
3	1'930,124
4	2'613,794
5	3'318,657
6	4'045,372
7	4'794,614
8	5'567,083
9	6'363,499
10	7'184,603
11	8'031,162
12	8'903,964
13	9'803,823
14	10'731,577
15	11'688,092

**Tabla 4.5. Cuenca Promedio de Deflexiones Obtenida en el Tramo y Módulos Calculados; Proyecto 2.**

Sensor	Deflexión (mm)	Capa del pavimento	Módulo (kg/cm <sup>2</sup> )
D0	1.074	Carpeta Asfáltica	8,998
D1	0.795	Base	2,000
D2	0.659	Subbase	1,000
D3	0.413	Subrasante	680
D4	0.288		
D5	0.216		
D6	0.171		

Tabla 4.6 Determinación del Número Estructural Inicial; Proyecto 2.

	ISAO	4.60	ISAO	4.60	
	ISAA	3.48	ISAT	2.00	
	D ISA	1.12	D ISA	2.60	
AÑOS	Wa	NEo	Wt	NEa	VR
0					
-1	605079	3.33	1496449	1.98	0.60
-2	1191964	3.80	3877119	2.63	0.69
-3	1761202	4.09	6667539	3.01	0.74
-4	2313325	4.30	9690918	3.27	0.76
-5	2848847	4.46	12762124	3.46	0.78
	ISAO	4.60			
	ISAA	2.50			
	D ISA	2.10			
	NEo	4.35			
	W <sub>2.5</sub>	7321356			

Tabla 4.7. Evolución de la CSA del Pavimento hasta Alcanzar una CSA<sub>r</sub> de 2.5; Proyecto 2.

Años	CSA
0	3.48
1	3.32
2	3.17
3	3.03
4	2.90
5	2.76
6	2.63
7	2.50

### 4.3. Generación de Alternativas de Conservación.

Como resultado de la etapa anterior, se obtiene un estimado de capacidad estructural remanente del pavimento en el momento de requerir la primera acción de rehabilitación. Los mismos principios expuestos en la sección anterior pueden aplicarse para valorar la vida remanente de la estructura al final de cada período de comportamiento.

A partir de este instante, teóricamente pueden generarse una infinidad de alternativas de conservación para cubrir los requerimientos del tránsito y ambientales del siguiente período de comportamiento. La ecuación de daño de la AASHTO para pavimentos flexibles (Ec. 4.7) permite estimar el correspondiente número estructural requerido sobre la subrasante. En este momento surgen las opciones de utilizar la fracción remanente de capacidad estructural del pavimento existente y completar la estructura requerida con una sobrecapa nueva de concreto asfáltico (reencarpetado), o desechar la estructura existente total o parcialmente y reconstruirla en su totalidad o sólo a partir de ciertas capas hacia arriba. La decisión en relación con estas opciones deberá tomarse con base en análisis del costos de ellas, que permita seleccionar la más económica.

El desarrollo de este proceso se ejemplifica a continuación con los dos proyectos considerados. En ambos ejemplos, en cualquier momento final de cualquier alternativa (al decidir rehabilitarse el pavimento, como por ejemplo al llegar su CSA a 2.5) se comparan los costos constructivos de la opción de rehabilitar el pavimento utilizando completa o parcialmente la estructura existente (reciclando incluso el material de algunas de las capas) (opción 1) con la de reconstruirlo totalmente (de la subbase para arriba) (opción 2), seleccionándose la de menor costo. Como es evidente la definición de las acciones de ambas opciones (y de su costo) no es muy específica, lo cual se considera adecuado para el nivel de red asumido en este capítulo; acciones más específicas deberán definirse en el nivel de proyecto. En la estimación de los costos constructivos de ambos proyectos, se asume un ancho de corona de la carretera existente de 10.5 m (2 carriles de 3.5 m de ancho y 2 acotamientos de 1.75 m).



### 4.3.1. Ejemplo 1.

En este caso, a partir del año 0, se generan tres alternativas de conservación para cubrir el período total de 15 años: la primera, con acciones de rehabilitación en los años 0, 5 y 10; la segunda, con una acción inicial y otra en el año 10; y la tercera, con una sola acción inicial. Como ya se dijo, en los momentos de las acciones se calculan los costos constructivos de las opciones 1 y 2 antes señaladas y se selecciona la de menor costo. Cuando se considera la construcción de cualquier capa nueva (en cualquiera de las dos opciones consideradas), se asumen los siguientes costos constructivos de principios de 1997 (Referencia 34): 490 pesos por metro cúbico de capa de concreto asfáltico, 100 pesos por metro cúbico de capa de base y 95 pesos por metro cúbico de capa de subbase. Asimismo, para los costos anteriores, se asumen las siguientes calidades para capas nuevas:  $E=21,100 \text{ kg/cm}^2$  para capa de concreto asfáltico,  $\text{CBR}=80$  para capa de base y  $\text{CBR}=40$  para capa de subbase.

Las Tablas C.1 a C.3, en el Anexo C, muestran las hojas de cálculo empleadas en el diseño de los espesores requeridos en cada alternativa, así como en la evaluación de costos y económica de éstas.

La Tabla 4.8 resume algunos resultados relevantes obtenidos de las hojas de cálculo mencionadas. En ella se presentan, para cada período de comportamiento de cada alternativa, el cociente entre el número estructural del pavimento al final del período anterior y el requerido para afrontar las condiciones del período dado ( $NE_r$ ). También se presenta el costo constructivo por kilómetro de las opciones 1 y 2. En cada caso, el costo de la opción más económica se resalta con negrillas. Al cociente antes señalado, en este trabajo se le denomina como resistencia relativa. Nótese que en todos los períodos la opción de menor costo es la rehabilitación, utilizando parcial o totalmente la estructura existente (opción 1). Como es evidente en la tabla, esta opción es progresivamente más conveniente en relación con la de reconstrucción total en la medida en que la resistencia relativa del pavimento al inicio del período considerado es mayor. Según otros análisis realizados, la opción de reconstrucción total resulta más conveniente cuando la resistencia relativa inicial del pavimento es menor de 0.15 - 0.20 (es decir, se tiene menos de 15 - 20% de la capacidad estructural requerida para el siguiente período de comportamiento). Este resultado es indicativo del nivel a partir del cual ya resulta económicamente inconveniente el tratar de

aprovechar cualquier fracción de la capacidad estructural existente (incluyendo quizá a la subrasante) para afrontar el siguiente período.

La Figura 4.1 ilustra la evolución del ISA ó CSA en el proyecto para las 3 alternativas, durante los 15 años del período de análisis.

**Tabla 4.8 Resistencia Relativa y Costos de Obra; Proyecto 1.**

Alternativa	Período de Comportamiento	$NE_f / NE_r$	Costos de Construcción (Pesos)	
			Opción 1	Opción 2
1	0 - 5	$1.970 / 4.01 = 0.491$	<b>722,682</b>	1'204,336
	5 - 10	$1.100 / 4.03 = 0.273$	<b>1'038,056</b>	1'209,510
	10 - 15	$1.140 / 4.04 = 0.282$	<b>1'027,426</b>	1'213,024
2	0 - 10	$1.970 / 4.34 = 0.454$	<b>839,601</b>	1'305,789
	10 - 15	$1.328 / 3.95 = 0.336$	<b>928,948</b>	1'185,018
3	0 - 15	$1.970 / 4.37 = 0.451$	<b>850,230</b>	1'316,418

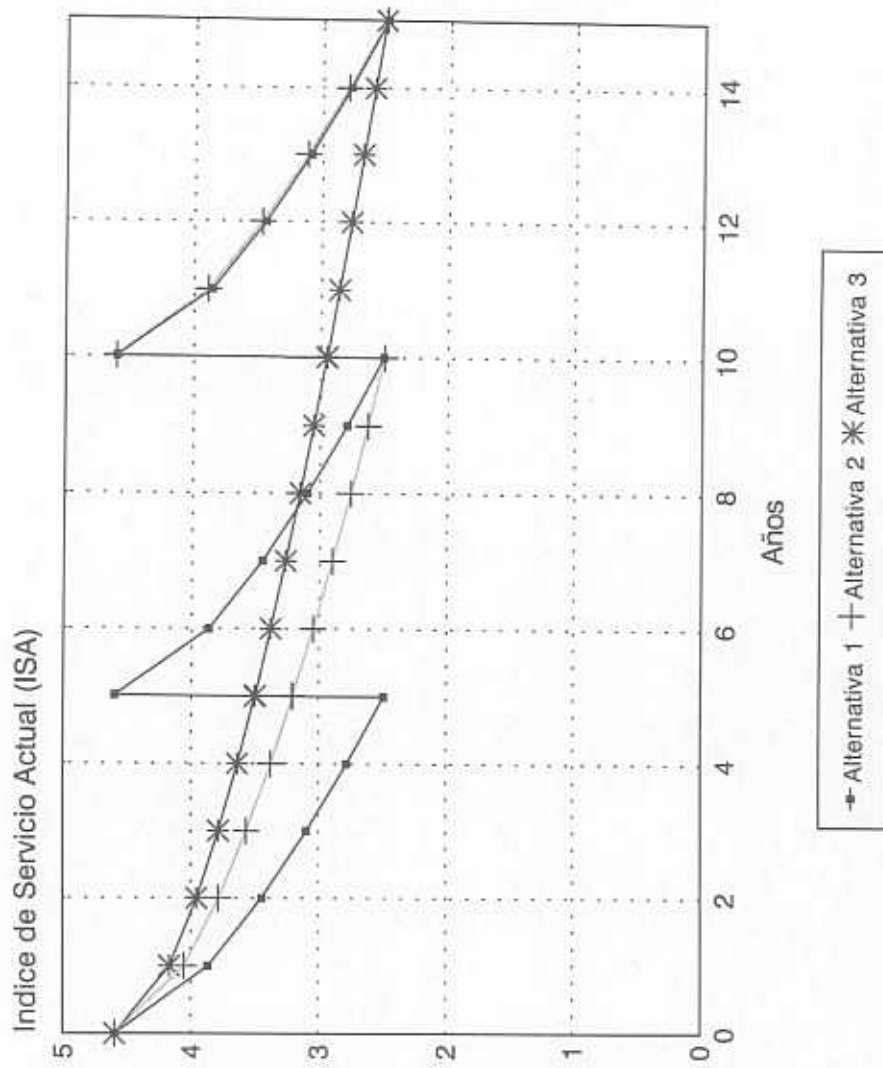


Figura 4.1. Evolución del Índice de Servicio Actual para las Tres Alternativas del Ejemplo 1.

### 4.3.2. Ejemplo 2.

En este caso se generan dos alternativas, una para cubrir los ocho últimos años del período de análisis, y otra que considera una acción inicial en el año 0 (momento actual) para abarcar el período total de 15 años.

Las Tablas C.4 y C5, en el Anexo C, presentan los cálculos realizados para determinar los espesores de las dos opciones de ambas alternativas. La Tabla 4.9 es para este ejemplo lo que la 4.8 fue para el ejemplo anterior. Puede observarse en esta tabla que, también en este ejemplo, la opción de rehabilitación utilizando completa o parcialmente la estructura existente (opción 1) resulta más económica que la de reconstrucción total (opción 2) para ambas alternativas.

La Figura 4.2 ilustra la evolución del ISA durante los 15 años del período de análisis, para ambas alternativas.

**Tabla 4.9. Resistencia Relativa y Costos de Obra; Proyecto 2.**

Alternativa	Período de Comportamiento	$NE_f / NE_r$	Costos de Construcción (Pesos)	
			Opción 1	Opción 2
1	7 - 15	$1.348 / 4.32 = 0.312$	<b>1'052,876</b>	1'205,372
2	0 - 15	$3.430 / 4.65 = 0.738$	<b>432,246</b>	1'301,090

### 4.4. Evaluación Económica de Alternativas.

La evaluación económica efectuada en este trabajo es del mismo tipo de la que realizan la mayoría de los SGP. Consiste en estimar los costos de operación del flujo vehicular para cada uno de los años del período de análisis, de acuerdo con el valor de ISA imperante en cada uno de ellos. Los valores de costo de operación por kilómetro por tipo de vehículo y para distintos valores del ISA fueron tomados de estudios anteriores realizados en el Instituto Mexicano del Transporte (Referencia 35).

