



**Certificación ISO 9001:2000 ‡  
Laboratorios acreditados por EMA §**

---

---

# **USO Y CALIBRACIÓN DE DEFLECTÓMETROS DE IMPACTO EN LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS**

Alfonso Pérez Salazar  
Paul Garnica Anguas  
José Antonio Gómez López  
Guadalupe Evangelina Itandehui Martínez Peña

**Publicación Técnica No 252  
Sanfandila, Qro, 2004**

---

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

**Uso y calibración de deflectómetros  
de impacto en la evaluación  
estructural de pavimentos**

**Publicación Técnica No 252  
Sanfandila, Qro, 2004**

---

---

Esta investigación fue realizada en los Laboratorios de Infraestructura, de la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), por los investigadores: Ing Alfonso Pérez Salazar; Dr Paul Garnica Anguas; Ing José Antonio Gómez López, y la Ing Guadalupe Evangelina Itandehui Martínez Peña. Se agradecen los comentarios del M en C Rodolfo Téllez Gutiérrez, así como la colaboración de los técnicos Miguel Ángel Cervantes Nieto; Mario Antonio Pérez González, y Luis Alberto Pérez Cortés por el apoyo en el manejo del equipo.

# Índice

---

Índice	I
Resumen	III
Abstract	V
Resumen ejecutivo	VII
Introducción	1
<b>CAPÍTULO 1. Antecedentes</b>	<b>3</b>
1.1 Características de los deflectómetros de impacto	8
1.1.1 Sistema de instrumentación	8
1.1.2 Dispositivo generador de impacto	8
1.1.3 Placa de carga	8
1.1.4 Transductor de deflexión	8
1.1.5 Celda carga	9
<b>CAPÍTULO 2. Uso de los deflectómetros de impacto</b>	<b>11</b>
2.1 Especificaciones de la señal del sistema de registro	11
2.2 Procedimiento para la determinación de deflexiones en sitio	11
2.3 Localización y número de ensayos para diferentes niveles de proyecto	12
2.3.1 Localización del ensayo	12
2.3.2 Número de ensayos de acuerdo con el nivel de proyecto	13
2.3.2.1 Ensayos a nivel de red de carreteras	13
2.3.2.2 Ensayos a nivel de proyecto general	13
2.3.2.3 Ensayos a nivel de proyecto detallado	13
2.4 Factores que influyen en la determinación de las deflexiones	14

2.4.1	Carga	14
2.4.2	Temperatura	14
2.4.3	Condiciones del pavimento	15
<b>CAPÍTULO 3. Calibración de deflectómetros de impacto</b>		<b>17</b>
3.1	Antecedentes	17
3.2	Calibración	18
3.2.1	Dispositivo generador de fuerza	18
3.2.2	Calibración relativa de los transductores de deflexión	18
3.2.3	Calibración de los transductores por temperatura ambiente	22
3.2.4	Calibración de los transductores por temperatura en el pavimento	23
3.2.5	Calibración del indicador de distancia	23
<b>CAPÍTULO 4. Métodos para la estimación del módulo elástico a partir de mediciones con deflectómetro de impacto</b>		<b>25</b>
4.1	Antecedentes	25
4.2	Aproximación analítica	27
4.3	Estimación del módulo de capa para pavimentos existentes	29
4.3.1	Ensayo de deflexión	29
4.3.2	Definición de las secciones de pavimento	29
4.3.3	Capas delgadas de pavimento	33
4.3.4	Número de capas	34
4.3.5	Estimación de una capa aparente rígida	35
4.3.6	Tolerancias en el ajuste de deflexiones	35
Conclusiones		39
Bibliografía		41

# Resumen

---

Se presentan y discuten los principales aspectos de la evaluación estructural de los pavimentos de concreto asfáltico con ensayos no destructivos; particularmente, el método desarrollado a partir de los deflectómetros de impacto, FWD por sus siglas en inglés. Así mismo, se describen metodologías para estimar los módulos elásticos de las capas de pavimento evaluadas con esta técnica, y las ventajas y limitaciones de tales herramientas; además de los cuidados que se deben tener al utilizar los resultados de la evaluación en el diseño de refuerzo de los pavimentos. Finalmente, se hacen recomendaciones para estudios futuros.



# **Abstract**

---

This work presents and discusses the main characteristics of the pavement structural evaluation, particularly asphalt concrete pavements, carried out Falling Weight Deflectometer, FWD. It describes the elastic modulus estimation methodologies from this technical and discusses advantages and disadvantages in its use. Furthermore, it is presented points of care in the use of these results in a strengthened pavement design. Ideas for posterior studies are presented.





# Resumen ejecutivo

---

Se describen los principales equipos para medir deflexiones en pavimentos existentes, enfatizando en los deflectómetros de impacto por ser los de uso común en campo.

Así mismo, se presentan diferentes métodos para estimar un módulo elástico y las consideraciones que cada uno de ellos establece en sus metodologías; con especial atención en las destinadas a pavimentos asfálticos y, en algunos casos, para pavimentos rígidos; sin embargo, el marco de trabajo es la teoría elástica multicapa como método de análisis. Debe destacarse de varios de los programas de computo disponibles utilizan diversas consideraciones, por lo que pueden tener discrepancias considerables en sus resultados. Es posible utilizar otros procedimientos de análisis, tal como el elemento finito; no obstante, resulta necesario realizar adecuaciones para su uso.

Como complemento, se describen los parámetros de un método para estimar los módulos elásticos de capa a partir de mediciones de deflexión, que pueden utilizarse en la evaluación de pavimentos, o de diseño de sobrecarpetas. A fin de caracterizar los materiales en las capas de los pavimentos, el módulo resiliente obtenido en laboratorio constituye un insumo para algunos procedimientos de diseño de sobrecarpetas.

El análisis de deflexión proporciona una técnica capaz de utilizar el módulo elástico equivalente de una estructura de pavimento en lugar de obtener el módulo resiliente en laboratorio de muestras pequeñas, y en algunas ocasiones de muestras alteradas. Para muchos procedimientos de diseño de sobrecarpetas que se basan en la teoría elástica multicapa, el módulo resiliente se constituye por uno elástico de capa equivalente, debido a que el módulo equivalente se determina como un promedio del total de las superposiciones en las condiciones de esfuerzo en campo de un pavimento actual.

También se destacan algunos de los factores que afectan los resultados de los ensayos no destructivos para la determinación de deflexiones, los cuales deben analizarse con el propósito de eliminar o de minimizar sus efectos, o tomarlos en consideración en la interpretación de los resultados. Dichos factores son entre otros, la magnitud y duración de la carga; las propiedades no lineales de los materiales que conforman los pavimentos; la temperatura y la humedad; y las condiciones en que se encuentra el pavimento.

Por último, se describen algunas experiencias importantes que puedan llevarse a cabo para entender mejor las metodologías de evaluación de pavimentos en diferentes niveles de auscultación, y los estudios que establecen relaciones entre las temperaturas y las variaciones del contenido de agua en las capas de los pavimentos, en las diferentes épocas del año.



# Introducción

---

Existen diferentes métodos para evaluar la capacidad estructural de los pavimentos, lo anterior con la finalidad de definir su aptitud para resistir las cargas que circulan por diversos tramos carreteros.

La evaluación de la capacidad estructural en pavimentos se realiza utilizando predominantemente métodos no destructivos, los cuales consisten en aplicar una carga bajo condiciones dinámicas, estáticas, por impacto, etc, cuyos resultados ayudan a determinar en cada estructura del pavimento, las deformaciones o deflexiones asociadas a la sollicitación inducida, y así poder definir su capacidad para soportar las cargas vehiculares.