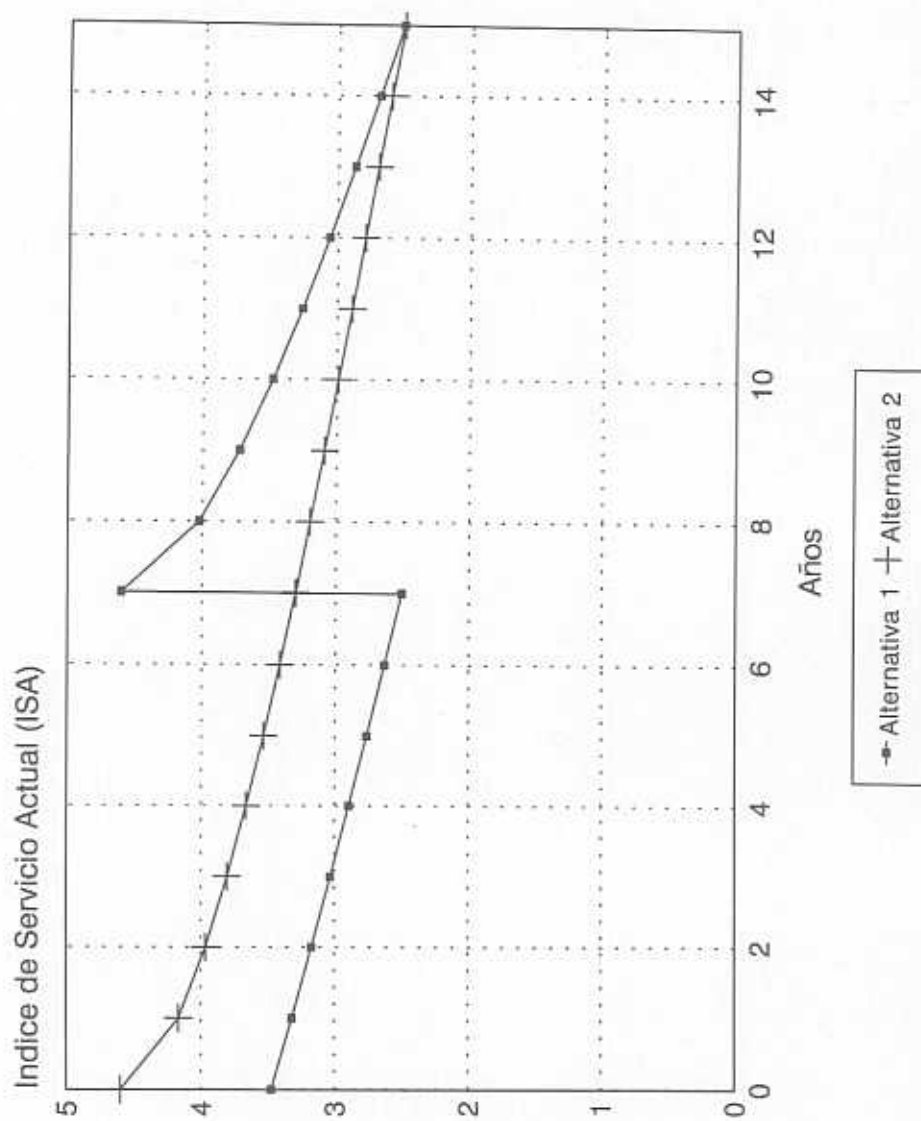


Figura 4.2. Evolución del Índice de Servicio Actual para las Dos Alternativas del Ejemplo 1.

Como resultado del proceso anterior se obtiene para cada alternativa un flujo anual de costos de operación para los 15 años del horizonte de análisis. Los costos anteriores son llevados a valor presente aplicando una tasa de descuento que trata de considerar el valor del dinero en el tiempo (tasa promedio a la que el dinero podría ser invertido en el mercado de capitales). En este caso, se seleccionó una tasa real de descuento del 5% (descontando inflación). La comparación de alternativas se realizó comparando el costo total de las alternativas, en donde dicho costo es igual a la suma de los valores descontados de los costos constructivos y de operación incurridos en los distintos años del período de análisis.

La Tabla 4.10 resume la suma de costos descontados de construcción, de operación y total para las alternativas de ambos proyectos. También se muestra el ISA promedio en el tramo durante los 15 años del período de análisis.

**Tabla 4.10. Resultados de ISA Promedio y Costos para cada Alternativa en cada Proyecto.**

Proyec- -to.	Alter- nativa.	ISA Promedio	Suma de Costos Descontados ( \$ / km )					
			Construc- tivo	%	De Operación	%	Total	%
1	1	3.14	2'648,430	4.6	54'802,208	95.4	57'450,639	100
	2	3.17	1'876,072	3.3	54'402,671	96.7	56'278,754	100
	3	3.22	1'316,418	2.4	53'862,184	97.6	55'178,602	100
2	1	3.06	646,374	2.7	23'058,411	97.3	23'704,786	100
	2	3.24	432,246	1.9	22'380,726	98.1	22'812,972	100

A partir de la Tabla 4.10, son evidentes los siguientes aspectos:

- La preponderancia de los costos de operación vehicular en los costos totales (constituyendo más del 95% de estos últimos).

- Aunque las alternativas de un mismo proyecto son prácticamente iguales, lo cual fundamentalmente se debe a que en todos los casos el ISA no se deja caer por debajo de 2.5 ( $ISA_t = 2.5$ ), se observa una ligera tendencia a que las alternativas más convenientes (las de menor costo total) sean aquéllas que más favorecen al mantenimiento permanente de una mejor calidad de servicio en el proyecto; es decir, aquéllas que resultan en menores costos anuales de operación vehicular durante el horizonte de análisis. En general, éstas son las que se refieren a actuaciones más inmediatas y de mayor envergadura (de mayor duración) o que resultan en períodos de comportamiento más largos. En congruencia con lo anterior, la alternativa más conveniente para el Proyecto 1 es la tres y para el Proyecto 2 es la dos. Ambas corresponden a la realización de una única acción inicial en el año cero, duradera durante los 15 años del período de análisis. La conveniencia de este tipo de estrategias se acrecentaría si se considerasen las reducciones en demoras, accidentes, etc., generadas por interferencias menos frecuentes al tránsito derivadas de actuaciones más espaciadas; los beneficios económicos resultantes de estos efectos no han sido tomados en cuenta en este trabajo.
- Destaca que las alternativas anteriores son también las de menor suma de costos de obra descontados, lo cual señala la conveniencia también para los costos constructivos de realizar acciones más definitivas (de mayor duración), aún cuando se tenga un costo inicial más elevado. Este comportamiento es resultado de la naturaleza decreciente de la resistencia estructural marginal requerida a mayores niveles de tránsito, comportamiento que se obtiene con la mayoría de los métodos existentes de diseño de pavimentos.
- En contraposición con la conveniencia para los costos de obra y de operación vehicular, de actuar de manera más definitiva para alcanzar mayores períodos de comportamiento, comúnmente se cuenta con la limitante de la escasez de recursos financieros. Esta realidad conduce a la selección de alternativas correspondientes a la postergación de la actuación y a la realización de acciones menos duraderas y más frecuentes. Si bien es cierto que éstas representan costos iniciales más bajos, también lo es que conducen a soluciones menos eficientes económicamente. Una alternativa que permitiría controlar la magnitud de los costos totales en estos casos, aunque a expensas del incremento de los costos de obra globales durante el ciclo de vida, consistiría en mantener mediante acciones más frecuentes el ISA por encima de un valor relativamente elevado ( $ISA_t$ , mayor a 2.5).

Otros estudios han demostrado que este parámetro ( $ISA_t$ ) influye de manera determinante en los costos de operación y por lo tanto, en los costos totales (Referencia 35). Una política de esta naturaleza, cuyo paradigma por otra parte son las denominadas políticas de conservación preventiva (Referencia 36), induciría a realizar acciones de menor costo individual, aunque con mucha mayor frecuencia.

Cabe mencionar que la gestión de los recursos para la conservación ante las autoridades hacendarias debe no sólo incluir lo correspondiente a las acciones de rehabilitación, sino también lo requerido para mantenimiento rutinario y periódico.





## **5. Conclusiones y Recomendaciones.**

---

### **5.1. Conclusiones.**

Dados los problemas a los que se enfrenta el país, se considera que debe darse prioridad a las actividades de conservación de la red carretera principal, así como a su ampliación y modernización, ya que ésta es la que mayor sustento proporciona a la actividad económica nacional. Para lo anterior, será necesario implementar programas de evaluación de la red con el fin de determinar las condiciones en que se encuentra y actuar en el momento en que sea necesario.

Los denominados SGP tienen la finalidad de analizar varias estrategias referentes al mantenimiento y rehabilitación. La evaluación estructural de pavimentos es una herramienta que permite definir estrategias de conservación. Uno de los fines principales de este estudio es proporcionar a los encargados de realizar estas tareas una base para mejorar los métodos y equipos empleados hasta el momento.

En la actualidad existen distintas técnicas y equipos para realizar la evaluación estructural de los pavimentos. Por ello es recomendable, de acuerdo a las necesidades del estudio y a las características de los equipos, seleccionar el más adecuado para realizarla. Dichos aparatos deben calibrarse con periodicidad para garantizar la confiabilidad de sus mediciones.

En lo referente a la evaluación estructural de pavimentos mediante deflexiones, se considera más conveniente la obtención de la curva de deflexiones que únicamente la deflexión máxima.

En este trabajo se observa que las deflexiones obtenidas entre los diferentes aparatos de evaluación no destructiva (Viga Benkelman, Dynatest y KUAB), presentan una variación significativa. Esto es debido a las diferencias en las características de los aparatos (sistema de aplicación de la carga, tiempo de duración de la carga, sistema de medición de las deflexiones, etc.), a las características de la estructura del pavimento, etc. Con el fin de minimizar estas discrepancias, sería recomendable introducir procedimientos de calibración de los resultados de los aparatos entre sí.

En los análisis de comparación de deflexiones con los distintos aparatos se tomó como equipo de referencia al Dynatest, por ser uno de los que tienen mayor repetibilidad y reproducibilidad.

Se elaboraron dos ejemplos en los cuales se empleó la información obtenida en la red carretera del Estado de Puebla; se escogieron dos tramos de dicha red con características distintas. Se obtuvo que los costos de operación vehicular constituyen más del 95% de los costos totales de transporte en ambos tramos.

A partir de ambos ejemplos anteriores se observó que las alternativas de menor costo total son aquéllas que más favorecen al mantenimiento permanente de una mejor calidad de servicio en el proyecto; es decir, aquéllas que resultan en menores costos anuales de operación vehicular.

En la realidad, la limitante de recursos es uno de los factores que más influyen para determinar qué tipo de acciones de rehabilitación se efectuarán, por lo que en general se realizan acciones económicas. Cabe señalar que si bien es cierto que éstas representan costos iniciales más bajos, también lo es que conducen a soluciones menos eficientes económicamente.

## **5.2. Recomendaciones.**

Es indispensable la calibración periódica de los aparatos de evaluación estructural y de los otros tipos.

En relación con la definición de estrategias de conservación, es importante tomar en cuenta lo siguiente:

- Por la importancia de los costos de operación en los costos totales del transporte, las estrategias más eficientes resultan ser aquéllas que mantienen en mejor estado el nivel de servicio del pavimento durante el ciclo de vida; por lo tanto, son aquéllas que consideran una actuación más inmediata y más duradera, ligadas con el suministro de estructuras iniciales fuertes y de refuerzos definitivos.
- Desde el punto de vista de los costos de conservación, éstos resultan menores si se puede aprovechar total o parcialmente la estructura existente. Cabe señalar que lo anterior sólo será posible si se cuenta con una

estructura de capacidad remanente adecuada, resultado de haber proporcionado al camino una estructura inicial adecuada y de actuar sobre ella de manera oportuna (antes de que se deteriore en demasía).