A nivel mundial se cuenta con una gran cantidad de equipos para determinar deflexiones en campo, sin embargo, los de mayor uso son los deflectómetros de impacto. Estos equipos aplican una sollicitación al pavimento por impacto y determinan una cuenca de deformaciones a partir de datos de desplazamiento, obtenidos por un arreglo de sensores de desplazamiento. Dicho arreglo se establece en función del tipo de pavimento que se intenta evaluar y del fin que se persiga con la evaluación.

Existen metodologías muy bien definidas para obtener las llamadas cuencas de deformación conforme cada necesidad de información; en el presente reporte se hará énfasis a los pavimentos de concreto asfáltico, a la vez que se incluyen recomendaciones para diferentes tipos de pavimento.

En la literatura se reportan también las características que deben cumplir los equipos que se emplean en los ensayos no destructivos, particularmente en las aproximaciones y dispersiones de los instrumentos de medición.

Es importante destacar que así como hay diversos equipos para medir deflexiones, es aun mayor el número de procedimientos para el análisis y procesamiento de los datos provenientes de tales equipos. Dichos programas calculan los módulos en cada una de las diferentes capas del pavimento evaluado mediante herramientas matemáticas diversas, y consideraciones en sus modelos igualmente variados.

Debido a lo anterior es difícil hacer una elección adecuada entre las diferentes metodologías de diseño; no obstante, en el presente trabajo se ha procurado incluir algunas consideraciones bajo las cuales se desarrolla algunos de estos métodos de análisis. Es necesario conocer lo anterior para poder realizar una interpretación adecuada de los resultados que de dichos modelos resulte, ya que es sabido que la elección de los módulos de capa, contiene en sí misma una gran cantidad de criterio ingenieril.

Por otro lado, es necesario tomar en cuenta los factores que en mayor medida influyen a los resultados obtenidos y la manera en que se deben considerar; un ejemplo lo constituye el clima, caracterizado como la temperatura y la humedad; en este caso, la magnitud de la carga, la posición o distancia de la capa rígida, etc. A continuación se harán algunos comentarios al respecto.

# 1 Antecedentes

---

La medición de las deflexiones se utiliza ampliamente para conocer la capacidad estructural de los pavimentos en campo, y dentro de la tecnología de pavimentos, particularmente en la evaluación estructural de los mismos existen diversas metodologías y equipos para tales propósitos.

La literatura especializada en pavimentos proporciona información acerca de la medición de deflexiones en pavimentos localizadas directamente en el punto de aplicación de la carga o alejadas de él, a partir de una carga estática conocida, de una vibratoria o de una por impulso. Las deflexiones se miden con transductores que determinan el movimiento vertical de la superficie de un pavimento ante un impacto. Actualmente, existen diversos procedimientos para la medición de deflexiones en pavimentos de concreto asfáltico, en concreto hidráulico, e incluso en una combinación de ellos. Los pavimentos rígidos pueden ser sin refuerzo, una con juntas, con refuerzo en las juntas, o concretos reforzados de manera continua.

Los ensayos realizados mediante esta metodología, son por su naturaleza denominados no destructivos NDT (Non Destructive Test).

Los ensayos no destructivos de deflexiones proporcionan información que se utiliza para la evaluación estructural de los pavimentos. Además, los resultados de dichas deflexiones pueden emplearse a su vez en las siguientes características de los pavimentos.

- a) Módulo de elasticidad de cada capa
- b) Rigidez combinada de los sistemas de pavimentos
- c) Eficiencia en la transferencia de carga en las juntas de pavimentos de concreto hidráulico
- d) Módulos de reacción de la subrasante
- e) Espesor efectivo, número estructural o valor de soporte del suelo
- f) Capacidad de carga o capacidad de soporte del pavimento

Dichos parámetros pueden utilizarse en el análisis y diseño de la rehabilitación y reconstrucción de pavimentos rígidos y flexibles; valoración de la capacidad estructural, incluyendo la eficiencia de las juntas en pavimentos de concreto hidráulico; detección de oquedades en pavimentos de concreto hidráulico; y/o para fines de inventario estructural de la red.

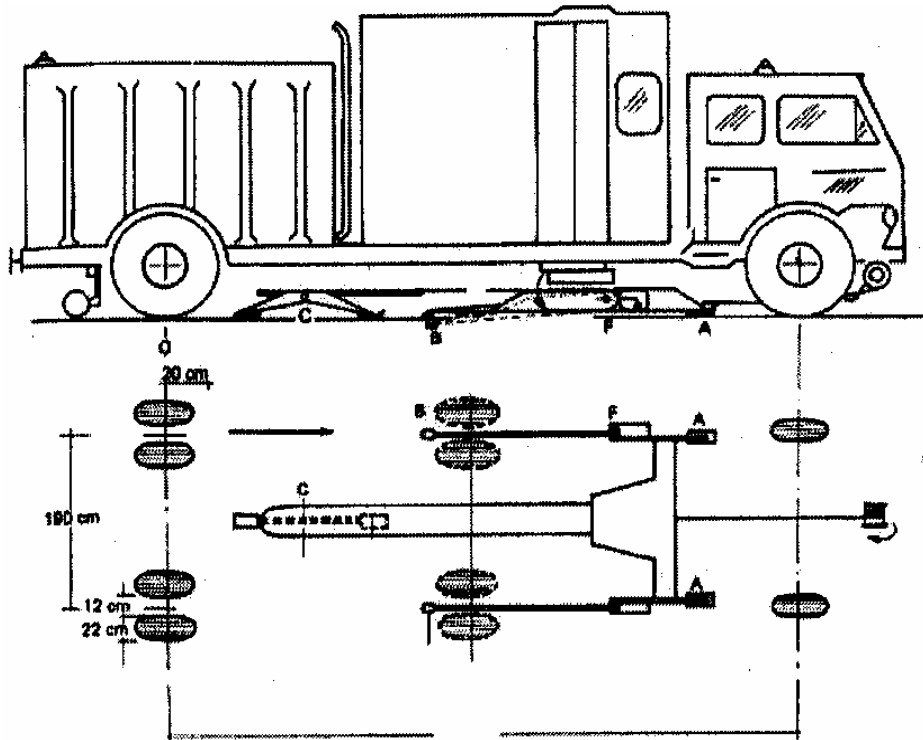
Los equipos más comunes para determinar la capacidad estructural de los pavimentos son:

- a) Equipo discontinuo de medición (Figura 1.1). Opera con el principio de brazo de palanca simple (p ej, viga Benkelman)
- b) Equipo estático semicontinuo (Figuras 1.2 y 1.3). actúa con el principio de doble brazo de palanca (p ej, deflectógrafo Lacroix)
- c) Equipo dinámico de aplicación de carga (Figuras 1.4 y 1.5). Utiliza un generador de fuerza dinámica, el cual puede ser una masa giratoria o un mecanismo actuador servohidráulicamente controlado (p ej, Dynaflect, Road Rater)
- d) Equipo de impacto (Figuras 1.6 y 1.7). Crea un impulso de carga sobre el pavimento, dejando caer una masa a partir de alturas variables sobre un sistema de resortes o caucho. Conocido generalmente como Fallig Weight Deflectómetro, FWD (p ej, Dynatest, Kuab, Jils)

En la presente investigación se realizará principalmente un análisis de los equipos de impacto por ser los de uso común en el medio.



**Figura 1.1.**  
**Equipo discontinuo para la determinación de deflexiones (Viga Benkelman)**



**Figura 1.2.**  
**Esquema del equipo semicontinuo para la determinación de deflexiones (deflectómetro Lacroix)**



**Figura 1.3.**  
**Equipo semicontinuo para la determinación de deflexiones (deflectómetro Lacroix)**





**Figura 1.4.**  
**Equipo dinámico para la determinación de deflexiones (Dynaflect)**



**Figura 1.5.**  
**Equipo dinámico para la determinación de deflexiones (Road Rater)**



**Figura 1.6.**  
**Deflectómetro de impacto para la determinación de deflexiones (Dynatest)**



**Figura 1.7.**  
**Deflectómetro de impacto para la determinación de deflexiones (Kuab)**

## **1.1 Características de los deflectómetros de impacto**

El sistema de los equipos de impacto tiene que cumplir con los siguientes requerimientos:

### **1.1.1 Sistema de instrumentación**

Durante su operación debe soportar temperaturas de entre -10 y 50 °C; tolerar humedad relativamente alta, lluvia o niebla; y otras condiciones adversas tales como polvo, golpes, o vibraciones que se pueden presentar normalmente en campo.