- La Referencia 37 señala también que, particularmente en el caso de carreteras en buen estado ( $ISA > 3.0$ ) con intensidades de tránsito de medianas a elevadas ( $> 3,000$  vehículos por día), la adopción de políticas de mantenimiento preventivo reduce los costos totales de obra durante la vida útil.



## Referencias.

---

1. Dirección General de Evaluación, Coordinación General de Planeación y Centros SCT. "Longitud de la Infraestructura Carretera del País". México, D.F., Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 1996.
2. Dirección General de Construcción y Conservación de Obra Pública. "Elaboración de Estrategias para la Red Troncal de Carreteras, Informe Final". México, D.F., Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 1992.
- 3.- Rico, A. and A. Mendoza. "Financial Mechanisms for Road Maintenance in Developing Nations". Washington, D.C., USA. Transportation Research Record No. 1509, TRB, National Research Council, 1995.
4. Haas, R. and W. Ronald Hudson. "Pavement Management Systems". R. E. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 1982.
5. Texas Transportation Institute. "Manual del Curso sobre Gestión de Pavimentos y Superficies de Caminos para Agencias Locales". Texas A&M University, College Station, Texas, 1995.
6. National Highway Institute (NHI). "Técnicas para Rehabilitación de Pavimentos". Washington, D.C., Federal Highway Administration (FHWA), 1993.
7. AASHTO. "Guide for Design of Pavement Structures 1986". Washington, D.C., USA, American Association of State Highways and Transportation Officials, 1986.
8. Highway Research Board. "The WASHO Road Test, Part 2: Test Data Analyses and Findings". HRB Special Report 22, 1955.
9. Highway Research Board. "The AASHO Road Test; Report 5-Pavement Research". HRB Special Report 61-E, 1962.
10. Canadian Good Roads Association. "Manual on Pavement Investigations". CGRA Tech. Publ. No. 11 1959.

11. Canadian Good Roads Association: "A Guide to the structural Design of Flexible and Rigid Pavements in Canada". CGRA September, 1965.
12. Transportation Research Board, Committee A2K01, and Task Force A2T56. "State-of-the-Art Report on Non-Destructive Structural Evaluation of Pavements". Draft Rept., January 1975.
13. Drake, W.B., and J.H. Havens "Re-evaluation of Kentucky Flexible Pavement Design Criteria", HRB, Bull. 233, 1959.
14. Grupo RVO y GEOSOL, S.A. de C.V. "Medición de Deflexiones Mediante la Utilización de Equipo de Impacto FWD y Obtención del Valor Relativo de Soporte de las Capas de Pavimento en el Lugar, para su aplicación en el Sistema Mexicano de Administración de Pavimentos (SIMAP)". México, Pue. SCT. Agosto 1996.
15. Raúl Vicente Orozco y Cía., S.A. de C.V. "Programa Piloto en el Edo. de Puebla para la aplicación del Sistema Mexicano de Administración de Pavimentos (SIMAP)". México, Pue. SCT, Septiembre 1996.
16. Campos M., Jorge. "Aplicación de los Sistemas de Administración de Pavimentos a un Caso Real: Red Carretera Federal del Estado de Puebla". Tesis para obtener el Grado de Maestro en Ingeniería en Vías Terrestres, UACH, Chih., México, 1997.
17. Asphalt Institute. "Asphalt Overlay for Highway and Rehabilitation". Manual Series No. 17 (MS-17). June 1983.
18. Delft University of Technology. "Comparative Study and Field Calibration of Falling Weight Deflectometers". U.S.A, Faculty of Civil Engineering, Road and Railroad Research Laboratory, March 1994.
19. Tabb, J. R. and D. Kulash. "SHRP (Strategic Highway Research Program) Product Catalog". National Research Council, Washington, D.C., 1992.
20. Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías Terrestres, A.C. "La Integración de Redes, Futuro de la Infraestructura para el Transporte

- en México*". Guanajuato, Gto., Reunión Nacional de Vías Terrestres, Junio 1992.
21. American Association of State Highways and Transportation Officials. "Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing: Part II; Methods of Sampling and Testing". Washington, D.C., AASHTO, July 1982.
  22. US Department of Transportation. "Manual del Usuario del ELSYM5 para IBM-PC". Washington, D.C., Federal Highway Administration, 1986.
  23. US Department of Transportation. "Techniques for Pavement Rehabilitation: A Training Course". Washington, D.C., Federal Highway Administration, National Highway Institute, 1993.
  24. Instituto Mexicano del Transporte. "Primera Fase: Sistema Mexicano para la Administración de los Pavimentos (SIMAP)". Querétaro, Qro., Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Documento Técnico No. 3, 1990.
  25. Instituto Mexicano del Transporte. "Manual Operativo de Campo: Sistema Mexicano para la Administración de los Pavimentos (SIMAP)". Querétaro, Qro., Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Documento Técnico No. 4, 1990.
  26. Instituto Mexicano del Transporte. "Manual del Usuario; Sistema Mexicano para la Administración de los Pavimentos (SIMAP)". Querétaro, Qro., Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Documento Técnico No. 5, 1990.
  27. Instituto Mexicano del Transporte. "Manual del Usuario; Módulo Económico del Sistema Mexicano para la Administración de los Pavimentos (SIMAP)". Querétaro, Qro., Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Documento Técnico No. 9, 1990.
  28. Dynatest Consulting Inc. "Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design". Ojaio, California, USA, Dynatest Consulting Inc. 1991.
  29. Raul Vicente Orozco y Cia. S.A. de C.V. "Pavement Evaluation Based on Dynamic Deflection". México, D.F., SCT, 1996.



30. US Department of Transportation.. "Techniques for Pavement Rehabilitation: A Training Course". Washington, D.C., USA, Federal Highway Administration. National Highway Institute, 1993.
31. Roberts, J. D. and Martin, T. C. "Recommendations for Monitoring Pavement Performance". Australia, Transport Research Ltd. National Strategic Research Project, Research Report ARR 293. ARRB August 1996.
32. Carlos Crespo Villalaz. "Mecánica de Suelos y Cimentaciones". Monterrey, N.L., 1976.
33. Durán H. Gandhi, et al. "Estudio de Peso y Dimensiones de los Vehículos de Carga que Circulan sobre las Carreteras Nacionales". Querétaro, Qro., Instituto Mexicano del Transporte. SCT, Documento Técnico No. 18, 1996.
34. Dirección General de Servicios Técnicos. "Costos de Obra de Conservación". México, D.F. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 1997.
35. Rico, Alfonso y Mendoza, Alberto. "Análisis Económico del Comportamiento de Secciones Estructurales de Carreteras en Diversas Circunstancias". Querétaro, Qro., Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 61, 1995.
36. US Department of Transportation, "Pavement Preventive Maintenance: An Idea Whose Time Has Come". Washington, D.C., USA, Highway Research Program Implementation, Federal Highway Administration, FOCUS, Strategic, Agosto de 1995.
37. Van Gurp C. A. P. M y J. Dorsman. "Comparative Study and Field Calibration of Falling Weight Deflectometers". Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Road and Railroad Research Laboratory, Delft, Holanda, 1994.

## **Anexos.**

---



## **Anexo A**



## Anexo A1. Información de Deflexiones Obtenidas con Ambos Deflectómetros

APARATO: DYNATEST									
POSICION DE SENSORES (cm)			0	20	30	60	90	120	150
ESTACIÓN		CARGA (kgf)	DEFLEXIONES (milésimas de mm)						
			D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
D	40000	6091	1012.2	772.9	548.1	240.3	149.1	93.0	58.7
D	40200	6403	891.5	687.6	511.3	248.9	169.4	115.3	78.0
D	40400	6286	1021.1	790.4	570.0	253.5	155.2	105.4	70.1
D	40600	6251	938.0	733.6	520.7	244.3	142.0	99.3	65.8
D	40800	6156	1091.9	776.2	510.3	244.6	158.8	118.9	80.3
D	41000	6315	1152.1	860.8	566.4	243.8	131.8	93.0	66.5
D	41200	6163	1114.6	852.7	634.0	273.8	156.2	113.8	79.8
D	41400	6224	1043.7	787.7	567.2	269.7	167.1	103.1	58.4
D	41600	7090	632.5	421.6	241.6	53.1	37.1	26.9	20.3
D	41800	6059	1057.7	801.6	587.0	239.5	106.7	53.1	37.3
D	42000	6361	1044.2	757.2	525.5	236.2	128.3	89.2	57.7
D	42200	6568	1044.2	794.5	541.3	236.7	143.5	98.3	66.5
D	42400	6511	1015.5	702.8	462.0	198.4	123.4	93.7	66.5
D	42600	6457	1491.7	909.3	517.4	198.4	131.8	99.3	74.4
D	42800	5901	747.5	548.9	418.1	177.8	88.1	65.0	53.3
D	43000	5150	628.4	456.4	376.7	181.6	87.4	51.1	33.3
D	43200	5833	1022.4	763.0	558.3	228.6	111.3	68.8	46.2
D	43400	6715	946.9	654.1	437.9	197.1	122.7	88.1	62.5
D	43600	6639	866.6	645.4	452.1	203.2	121.2	89.2	61.7
D	43800	6655	755.4	580.1	428.2	211.3	125.7	83.3	53.3
D	44000	6435	750.1	580.1	452.9	237.0	147.6	103.4	66.8
D	44200	6408	728.5	554.5	411.5	181.9	105.2	75.2	48.3
D	44400	6491	887.7	647.4	480.8	217.4	131.6	87.1	63.2
D	44600	6583	882.4	666.0	489.7	233.4	160.8	119.9	88.1
D	44800	6760	653.0	502.7	374.4	186.2	111.5	80.5	61.0
D	45000	6178	918.0	715.8	530.6	256.8	142.5	84.1	48.3
D	45200	6246	796.0	628.9	474.7	218.4	134.1	83.8	46.0
D	45400	6648	788.4	588.3	414.0	184.2	112.3	79.0	51.1
D	45600	6381	917.7	691.6	511.3	249.9	160.3	109.0	65.3
D	45800	7081	666.0	497.6	328.9	137.4	75.7	44.5	27.2
D	46000	6708	745.0	583.7	423.4	214.9	141.5	109.2	79.2
D	46200	6558	721.6	536.2	405.1	190.0	104.4	70.6	51.6
D	46400	6377	824.0	628.9	471.4	218.7	122.2	79.5	47.2
D	46600	6274	838.1	637.0	478.1	224.9	128.2	87.0	62.5
D	46800	6839	1031.0	667.5	416.8	155.2	92.7	70.4	38.9
D	47000	6525	1016.5	682.0	449.8	216.9	137.2	85.9	56.9
D	47200	5294	510.3	317.5	192.5	51.3	42.4	28.7	20.8
D	47400	5104	523.7	279.7	162.3	61.5	38.1	28.2	20.6
D	47600	5010	731.0	524.8	360.2	164.6	82.3	55.4	34.3
D	47800	5276	846.6	667.8	514.6	266.4	156.7	105.9	63.8
D	48000	5277	691.6	524.0	392.4	174.8	100.8	69.9	43.2
D	48200	5797	993.6	760.5	565.9	277.1	167.4	109.7	63.2
D	48400	5142	892.3	685.0	505.2	238.0	131.3	72.9	38.9
D	48600	5425	1055.1	860.0	678.7	375.4	241.8	164.1	109.2
D	48800	5743	908.3	699.0	537.7	283.2	186.7	135.6	91.2
D	49000	5366	1155.2	925.3	702.3	368.8	215.4	128.5	80.0
D	49200	5530	1003.6	756.7	574.3	298.7	178.1	125.2	81.3
D	49400	5162	1128.3	907.5	694.2	355.1	218.7	147.6	105.9
D	49600	4891	2190.8	1440.7	946.9	337.8	159.3	88.4	55.4
D	49800	4994	1017.5	792.2	618.5	307.1	173.7	111.5	77.5
D	50000	5468	998.5	781.8	607.6	306.6	184.2	120.7	88.9

D = Carril Derecho; I = Carril Izquierdo

**Anexo A1. Información de Deflexiones Obtenidas con Ambos Deflectómetros**  
**APARATO: DYNATEST (Continuación)**

POSICION DE SENSORES (cm)		0	20	30	60	90	120	150	
ESTACIÓN	CARGA (kgf)	DEFLEXIONES (milésimas de mm)							
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	
I	50100	6274	838	637	478	225	128	87	63
I	49900	6662	951.5	767.1	597.9	299.5	164.3	109.2	84.6
I	49700	6110	985.8	763.8	630.9	324.1	179.3	112.0	84.3
I	49500	6525	791.5	668.0	562.4	317.8	177.3	121.7	100.3
I	49300	6668	1145.5	897.1	697.2	382.3	232.2	149.1	113.0
I	49100	6904	895.6	706.1	561.1	278.9	163.1	117.3	89.9
I	48900	7175	987.3	762.5	601.2	344.4	215.1	147.3	114.0
I	48700	6149	1128.8	902.2	749.3	417.6	244.1	170.7	120.9
I	48500	6370	796.8	668.0	558.8	313.4	167.9	102.4	74.2
I	48300	7050	814.3	620.5	480.8	227.6	131.8	91.2	64.8
I	48100	6655	947.2	753.9	607.1	302.0	164.8	117.3	90.2
I	47900	6693	531.9	449.6	368.3	196.1	104.4	66.8	51.1
I	47700	6441	855.2	681.5	532.4	258.3	162.3	115.3	87.1
I	47500	6149	549.7	454.9	363.2	161.8	70.1	47.0	39.1
I	47300	5948	483.4	402.8	325.4	153.4	79.0	54.1	40.9
I	47100	6240	422.7	323.6	248.7	106.9	52.6	32.5	28.2
I	46900	7952	557.8	424.7	330.7	147.6	76.7	54.9	44.7
I	46700	7647	864.9	685.8	547.4	273.1	138.4	73.2	39.4
I	46500	7819	707.9	568.2	457.2	214.1	117.1	81.0	78.5
I	46300	7820	844.0	653.3	513.1	237.2	118.6	84.1	71.9
I	46100	7826	879.6	711.7	571.5	265.7	152.7	119.4	96.0
I	45900	8390	541.3	427.7	344.7	165.6	89.9	66.8	58.4
I	45700	8179	754.6	583.2	448.6	227.8	140.5	100.6	81.5
I	45500	7236	867.7	661.4	509.0	218.4	122.7	89.7	65.3
I	45300	6430	976.6	743.5	569.0	253.5	123.7	65.5	39.1
I	45100	6543	731.5	527.8	395.2	176.5	97.3	74.7	61.7
I	44900	6924	583.2	450.3	342.9	147.3	85.1	72.1	60.2
I	44700	6031	649.5	497.3	368.3	164.1	94.0	67.6	58.7
I	44500	6084	462.3	382.0	310.1	154.7	84.8	51.8	57.2
I	44300	5892	680.7	514.6	396.5	181.6	96.0	68.6	56.6
I	44100	5542	647.4	485.4	366.0	154.7	86.6	67.8	52.3
I	43900	5968	629.9	447.8	339.9	158.2	94.5	70.9	53.3
I	43700	5658	762.5	583.7	430.5	181.6	102.1	73.7	60.7
I	43500	5680	638.8	484.4	384.3	182.9	99.3	73.9	60.7
I	43300	5779	566.4	465.1	376.2	203.2	120.4	71.6	49.5
I	43100	5384	669.0	527.1	404.9	175.5	74.2	39.1	33.8
I	42900	5973	731.0	577.9	459.2	197.1	94.0	61.2	54.4
I	42700	6520	537.0	413.0	322.8	148.1	78.5	55.6	41.9
I	42500	5939	782.1	615.7	485.9	234.2	127.0	89.7	61.2
I	42300	6066	867.7	696.7	557.5	264.7	129.5	92.2	70.4
I	42100	6437	396.7	314.2	250.4	113.8	62.5	44.2	38.4
I	41900	5831	772.4	610.6	479.3	223.5	121.9	81.8	65.3
I	41700	6572	534.4	384.6	276.4	91.4	39.9	31.2	23.9
I	41500	6062	804.7	617.0	492.5	218.7	92.2	53.3	38.1
I	41300	6192	685.5	537.5	430.8	215.1	126.0	88.4	68.8
I	41100	5483	1043.2	836.4	671.1	315.0	169.7	116.1	85.1
I	40900	5727	959.1	756.9	620.8	313.9	167.6	106.7	71.9
I	40700	5862	812.8	630.2	505.0	227.6	117.1	75.7	60.7
I	40500	6113	747.3	616.2	479.8	198.6	104.6	72.1	65.3
I	40300	6442	588.8	458.7	355.1	168.1	100.3	75.7	59.2
I	40100	6178	755.9	595.4	474.7	245.6	153.4	108.7	82.6
Promedios		6274	838.1	637.0	478.1	224.9	128.2	87.0	62.5

D = Carril Derecho; I = Carril Izquierdo

## Anexo A1. Información de Deflexiones Obtenidas con Ambos Deflectómetros

APARATO: KUAB									
POSICIÓN DE SENSORES (cm)			0	20	30	45	90	120	150
ESTACIÓN	CARGA (kgf)	DEFLEXIONES (milésimas de mm)							
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	
D	40000	6091	352	272	217	163	70	42	28
D	40200	6403	974	754	528	231	170	118	76
D	40400	6286	1117	859	607	249	152	102	76
D	40600	6251	939	728	493	221	126	95	70
D	40800	6156	1137	768	483	232	151	107	76
D	41000	6315	1263	927	584	233	129	97	74
D	41200	6163	1213	917	662	269	151	110	87
D	41400	6224	1058	797	554	258	145	95	57
D	41600	7090	693	444	250	66	52	28	28
D	41800	6059	1104	826	607	238	107	58	41
D	42000	6361	1132	796	508	230	130	95	60
D	42200	6568	1126	805	551	231	145	97	61
D	42400	6511	1098	751	485	236	128	99	62
D	42600	6457	1867	1038	529	208	88	101	63
D	42800	5901	685	500	376	178	87	66	45
D	43000	5150	529	374	315	158	78	45	37
D	43200	5833	1071	771	547	215	101	57	45
D	43400	6715	1069	722	476	214	133	104	64
D	43600	6639	979	737	504	222	132	107	64
D	43800	6655	783	600	444	219	130	102	57
D	44000	6435	773	619	464	258	154	113	77
D	44200	6408	783	600	424	212	107	64	58
D	44400	6491	983	707	521	235	135	99	78
D	44600	6583	957	706	504	252	177	126	96
D	44800	6760	731	584	424	204	113	104	85
D	45000	6178	983	750	541	246	123	91	54
D	45200	6246	842	647	596	249	124	92	55
D	45400	6648	852	646	527	233	129	95	57
D	45600	6381	790	744	485	244	152	127	62
D	45800	7081	753	580	417	157	93	55	42
D	46000	6708	820	639	453	235	159	107	79
D	46200	6558	726	552	426	176	98	75	55
D	46400	6377	868	651	476	226	101	80	55
D	46600	6274	727	582	383	203	102	92	54
D	46800	6839	1186	748	448	169	99	68	52
D	47000	6525	1136	740	484	208	112	78	63
D	47200	5294	484	296	169	47	40	34	21
D	47400	5104	482	252	147	63	38	34	20
D	47600	5010	576	425	271	115	75	47	31
D	47800	5276	753	598	443	237	128	86	65
D	48000	5277	660	476	333	160	91	65	39
D	48200	5797	989	736	552	276	142	97	46
D	48400	5142	742	574	417	207	111	87	21
D	48600	5425	937	745	595	319	199	127	86
D	48800	5743	866	662	501	274	182	127	87
D	49000	5366	1061	845	628	324	181	108	78
D	49200	5530	975	731	532	270	173	115	80
D	49400	5162	963	778	586	287	185	122	87
D	49600	4891	1725	1123	742	277	141	76	40
D	49800	4994	816	627	486	232	140	95	61
D	50000	5468	886	697	525	267	164	114	83

D = Carril Derecho; I = Carril Izquierdo



## Anexo A1. Información de Deflexiones Obtenidas con Ambos Deflectómetros

APARATO: KUAB (Continuación)									
POSICION DE SENSORES (cm)			0	20	30	45	90	120	150
ESTACION	CARGA kgf	DEFLEXIONES (milésimas de mm)							
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	
I	-50100	6274	1143	795	550	328	78	40	22
I	-49900	6662	1078	846	639	324	199	138	102
I	-49700	6110	1021	784	607	290	176	119	76
I	-49500	6525	2306	1501	992	370	188	102	53
I	-49300	6668	1265	1022	768	377	243	161	114
I	-49100	6904	1209	907	660	335	214	142	98
I	-48900	7175	1432	1140	848	438	245	146	104
I	-48700	6149	934	714	541	296	197	138	94
I	-48500	6370	1121	891	712	381	239	152	103
I	-48300	7050	1128	871	633	313	169	132	31
I	-48100	6655	1139	847	636	318	164	112	53
I	-47900	6693	817	589	412	198	113	80	49
I	-47700	6441	945	750	555	296	161	108	80
I	-47500	6149	706	521	332	142	92	57	39
I	-47300	5948	570	298	174	74	45	40	25
I	-47100	6240	569	347	198	54	47	40	25
I	-46900	7952	1390	905	592	255	137	96	76
I	-46700	7647	1459	920	551	208	122	85	66
I	-46500	7819	921	737	484	258	129	117	68
I	-46300	7820	1071	802	587	278	124	98	69
I	-46100	7826	897	681	527	217	121	93	68
I	-45900	8390	1054	822	582	302	204	138	102
I	-45700	8179	952	733	528	198	117	70	52
I	-45500	7236	914	741	560	284	176	147	71
I	-45300	6430	844	639	521	230	127	94	56
I	-45100	6543	883	680	624	261	131	96	57
I	-44900	6924	1115	850	614	278	139	103	61
I	-44700	6031	646	516	374	179	100	92	74
I	-44500	6084	895	659	471	236	165	118	90
I	-44300	5892	896	645	474	214	124	90	71
I	-44100	5542	671	515	364	182	92	54	50
I	-43900	5968	785	628	470	261	157	115	78
I	-43700	5658	674	517	382	188	112	88	49
I	-43500	5680	1008	757	518	229	136	110	59
I	-43300	5779	915	618	407	183	115	89	55
I	-43100	5384	969	698	495	194	91	52	41
I	-42900	5973	623	441	372	187	91	53	44
I	-42700	6520	907	662	499	236	116	88	56
I	-42500	5939	1704	947	483	190	81	92	57
I	-42300	6066	1129	773	500	242	131	102	63
I	-42100	6437	1239	885	606	254	159	107	66
I	-41900	5831	1062	747	476	215	121	89	56
I	-41700	6572	1214	907	667	261	118	64	46
I	-41500	6062	604	385	217	58	46	24	24
I	-41300	6192	1109	835	581	271	153	99	60
I	-41100	5483	1098	830	599	244	137	99	79
I	-40900	5727	1283	941	593	236	131	98	75
I	-40700	5862	1077	727	458	220	143	101	72
I	-40500	6113	953	737	499	224	129	96	71
I	-40300	6442	1114	857	605	249	152	102	75
I	-40100	6178	964	747	523	229	168	117	76
Promedios		6274	975	713	503	232	132	93	62