Los instrumentos no deben estar expuestos a los elementos (dentro del vehículo), y deben ser capaces de operar en un rango de temperaturas de entre 5 y 40 °C.

### **1.1.2 Dispositivo generador de impacto**

El dispositivo generador de impacto debe ser del tipo de masa en caída libre con un sistema de guía. El dispositivo generador de impacto tiene que ser capaz de levantar una o varias masas predeterminadas, y soltarlas en caída libre. La onda generada por el impacto de la masa, y transmitida al pavimento, deberá reproducirse de acuerdo con los requerimientos descritos en el Capítulo 2. La onda debe tener aproximadamente la forma haversine y aplicarse con una amplitud de pico a pico de 50 kN. La duración del impulso de fuerza habrá de permanecer entre 20 y 60 ms, o un tiempo de incremento de la carga de 0 a 30 ms. Es importante que el sistema de guía presente una fricción despreciable y diseñada de tal manera que las masas caigan perpendiculares a la superficie del pavimento.

### **1.1.3 Placa de carga**

La placa de carga debe ser capaz de distribuir uniformemente la carga sobre la superficie del pavimento. Los diámetros más comunes de las placas son de 300 y 450 mm de diámetro para realizar mediciones sobre autopistas y aeropistas, respectivamente. La placa será capaz de permitir mediciones de deflexión en los pavimentos, al centro de la placa.

### **1.1.4 Transductor de deflexión**

Debe ser capaz de medir el desplazamiento vertical máximo, y estar montado de tal manera que minimice la rotación angular con respecto a su plano de medición en el movimiento máximo esperado. El número y espaciado de los sensores es opcional, y dependerá de los propósitos de la prueba y de las características de cada capa del pavimento. El espaciado adecuado entre sensores es de 300 mm. Los sensores pueden ser de varios tipos: transductores de desplazamiento, de velocidad, o de aceleración (acelerómetros).

### **1.1.5 Celda de carga**

La celda tiene que ser colocada de tal manera que no restrinja la capacidad de obtener mediciones de deflexión, bajo el centro de la placa de carga. Además, debe ser resistente al agua y a los impactos en carretera durante el desarrollo del ensayo o transporte.



## **2 Uso de los deflectómetros de impacto**

---

Antes de utilizar el deflectómetro de impacto es necesario realizar la calibración de los diferentes transductores que forman parte del equipo de medición. La calibración propiamente dicha de los transductores, consiste en una comparación de sus mediciones contra patrones nacionales o internacionales de la misma magnitud por definir.

Posteriormente, es importante verificar que la señal que emite el equipo y su sistema de registro cumplan con las siguientes especificaciones.

### **2.1 Especificaciones de la señal, y del sistema de registro**

Las especificaciones de la señal, y del sistema de registro deben permitir una resolución tal que cumpla con requerimientos como:

El desplegado del medidor de carga y el almacenamiento deben tener una resolución de 200 N, o menos.

El desplegado de las mediciones de la deflexión y el almacenamiento habrán de manejar una resolución de  $\pm 1 \mu\text{m}$ , o menos.

Las mediciones de la carga y la deflexión requieren registrarse como se especifica en los párrafos anteriores, dentro de un periodo de tiempo o ventana de medición como mínimo de 60 ms, para una precisión de un tiempo de carga máxima y deflexión de  $\pm 2 \%$ , y la precisión de las deflexiones de  $\pm 2 \mu\text{m}$ .