D = Carril Derecho; I = Carril Izquierdo

### Anexo A1. Información de Deflexiones Obtenidas con Ambos Deflectómetros

DESVIACION DE LAS DEFLEXIONES DEL KUAB EN RELACION CON LAS DEL DYNATEST (%)											
POSICION DE SENSORES (cm)		0	20	30	45	90	120	150			
ESTACIÓN	CARGA (kgf)	DEFLEXIONES (milésimas de mm)									
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6			
D	40000	6091	-65	-65	-60	-32	-53	-55	-52		
D	40200	6403	9	10	3	-7	0	2	-2		
D	40400	6286	9	9	7	-2	-2	-3	9		
D	40600	6251	0	-1	-5	-10	-11	-5	6		
D	40800	6156	4	-1	-5	-5	-5	-10	-6		
D	41000	6315	10	8	3	-5	-2	4	12		
D	41200	6163	9	8	4	-2	-3	-4	10		
D	41400	6224	1	1	-2	-4	-13	-8	-3		
D	41600	7090	10	5	3	25	41	4	37		
D	41800	6059	4	3	3	6	0	10	10		
D	42000	6361	8	5	-3	-3	1	6	4		
D	42200	6568	8	1	2	-3	1	-1	-9		
D	42400	6511	8	7	5	19	3	6	-7		
D	42600	6457	25	14	2	5	-33	2	-16		
D	42800	5901	-8	-9	-10	0	-1	2	-15		
D	43000	5150	-16	-18	-16	-13	-11	-12	11		
D	43200	5833	5	1	-2	-6	-10	-17	-2		
D	43400	6715	13	10	9	8	9	18	2		
D	43600	6639	13	14	11	9	9	20	4		
D	43800	6655	4	3	4	3	4	22	8		
D	44000	6435	3	7	2	9	5	10	15		
D	44200	6408	8	8	3	17	1	-15	21		
D	44400	6491	11	9	8	8	2	14	23		
D	44600	6583	9	6	3	8	10	6	9		
D	44800	6760	12	16	13	10	2	29	39		
D	45000	6178	7	5	2	-4	-13	8	12		
D	45200	6246	6	3	26	14	-7	10	20		
D	45400	6648	8	10	27	26	15	20	11		
D	45600	6381	-14	8	-5	-2	-5	17	-6		
D	45800	7081	13	17	27	14	22	23	53		
D	46000	6708	10	9	7	10	13	-2	0		
D	46200	6558	1	3	5	-8	-7	6	7		
D	46400	6377	5	4	1	3	-18	0	17		
D	46600	6274	-13	-9	-20	-10	-21	6	-14		
D	46800	6839	15	12	8	9	7	-3	35		
D	47000	6525	12	8	8	-4	-18	-9	10		
D	47200	5294	-5	-7	-12	-9	-6	20	2		
D	47400	5104	-8	-10	-9	2	1	21	-1		
D	47600	5010	-21	-19	-25	-30	-9	-15	-10		
D	47800	5276	-11	-10	-14	-11	-18	-18	1		
D	48000	5277	-5	-9	-15	-9	-9	-7	-10		
D	48200	5797	0	-3	-2	0	-15	-11	-28		
D	48400	5142	-17	-16	-18	-13	-15	20	-47		
D	48600	5425	-11	-13	-12	-15	-18	-23	-22		
D	48800	5743	-5	-5	-7	-3	-2	-6	-5		
D	49000	5366	-8	-9	-11	-12	-16	-16	-3		
D	49200	5530	-3	-3	-7	-10	-3	-8	-2		
D	49400	5162	-15	-14	-16	-19	-15	-17	-18		
D	49600	4891	-21	-22	-22	-18	-12	-13	-27		
D	49800	4994	-20	-21	-21	-25	-19	-15	-22		
D	50000	5468	-11	-11	-14	-13	-11	-6	-6		

D = Carril Derecho; I = Carril Izquierdo

## Anexo A1. Información de Deflexiones Obtenidas con Ambos Deflectómetros

DESVIACION DE LAS DEFLEXIONES DEL KUAB EN RELACION CON LAS DEL DYNATEST (%) (Continuación)													
POSICION DE SENSORES (cm)		0	20	30	45	90	120	150					
ESTACIÓN	CARGA ( <sup>4</sup> kgf)	DEFLEXIONES (milésimas de mm)											
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6					
I	50100	6274	36	25	15	46	-39	-54	-65				
I	49900	6662	13	10	7	8	21	26	20				
I	49700	6110	4	3	-4	-11	-2	6	-10				
I	49500	6525	191	125	76	16	6	-16	-47				
I	49300	6668	10	14	10	-1	5	8	1				
I	49100	6904	35	28	18	20	31	21	9				
I	48900	7175	45	49	41	27	14	-1	-9				
I	48700	6149	-17	-21	-28	-29	-19	-19	-22				
I	48500	6370	41	33	27	22	42	49	38				
I	48300	7050	39	40	32	38	28	45	-53				
I	48100	6655	20	12	5	5	-1	-4	-41				
I	47900	6693	54	31	12	1	8	20	-4				
I	47700	6441	10	10	4	15	-1	-6	-8				
I	47500	6149	28	15	-9	-12	32	21	-1				
I	47300	5948	18	-26	-47	-52	-43	-25	-40				
I	47100	6240	35	7	-20	-49	-10	23	-13				
I	46900	7952	149	113	79	73	79	75	71				
I	46700	7647	69	34	1	-24	-12	16	67				
I	46500	7819	30	30	6	20	10	45	-13				
I	46300	7820	27	23	14	17	5	17	-5				
I	46100	7826	2	-4	-8	-18	-21	-22	-29				
I	45900	8390	95	92	69	83	127	106	75				
I	45700	8179	26	26	18	-13	-17	-31	-36				
I	45500	7236	5	12	10	30	-43	64	8				
I	45300	6430	-14	-14	-8	-9	3	44	44				
I	45100	6543	21	29	58	48	35	29	-7				
I	44900	6924	91	89	79	89	64	43	2				
I	44700	6031	0	4	2	9	7	36	26				
I	44500	6084	94	73	52	52	94	127	57				
I	44300	5892	32	25	19	18	29	32	25				
I	44100	5542	-4	6	0	18	6	-20	-5				
I	43900	5968	25	40	38	65	66	63	46				
I	43700	5658	-12	-11	-11	4	10	19	-19				
I	43500	5680	58	56	35	25	37	48	-2				
I	43300	5779	62	33	8	-10	-5	25	10				
I	43100	5384	45	32	22	11	23	33	20				
I	42900	5973	-15	-24	-19	-5	-3	-14	-19				
I	42700	6520	69	60	55	59	47	58	33				
I	42500	5939	118	54	-1	-19	-37	3	-7				
I	42300	6066	30	11	-10	-8	1	11	-10				
I	42100	6437	212	182	142	123	155	143	72				
I	41900	5831	38	22	-1	-4	-1	9	-15				
I	41700	6572	127	136	141	186	196	105	91				
I	41500	6062	-25	-38	-56	-73	-50	-55	-37				
I	41300	6192	62	55	35	26	21	12	-13				
I	41100	5483	5	-1	-11	-23	-19	-14	-7				
I	40900	5727	34	24	-4	-25	-22	-8	4				
I	40700	5862	33	15	-9	-3	22	34	18				
I	40500	6113	27	20	4	13	23	33	10				
I	40300	6442	89	87	70	48	51	35	27				
I	40100	6178	28	25	10	-7	10	7	-8				

D = Carril Derecho; I = Carril Izquierdo

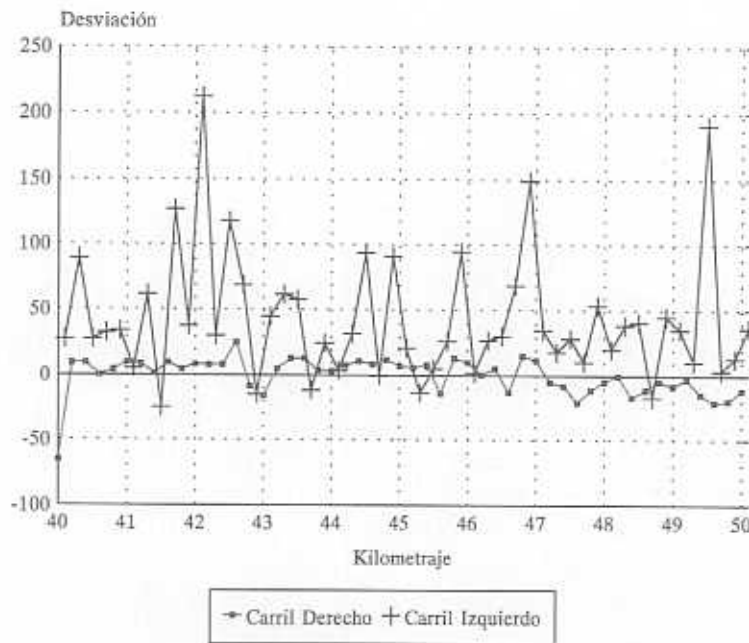


Figura A.1. Desviaciones de las Deflexiones del KUAB con Respecto al DYNATEST. (Sensor 0 a 0 cm de Posición)

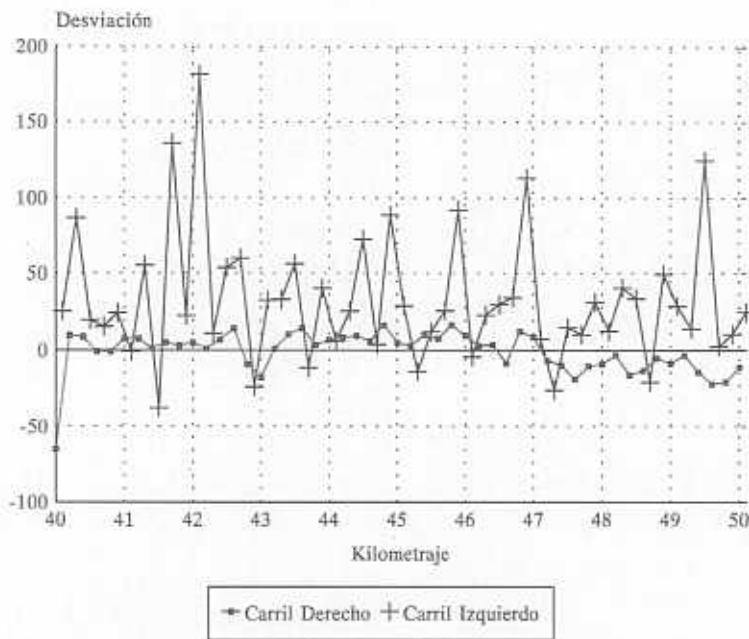


Figura A.2. Desviaciones de las Deflexiones del KUAB con Respecto al DYNATEST. (Sensor 1 a 20 cm de Posición)

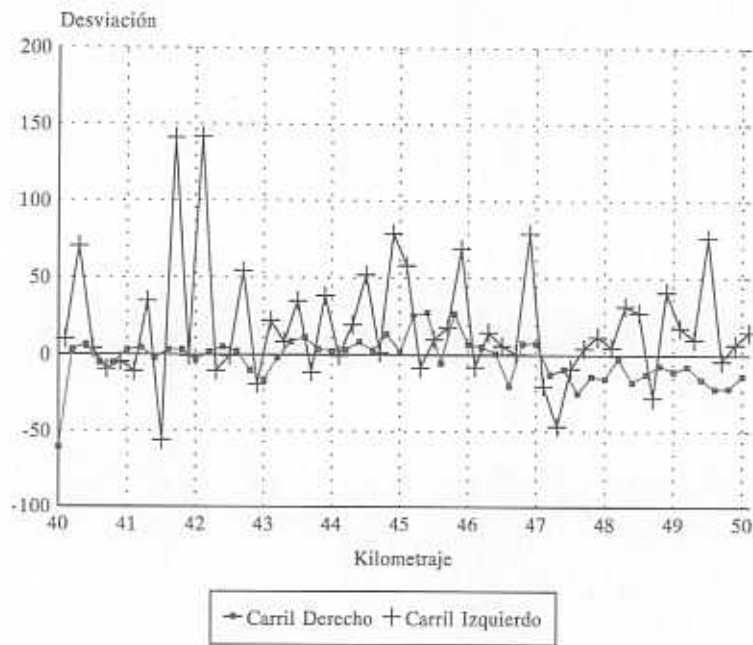


Figura A.3. Desviaciones de las Deflexiones del KUAB con Respecto al DYNATEST. (Sensor 2 a 30 cm de Posición)

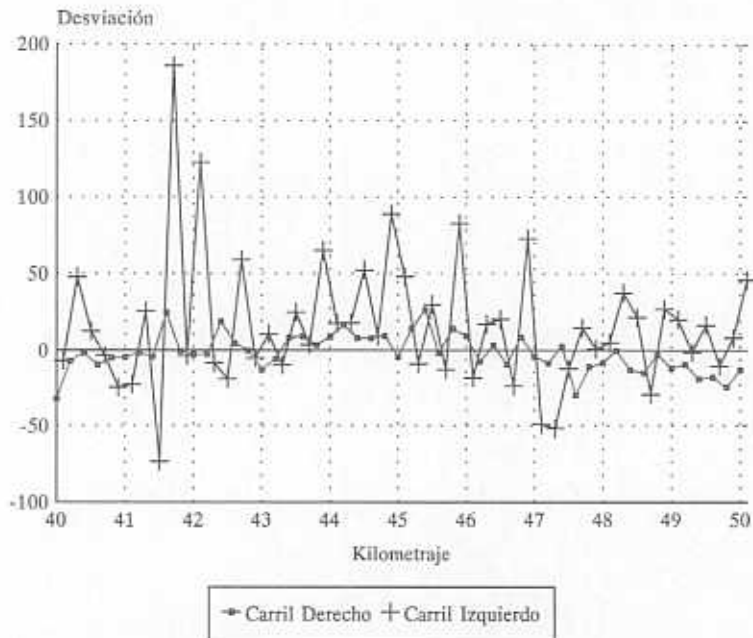


Figura A.4. Desviaciones de las Deflexiones del KUAB con Respecto al DYNATEST. (Sensor 3 a 60 cm de Posición)

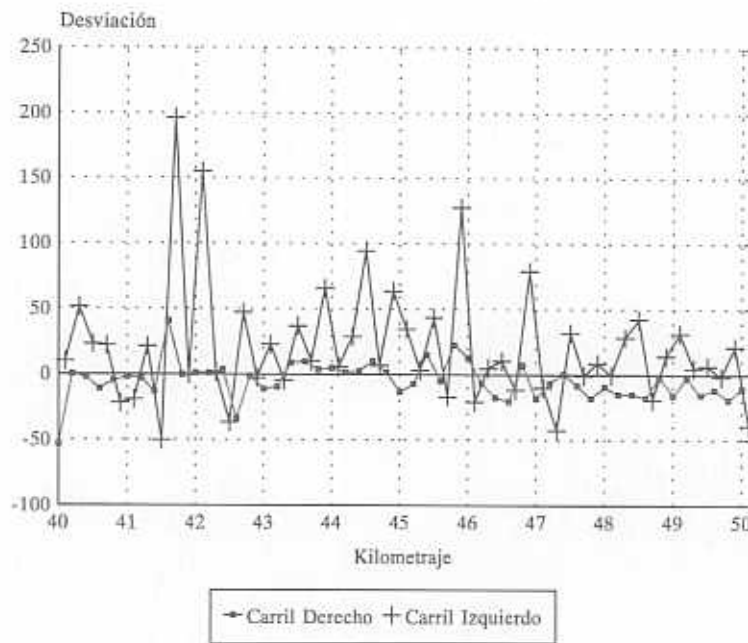


Figura A.5. Desviaciones de las Deflexiones del KUAB con Respecto al DYNATEST. (Sensor 4 a 90 cm de Posición)

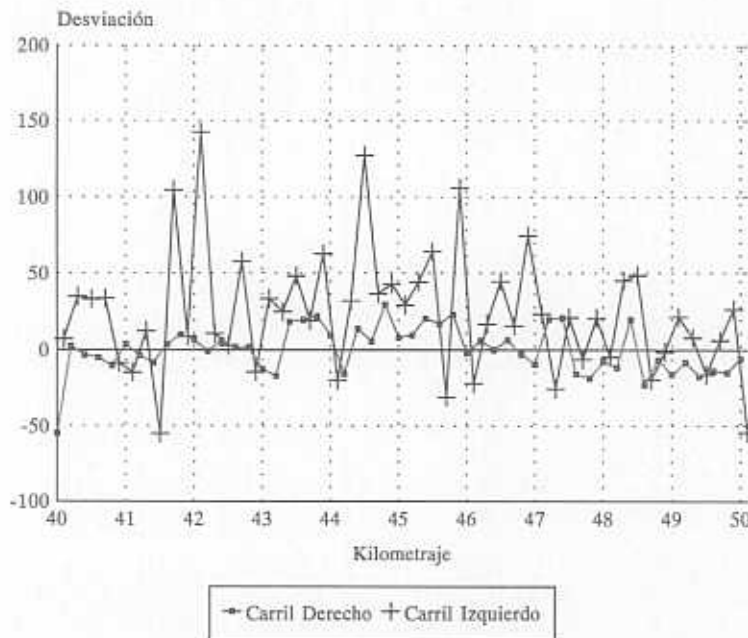


Figura A.6. Desviaciones de las Deflexiones del KUAB con Respecto al DYNATEST. (Sensor 5 a 120 cm de Posición)

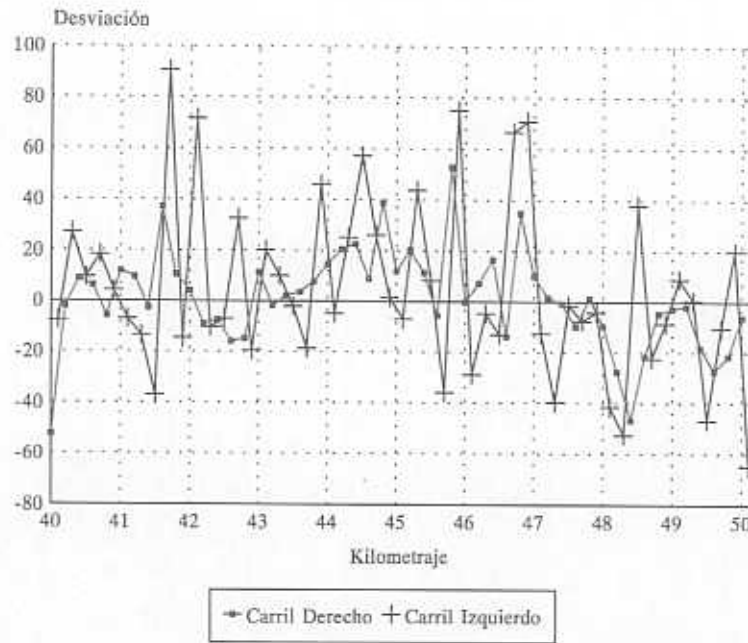


Figura A.7. Desviaciones de las Deflexiones del KUAB con Respecto al DYNATEST. (Sensor 6 a 150 cm de Posición)

---

## **Anexo B**





**Anexo B. Relaciones entre el Módulo de Resiliencia y el CBR para Distintas Capas y para Ambos Equipos.**

APARATO DE MEDICION	POZO	CAPA	ESPESOR (mm)	MODULO (kgf/cm <sup>2</sup> )	CBR (%)	CBR/MOD (x 100)
DYNATEST	14-D	BASE	150	2691	167.4	6.22
		SUBBASE	220	1351	169.15	12.52
		SUBRASANTE TERRACERIA	200	1169	66.15	5.66
DYNATEST	15-I	BASE	105	4721	54.05	1.14
		SUBBASE	150	2555	194	7.59
		SUBRASANTE	130	2354	61.45	2.61
		TERRACERIA	300		55.75	
DYNATEST	16-I	BASE	250	2667	98	3.68
		SUBBASE	100	1311	77.7	5.93
		SUBRASANTE	260	1602	89.45	5.58
		TERRACERIA	200		84.7	
DYNATEST	5-I	BASE	50	1188	151.15	12.72
		SUBBASE	100	590	92.5	15.67
		SUBRASANTE	70	545	81.6	14.98
		TERRACERIA	200		60.05	
DYNATEST	13-D	BASE	160	1004	18.75	1.87
		SUBBASE				
		SUBRASANTE TERRACERIA	150 270	593 854	49.4 18.75	8.34 2.20
DYNATEST	12-I	BASE	70	837	193.75	23.15
		SUBBASE				
		SUBRASANTE	150	502	28.2	5.62
		TERRACERIA	340	767	31.25	4.08
DYNATEST	27-I	BASE	130	9562	75.5	0.79
		SUBBASE				
		SUBRASANTE	220	5503	24.5	0.45
		TERRACERIA	230	1106	41.5	3.75
KUAB	22-I	BASE	205	2150	40	1.86
		SUBBASE	100		40	
		SUBRASANTE	230	399	67.5	16.91
		TERRACERIA	200		4	

**Anexo B. Relaciones entre el Módulo de Resiliencia y el CBR para Distintas Capas y para Ambos Equipos (Continuación).**

APARATO DE MEDICION	POZO	CAPA	ESPESOR (mm)	MODULO (kgf/cm <sup>2</sup> )	CBR (%)	CBR/MOD (x 100)
KUAB	23-D	BASE	120	1861	83.5	4.49
		SUBBASE	180		67	
		SUBRASANTE	110	623		
		TERRACERIA	240		40.5	
KUAB	24-I	BASE	220	1783	59	3.31
		SUBBASE	110		40	
		SUBRASANTE	150	242	16	
		TERRACERIA	200		5	
KUAB	25-D	BASE	15	1071	69	6.44
		SUBBASE	9	506	40	
		SUBRASANTE		548		
		TERRACERIA	110		40.5	
DYNATEST	6-I	BASE	140	1433	120.05	8.38
		SUBBASE				
		SUBRASANTE	130	827	40.45	
		TERRACERIA	150	646	63.7	
DYNATEST	9-D	BASE	90	1241	163.5	13.18
		SUBBASE				
		SUBRASANTE				
		TERRACERIA	350	710	68	
DYNATEST	10-I	BASE	70	1359	68.6	5.05
		SUBBASE				
		SUBRASANTE				
		TERRACERIA	220	811	47.2	
DYNATEST	11-D	BASE	85	1999	42.45	2.12
		SUBBASE	90	1182	80.6	
		SUBRASANTE	220			
		TERRACERIA	310	573	76.55	
DYNATEST	2-D	BASE	165	1824	44.1	2.42
		SUBBASE	120	1091	31.85	
		SUBRASANTE	290	766	26.05	
		TERRACERIA	250		25.35	

**Anexo B. Relaciones entre el Módulo de Resiliencia y el CBR para Distintas Capas y para Ambos Equipos (Continuación).**

APARATO DE MEDICION	POZO	CAPA	ESPESOR (mm)	MODULO (kgf/cm <sup>2</sup> )	CBR (%)	CBR/MOD (x 100)
DYNATEST	17-D	BASE	160	1346	142.8	10.61
		SUBBASE				
		SUBRASANTE				
		TERRACERIA	240	740	18.5	2.50
KUAB	19-D	BASE	85	2438	121.35	4.98
		SUBBASE	200	925	94.6	10.23
		SUBRASANTE	150	472	70.85	15.00
		TERRACERIA	200		27.1	
KUAB	21-I	BASE	110	1836	166.5	9.07
		SUBBASE				
		SUBRASANTE	90	353	65	18.43
		TERRACERIA	200		19.5	
KUAB	20-D	BASE	100	2086	122.95	5.89
		SUBBASE				
		SUBRASANTE	130	479	30.6	6.39
		TERRACERIA	200		16.8	
KUAB	18-D	BASE	85	1548	47.05	3.04
		SUBBASE				
		SUBRASANTE	300	402	31.25	7.77
		TERRACERIA	200		49.65	
KUAB	8-I	BASE	110	1276	162.05	12.70
		SUBBASE				
		SUBRASANTE	160	637	75.4	11.83
		TERRACERIA	170		35.15	
KUAB	7-D	BASE	130	376	65.8	17.49
		SUBBASE				
		SUBRASANTE	270	148	78.4	52.94
		TERRACERIA	200		46.55	