### **2.2 Procedimiento para la determinación de deflexiones en sitio**

- a) Coloque el dispositivo de prueba y la placa de carga sobre el punto que se desee probar. El lugar de prueba debe estar libre, en lo posible, de gravas, gravillas y escombros para asegurar que la placa quede apoyada completamente. Las superficies de grava o suelo tienen que estar lo más niveladas posible, y remover todo el material suelto para asegurar que la placa de carga haga contacto perfecto con la superficie del pavimento que se pretende evaluar.
- b) Mida la temperatura ambiente y la del pavimento. Si la prueba se desarrolla por un periodo largo de tiempo, tome temperaturas del pavimento cada hora para establecer una correlación directa entre la temperatura ambiente y la de la superficie del pavimento.

- c) Registre la siguiente información para cada pavimento evaluado: nombre del operador; fecha y hora; factores de calibración; inicio y fin de la estación o localización física del tramo evaluado; localización de cortes o terraplenes; ubicación de alcantarillas, puentes y otras características de control vertical; límites y extensión de los deterioros superficiales; condiciones ambientales, y descripción del tipo de pavimento.
- d) Inicie el programa de adquisición de datos, e introduzca la información que requiera la configuración del equipo de deflexión al momento del ensaye. La configuración del equipo se almacena en un archivo de salida, y constituye un insumo para el programa de análisis. Esta información, normalmente incluye el diámetro de la placa de carga, número y posición de los transductores de deflexión y la orientación de los transductores de deflexión con respecto a la placa de carga. Seleccione el formato de archivo de datos adecuado; existen diferentes formatos.
- e) Baje la placa de carga y los transductores para asegurarse de que se encuentran en una superficie estable y firme.
- f) Levante el dispositivo generador de impacto a la altura deseada, y deje caer el peso. Registre la deflexión máxima de la superficie y la carga máxima.

En caso de que ocurra una deformación permanente bajo la placa de carga, mueva el aparato, y reduzca el impacto aplicado hasta que la deformación permanente no sea significativa para el primer ensayo en campo.

- g) Ejecute como mínimo dos secuencias de carga (c), y compare los resultados. Si las diferencias son mayores del 3 % en cualquier transductor, registre la variabilidad en el reporte. Los ensayos adicionales se pueden hacer con la misma o diferente carga. Con la finalidad de determinar la no linealidad de un sistema de pavimento es factible desarrollar ensayos para diferentes niveles de carga. El analista puede utilizar cuencas promediadas si se presentan errores aleatorios de importancia.

## **2.3 Localización y número de ensayos para diferentes niveles de proyecto**

### **2.3.1 Localización del ensayo**

La localización del ensayo puede variar de acuerdo con el uso que se le dará a los datos obtenidos. En la mayoría de los casos, la primera aproximación se realiza con un ensayo sobre las roderas debido a que la respuesta del pavimento en esa zona, de alguna manera refleja el efecto del daño que se ha acumulado. La determinación de deflexiones entre las roderas de un pavimento de concreto

asfáltico, se puede desarrollar para comparar con los valores obtenidos en las roderas e indicar las diferencias que se pudieran presentar.

## **2.3.2 Número de ensayos de acuerdo con el nivel de proyecto**

### **2.3.2.1 Ensayos a nivel de red de carreteras**

Este nivel de ensayo proporciona un panorama general de la capacidad estructural de los pavimentos con ensayos limitados. Los ensayos de deflexión, tradicionalmente se llevan a cabo en intervalos de 100 a 500 m, dependiendo de las condiciones específicas de los pavimentos y la magnitud del área por analizar. Se recomienda un mínimo de siete ensayos por sección uniforme de pavimento para asegurar una muestra estadísticamente significativa. Para un pavimento de concreto asfáltico o concreto con refuerzo continuo, la carga se debe colocar a lo largo de la rodera externa.

Para el análisis de redes de carreteras, al menos el 10 % de las losas del pavimento de concreto hidráulico se deben ensayar en las juntas, tanto para definir la deflexión como para determinar la eficiencia en la transferencia de carga.