**Anexo B. Relaciones entre el Módulo de Resiliencia y el CBR para Distintas Capas y para Ambos Equipos (Continuación).**

APARATO DE MEDICION	POZO	CAPA	ESPESOR (mm)	MODULO (kgf/cm <sup>2</sup> )	CBR (%)	CBR/MOD (x 100)
KUAB	4-D	BASE	120	1700	110.35	6.49
		SUBBASE				
		SUBRASANTE	120	320	54	16.90
KUAB	3-I	TERRACERIA	130		83.3	
		BASE	90	1363	172.9	12.69
		SUBBASE				
KUAB	1-D	SUBRASANTE	200	386	142.2	36.80
		TERRACERIA	200		85.15	
		BASE	60		26.6	
KUAB	1-D	SUBBASE				
		SUBRASANTE	190	157	10	6.39
		TERRACERIA	280		28.75	
DYNATEST	26-D	SIN MODULOS, CARRETERA PACHUCA-TUXPAN, RAMAL VEGA DE SUCHIL				

**Algunos Datos Estadísticos.**

CAPA	MEDIA	MAX	MIN
BASE	6.91	23.15	0.00
SUB-B	2.68	15.67	0.00
SUBR	9.30	52.94	0.00
TERRACERIA	2.18	13.37	0.00

---

## **Anexo C**



## Anexo C1. Hoja de Cálculo para el Diseño de los Espesores de la Alternativa 1 del Ejemplo 1.

i	0.7				
0.7	TDPA				10500
	A				75
	B				5
	C				20
	T_CREC_TR				0.5
	DD				50
	DL				100
	CONF_GL			90	
	No. ETAPAS			3	
	CONF_ETA			0.965	
	ZR				-1.8
	So				0.45
	IIRo	1.18		ISAO	4.60
	IIRu	6.091		ISAU	2.50
				dISA_T	2.0964568
	CBRs				14.8867
	MRs				15631
	AÑOS		0	5	
	TIPO	AF/DIA	DÑ_UNIT	DÑ_ACU	DÑ_ACU
	A	7875	0.0005	0	7258
	B	525	2.5000	0	2419386
	C2	735	5.4300	0	7356868
	C3	483	2.2900	0	2038865
	T3S2	525	4.7800	0	4625865
	T3S3	315	8.7800	0	5098130
	T3S2R4	42	1.9100	0	147873
	TOTAL			0	21694244
				0	10847122
	w18				10847122
	NEr	4.01			10785201
	s/c NUEVA		NEo	4.78 Wf	38837979
				Wt	66071983
				VR	0.4121869
			NEf	1.970	
			ESPEs/c_in		5.53
			ESPEs/c_cm		14.05
			COSTO/KM		722682



**Anexo C1. Hoja de Cálculo para el Diseño de los Espesores de la Alternativa 1 del Ejemplo 1.  
(Continuación)**

	CBR <sub>i</sub>	MR <sub>i</sub>	a <sub>i</sub>	m <sub>i</sub>	w18	SN <sub>i</sub>	ESPE <sub>i</sub>
		300000	0.3688485				19.901396
	80	40000	0.1689129	1	10895435	2.89	12.029866
3	40	20000	0.1373338	1	10861387	3.69	5.9184261
4	14.8867	15631.035			10785201	4.01	0
COSTO/KM						1204336	
	IIR <sub>u</sub>	7.262			ISA <sub>u</sub>	2.00	
					dISA_T	2.59634498	

ii.

AÑOS		5		10	
TIPO	AF/DIA	DÑ_UNIT	DÑ_ACU	DÑ_ACU	
A	7875	0.0005	7258	14700	
B	525	2.5000	2419386	4899864	
C2	735	5.4300	7356868	14899506	
C3	483	2.2900	2038865	4129213	
T3S2	525	4.7800	4625865	9368540	
T3S3	315	8.7800	5098130	10324993	
T3S2R4	42	1.9100	147873	299480	
TOTAL			21694244	43936296	
-	-	-	-	-	-
			10847122	21968148	
w18					11121026
-	-	-	-	-	-
NE <sub>r</sub>	4.03				11160303
-	-	-	-	-	-
s/c NUEVA		NE <sub>o</sub>	4.01 W <sub>f</sub>		10847122
			W <sub>t</sub>		14948025
			VR		0.2743441
		NE <sub>f</sub>	1.100		
		ESPE <sub>s/c_in</sub>			7.9433158
		ESPE <sub>s/c_cm</sub>			20.176022
		COSTO/KM			1038056

CAP <sub>Ai</sub>	CBR <sub>i</sub>	MR <sub>i</sub>	a <sub>i</sub>	m <sub>i</sub>	w18	SN <sub>i</sub>	ESPE <sub>i</sub>
1		300000	0.3688485				19.970259
2	80	40000	0.1689129	1	11140775	2.9	12.029866
3	40	20000	0.1373338	1	11060804	3.7	6.1033769
4	14.8867	15631.035			11160303	4.03	0
COSTO/KM						1209510	
	IIR <sub>u</sub>	7.262			ISA <sub>u</sub>	2.00	
					dISA_T	2.59634498	

Anexo C1. Hoja de Cálculo para el Diseño de los Espesores de la Alternativa 1 del Ejemplo 1.  
(Continuación)

iii		AÑOS		10	15
TIPO	AF/DIA	DÑ_UNIT	DÑ_ACU	DÑ_ACU	
A	7875	0.0005	14700	22329	
B	525	2.5000	4899864	7442977	
C2	735	5.4300	14899506	22632605	
C3	483	2.2900	4129213	6272346	
T3S2	525	4.7800	9368540	14230973	
T3S3	315	8.7800	10324993	15683842	
T3S2R4	42	1.9100	299480	454915	
TOTAL			43936296	66739987	
			21968148	33369993	
w18				11401845	
NEr	4.04			11352202	
s/c NUEVA		NEo	4.03 Wf	11121026	
			Wt	15508526	
			VR	0.2829089	
		NEf	1.140		
		ESPEs/c_in		7.8619730	
		ESPEs/c_cm		19.969411	
		COSTO/KM		1027426	

CA PAi	CBRi	MRi	ai	mi	w18	SNi	ESPEi
1		300000	0.3688485				20.039122
2	80	40000	0.1689129	1	11390883	2.91	12.180239
3	40	20000	0.1373338	1	11469400	3.72	5.9184261
4	14.8867	15631.035			11352202	4.04	0
			COSTO/KM			1213024	

**Anexo C1. Hoja de Cálculo para el Diseño de los Espesores de la Alternativa 1 del Ejemplo 1.**  
(Continuación)

AÑOS	w18	dISA_T	ISA	IIR	COV
	SN1	4.01		TD	5
	SN2	4.03			
	SN3	4.04			
0			4.60	1.1800	-
1	2147838	0.73	3.87	2.8861	4264518
2	4306416	1.15	3.45	3.8712	4409543
3	6475786	1.50	3.10	4.6958	4394260
4	8656004	1.82	2.78	5.4320	4340973
5	10847122	2.10	2.49	6.1095	4271116
5.01			4.60		
6	2202074	0.73	3.87	2.8902	3835184
7	4415158	1.15	3.45	3.8679	3455070
8	6639308	1.50	3.10	4.6840	3441778
9	8874579	1.81	2.79	5.4114	3398723
10	11121026	2.09	2.50	6.0798	3342645
10.01			4.60		
11	2257679	0.74	3.86	2.9061	3187097
12	4526647	1.16	3.44	3.8881	2709722
13	6806959	1.51	3.09	4.7067	2699490
14	9098673	1.82	2.78	5.4355	2665868
15	11401845	2.10	2.49	6.1049	2622032
				S_COV	53038018
				COSTO_O	2648430
				COSTO_T	55686449
				IRI_PROM	4.5979309
				ISA_PROM	3.1371893

## Anexo C2. Hoja de Cálculo para el Diseño de los Espesores de la Alternativa 2 del Ejemplo 1.

i	0.7				
	0.7	TDPA			10500
		A			75
		B			5
		C			20
		T_CREC_TR			0.5
		DD			50
		DL			100
		CONF_GL		90	
		No. ETAPAS		2	
		CONF_ETA		0.949	
		ZR			-1.645
		So			0.45
		IIRo	1.18	ISAO	4.60
		IIRu	6.091	ISAU	2.50
				dISA_T	2.09645679
		CBRs			14.8867
		MRs			15631
		AÑOS		0	10
		TIPO	AF/DIA	DN_UNIT	DN_ACU
		A	7875	0.0005	0
		B	525	2.5000	0
		C2	735	5.4300	0
		C3	483	2.2900	0
		T3S2	525	4.7800	0
		T3S3	315	8.7800	0
		T3S2R4	42	1.9100	0
		TOTAL			0
					43936296
					0
		w18			21968148
		NEr	4.34		21938324
		s/c NUEVA	NEo	4.78 Wf	38837979
				Wt	66071983
				VR	0.41218687
			NEf	1.970	
			ESPEs/c_in		6.42
			ESPEs/c_cm		16.32
			COSTO/KM		839601

**Anexo C2. Hoja de Cálculo para el Diseño de los Espesores de la Alternativa 2 del Ejemplo 1.**  
**(Continuación)**

CAP <i>i</i>	CBR <i>i</i>	MR <i>i</i>	ai	mi	w18	SN <i>i</i>	ESPE <i>i</i>
1		300000	0.3688485				21.6229698
2	80	40000	0.1689129	1	21905018	3.14	12.9321059
3	40	20000	0.1373338	1	22053246	4	6.28832773
4	14.8 867	15631.035			21938324	4.34	0
COSTO/KM						1305789	
IRu		7.262		ISAu		2.00	
				dISA_T		2.59634498	
ii	AÑOS				10	15	
	TIPO	AF/DIA	DÑ_UNIT	DÑ_ACU	DÑ_ACU		
	A	7875	0.0005	14700	22329		
	B	525	2.5000	4899864	7442977		
	C2	735	5.4300	14899506	22632605		
	C3	483	2.2900	4129213	6272346		
	T3S2	525	4.7800	9368540	14230973		
	T3S3	315	8.7800	10324993	15683842		
	T3S2R4	42	1.9100	299480	454915		
	TOTAL			43936296	66739987		
	w18			21968148	33369993		11401845
	NEr	3.95					11421241
	s/c NUEVA		NEo	4.34 Wf			21968148
				Wt			31654763
				VR			0.30600815
			NEf	1.328			
			ESPEs/c_in				7.1084053
			ESPEs/c_cm				18.0553495
			COSTO/KM				928948
CAP <i>i</i>	CBR <i>i</i>	MR <i>i</i>	ai	mi	w18	SN <i>i</i>	ESPE <i>i</i>
1		300000	0.3688485				19.5570809
2	80	40000	0.1689129	1	11434070	2.84	11.8794926
3	40	20000	0.1373338	1	11425575	3.63	5.9184261
4	14.8 867	15631.035			11421241	3.95	0
COSTO/KM						1185018	
IRu		7.262		ISAu		2.00	
				dISA_T		2.59634498	

Anexo C2. Hoja de Cálculo para el Diseño de los Espesores de la Alternativa 2 del Ejemplo 1.  
(Continuación)

AÑOS	w18	dISA_T	ISA	IIR	COV
0			4.60	1.1800	-
1	2147838	0.54	4.06	2.4463	4193392
2	4306416	0.81	3.79	3.0800	4260494
3	6475786	1.03	3.57	3.5904	4189894
4	8656004	1.22	3.38	4.0349	4089795
5	10847122	1.39	3.21	4.4365	3976604
6	13049196	1.55	3.05	4.8072	3857281
7	15262281	1.70	2.90	5.1543	3735508
8	17486430	1.84	2.76	5.4825	3613468
9	19721701	1.97	2.63	5.7952	3492541
10	21968148	2.10	2.50	6.0949	3373640
10.01			4.60		
11	2257679	0.71	3.89	2.8331	3182723
12	4526647	1.13	3.47	3.8176	2699422
13	6806959	1.48	3.12	4.6490	2691208
14	9098673	1.80	2.80	5.3955	2659863
15	11401845	2.09	2.50	6.0854	2618434

S_COV	52634267
COSTO_O	1876082
COSTO_T	54510349
IRI_PROM	4.51352332
ISA_PROM	3.17322203

**Anexo C3. Hoja de Cálculo para el Diseño de los Espesores de la Alternativa 3 del Ejemplo 1.**

i	0.7							
	0.7	TDPA						10500
		A						75
		B						5
		C						20
		T_CREC_TR						0.5
		DD						50
		DL						100
		CONF_GL				90		
		No.				1		
		ETAPAS						
		CONF_ETA				0.900		
		ZR						-1.282
		So						0.45
		IIRo	1.18			ISAo		4.60
		IIRu	6.091			ISAu		2.50
						dISA_T		2.0964568
		CBRs						14.8867
		MRs						15631
		AÑOS			0		15	
		TIPO	AF/DIA	DÑ_UNIT	DÑ_ACU		DÑ_ACU	
		A	7875	0.0005	0		22329	
		B	525	2.5000	0		7442977	
		C2	735	5.4300	0		22632605	
		C3	483	2.2900	0		6272346	
		T3S2	525	4.7800	0		14230973	
		T3S3	315	8.7800	0		15683842	
		T3S2R4	42	1.9100	0		454915	
		TOTAL			0		66739987	
					0		33369993	
		w18						33369993
		NEr	4.37					33544006
		s/c NUEVA		NEo	4.78	WF		38837979
						Wt		66071983
						VR		0.4121869
				NEf	1.970			
				ESPEs/c_in				6.51
				ESPEs/c_cm				16.53
				COSTO/KM				850230
CAPA	CBR <sub>i</sub>	MRI	ai	mi	w18	SNI	ESPE <sub>i</sub>	
i								
1		300000	0.3688485				21.829559	
2	80	40000	0.1689129	1	33949862	3.17	12.932106	
3	40	20000	0.1373338	1	33815361	4.03	6.2883277	
4	14.8867	15631.035			33544006	4.37	0	
			COSTO/KM				1316418	
	IIRu	7.262			ISAu	2.00		
					dISA_T	2.59634498		

**Anexo C3. Hoja de Cálculo para el Diseño de los Espesores de la Alternativa 3 del Ejemplo 1.**  
**(Continuación)**

SN1						4.37						TD						5					
AÑOS	w18	GIS_A_T	ISA	IIR	COV																		
0			4.60	1.1800	-																		
1	2147838	0.43	4.17	2.1829	4148165																		
2	4306416	0.64	3.96	2.6792	4173920																		
3	6475786	0.81	3.79	3.0779	4085163																		
4	8656004	0.96	3.64	3.4245	3972445																		
5	10847122	1.09	3.50	3.7372	3849531																		
6	13049196	1.21	3.38	4.0256	3722288																		
7	15262281	1.33	3.27	4.2952	3593816																		
8	17486430	1.44	3.16	4.5501	3465942																		
9	19721701	1.54	3.05	4.7928	3339810																		
10	21968148	1.64	2.95	5.0252	3216162																		
11	24225827	1.74	2.86	5.2489	3217780																		
12	26494794	1.83	2.77	5.4650	2978092																		
13	28775107	1.92	2.68	5.6744	2864190																		
14	31066821	2.01	2.59	5.8780	2753897																		
15	33369993	2.09	2.51	6.0763	2647275																		

S\_COV 52028476  
 COSTO\_O 1316418  
 COSTO\_T 53344894  
 IRI\_PROM 4.408883  
 ISA\_PROM 3.217892



**Anexo C4. Hoja de Cálculo para el Diseño de los Espesores de la Alternativa 1 del Ejemplo 2.**

i	0.7				
0.7	TDPA				3920
	A				80
	B				5
	C				15
	T_CREC_T				3.1
	R				
	DD				50
	DL				100
	CONF_GL		90		
	No.		2		
	ETAPAS				
	CONF_ET		0.949		
A	ZR				-1.645
	So				0.45
	IIRo	4.357		ISAO	4.60
	IIRu	6.091		ISAU	2.50
				dISA_T	2.100187
	CBRs				9.2
	MRs				9660
	AÑOS		0	7	
	TIPO	AF/DIA	DÑ_UNIT	DÑ_ACU	DÑ_ACU
	A	3136	0.0005	0	4399
	B	196	2.5000	0	1374587
	C2	205.8	5.4300	0	3134883
	C3	135.24	2.2900	0	868794
	T3S2	147	4.7800	0	1971158
	T3S3	88.2	8.7800	0	2172397
	T3S2R4	11.76	1.9100	0	63011
	TOTAL			0	9589229
				0	4794614
	w18			2500000	7294614
	NEr	4.35			7322478
	IIRu	7.262		ISAU	2.00
				dISA_T	2.6000752

**Anexo C4. Hoja de Cálculo para el Diseño de los Espesores de la Alternativa 1 del Ejemplo 2.**  
(Continuación)

ii

AÑOS				
7				
15				
TIPO	AF/DIA	DÑ_UNIT	DÑ_ACU	DÑ_ACU
A	3136	0.0005	4399	10723
B	196	2.5000	1374587	3350905
C2	205.8	5.4300	3134883	7642075
C3	135.24	2.2900	868794	2117906
T3S2	147	4.7800	1971158	4805198
T3S3	88.2	8.7800	2172397	5295771
T3S2R4	11.76	1.9100	63011	153606
TOTAL			9589229	23376184
			4794614	11688092
w18				6893478
NEr	4.32			6973520
s/c NUEVA		NEo	4.35 Wf	7294614
			Wt	10571173
			VR	0.3099522
		NEf	1.348	
		ESPEs/c_in		8.0567165
		ESPEs/c_cm		20.46406
		COSTO/KM		1052876

C	CBRi	MRi	ai	mi	w18	SNi	ESPi_cm
A							
P							
A							
i							
1		300000	0.3688485				18.110959
2	80	40000	0.1689129	1	7001532	2.63	11.127626
3	40	20000	0.1373338	1	6986233	3.37	17.570327
4	9.2	9660			6973520	4.32	0
			COSTO/KM			1205372	

**Anexo C4. Hoja de Cálculo para el Diseño de los Espesores de la Alternativa 1 del Ejemplo 2.**  
**(Continuación)**

		SN1	4.35		TD	5
		SN2	4.32			
AÑOS	w18	dISA_T	ISA	IIR	COV	
0		1.12	3.48	3.8049	-	
1	623836	1.28	3.32	4.1691	1634149	
2	1267011	1.43	3.17	4.5139	1582888	
3	1930124	1.57	3.03	4.8444	1531471	
4	2613794	1.70	2.90	5.1641	1480564	
5	3318657	1.84	2.76	5.4754	1430593	
6	4045372	1.97	2.63	5.7803	1381844	
7	4794614	2.10	2.50	6.0801	1334510	
7.01			4.60			
8	772469	0.58	4.02	2.5237	1178970	
9	1568885	0.88	3.72	3.2210	1043936	
10	2389989	1.12	3.48	3.7953	1028662	
11	3236548	1.34	3.26	4.3064	1006325	
12	4109350	1.54	3.06	4.7780	980938	
13	5009208	1.73	2.87	5.2224	954208	
14	5936963	1.91	2.69	5.6472	927045	
15	6893478	2.09	2.51	6.0573	900001	
				S_COV	18396104	
				COSTO_O	646374	
				COSTO_T	19042479	
				IRI_PROM	4.7719106	
				ISA_PROM	3.0629191	

## Anexo C5. Hoja de Cálculo para el Diseño de los Espesores de la Alternativa 2 del Ejemplo 2.

i	0.7				
	0.7	TDPA			3920
		A			80
		B			5
		C			15
		T_CREC_T			3.1
		R			
		DD			50
		DL			100
		CONF_GL		90	
		No.		1	
		ETAPAS			
		CONF_ET		0.900	
		A			
		ZR			-1.645
		So			0.45
		IIRo	1.17	ISAO	4.60
		IIRu	6.091	ISAU	2.50
				dISA_T	2.1007257
		CBRs			9.2
		MRs			9660
		AÑOS		0	15
		TIPO	AF/DIA	DÑ_UNIT	DÑ_ACU
		A	3136	0.0005	0
		B	196	2.5000	0
		C2	205.8	5.4300	0
		C3	135.24	2.2900	0
		T3S2	147	4.7800	0
		T3S3	88.2	8.7800	0
		T3S2R4	11.76	1.9100	0
		TOTAL			0
					23376184
					0
		w18			11688092
		NEr	4.65		11776109
		s/c NUEVA	NEo	4.35 Wf	7294614
				Wt	10571173
				VR	0.3099523
			NEf	3.430	
			ESPEs/c_in		3.31
			ESPEs/c_cm		8.40
			COSTO/KM		432246

Evaluación Estructural No Destructiva de Pavimentos

CAPA i	CBR <sub>i</sub>	MR <sub>i</sub>	a <sub>i</sub>	m <sub>i</sub>	w <sub>18</sub>	SN <sub>i</sub>	ESPE <sub>i</sub>
1		300000	0.3688485				19.625944
2	80	40000	0.1689129	1	11712495	2.85	12.029866
3	40	20000	0.1373338	1	11885108	3.65	18.495082
4	9.2	9660			11776109	4.65	0
COSTO/KM							1301090
IIR <sub>u</sub>		7.262				IS <sub>Au</sub>	2.00
						dIS <sub>A_T</sub>	2.60061388

Anexo C5. Hoja de Cálculo para el Diseño de los Espesores de la Alternativa 2 del Ejemplo 2.  
(Continuación)

						SN <sub>1</sub>	4.65	TD	5
AÑOS	w <sub>18</sub>	dIS <sub>A_T</sub>	IS <sub>A</sub>	IIR	COV				
0			4.60	1.1713	-				
1	623836	0.43	4.17	2.1880	1424215				
2	1267011	0.63	3.97	2.6585	1430156				
3	1930124	0.80	3.80	3.0355	1396962				
4	2613794	0.94	3.66	3.3649	1356557				
5	3318657	1.06	3.54	3.6649	1313313				
6	4045372	1.18	3.42	3.9445	1269054				
7	4794614	1.30	3.30	4.2093	1224725				
8	5567083	1.41	3.19	4.4629	1180876				
9	6363499	1.51	3.09	4.7078	1137843				
10	7184603	1.61	2.99	4.9459	1095842				
11	8031162	1.71	2.89	5.1784	1099560				
12	8903964	1.81	2.79	5.4066	1015428				
13	9803823	1.90	2.70	5.6312	977152				
14	10731577	2.00	2.60	5.8529	940210				
15	11688092	2.09	2.51	6.0725	904611				
					S_COV	17766503			
					COSTO_O	432246			
					COSTO_T	18198749			
					IRI_PROM	4.354911			
					IS <sub>A_PROM</sub>	3.2409321			

**CIUDAD DE MEXICO**

Av. Popocatepetl 506 B  
Col. Xoco  
03330 México, D.F.  
Tels. 688 76 29  
688 76 03  
Fax 688 76 08

**SAN FANDILA**

Km 4+000, Carretera  
Los Cues-Galindo  
76700 Sanfandila, Qro.  
Tels. (42) 16 97 77  
16 96 46  
16 95 97  
Fax (42) 16 96 71  
[http: //www.imt.mx](http://www.imt.mx)