### **2.3.2.2 Ensayos a nivel proyecto general**

Este nivel proporciona un análisis más detallado del pavimento, por ejemplo, para fines de diseño de sobrecarpetas o de rehabilitación. Debe realizarse en intervalos de 50 a 200 m dependiendo de las condiciones específicas del pavimento, y de la magnitud del área por estudiar. Se recomienda un mínimo de 15 determinaciones por sección de pavimento uniforme en este nivel de proyecto. De igual manera que en el tipo de proyecto anterior, las deflexiones en los pavimentos de concreto asfáltico y concreto hidráulico con refuerzo continuo, el ensayo se realizará en la rodera externa; para pavimentos de concreto hidráulico, como regla no se cubrirán todas las juntas asociadas con cada losa interior, sino que se aconseja cubrir un mínimo de 25 %. En aeropuertos de concreto hidráulico, es recomendable llevar acabo la evaluación de la eficiencia de las juntas, tanto en juntas transversales como longitudinales.

### **2.3.2.3 Ensayos a nivel de proyecto detallado**

Este nivel da lugar a un análisis altamente detallado y específico del pavimento para fines de identificar zonas localizadas con deflexiones altas, o detectar oquedades en los pavimentos de concreto hidráulico, etc.

Para pavimentos de concreto asfáltico y concreto hidráulico de refuerzo continuo, el ensayo se realiza en intervalos de 10 a 100 m. En carreteras, calles y autopistas el muestreo se realiza en ambas roderas.



## **2.4 Factores que influyen en la determinación de las deflexiones**

Los factores que afectan en mayor medida a las deflexiones incluyen la carga, el clima y las condiciones del pavimento. Estos hechos deben considerarse cuidadosamente cuando se realizan ensayos no destructivos.

### **2.4.1 Carga**

La magnitud y duración de la carga influye considerablemente en las deflexiones de los pavimentos. Es recomendable que el equipo que se utiliza en pruebas no destructivas sea capaz de aplicar una carga al pavimento, similar a la carga actual de diseño (p ej, 40 kN). Desafortunadamente, no todos los equipos comerciales que efectúan ensayos no destructivos pueden simular la carga de diseño, algunos lo hacen con la magnitud de la carga, pero no con su duración o frecuencia. Generalmente, se acepta al deflectómetro de impacto FWD (Fallig Weight Deflectometer) como el mejor equipo hasta ahora, para simular la magnitud y duración de las cargas actuales que circulan por los caminos (Lyton, 1989).

Las propiedades no lineales o su sensibilidad al nivel de esfuerzos, de la mayoría de los materiales que conforman las capas de los pavimentos hacen que las deflexiones medidas sean proporcionales a las cargas aplicadas. Los resultados de prueba se tienen que extrapolar para cargas excesivas. Debido a que las extrapolaciones frecuentemente inducen errores significativos, los especialistas se inclinan por el uso de los equipos para ensayos no destructivos, dado que generan cargas similares a las que aplican los vehículos pesados.

En el campo de los pavimentos se han encontrado diferentes ecuaciones de correlación o regresión, relacionando deflexiones bajo cargas más ligeras y las obtenidas con equipos que aplican cargas más pesadas. Es importante destacar que el uso de tales correlaciones debe hacerse con cuidado, pues los datos a partir de los cuales se desarrollaron tales correlaciones, normalmente muestran una gran dispersión, lo que hace posible incurrir en errores significativos. Por otro lado, las correlaciones logradas a partir de un tipo de estructura de pavimento, no necesariamente se cumplen para diferentes tipos de pavimentos. Aún en la misma estructura de pavimento es factible encontrar variaciones considerables entre correlaciones encontradas por diferentes organismos, lo anterior suele asociarse a diferencias desde el proceso de construcción, condiciones ambientales, temperaturas, etc.

### **2.4.2 Temperatura**

La temperatura y la humedad son dos condiciones climáticas que afectan la magnitud de las deflexiones. En los pavimentos asfálticos, las altas temperaturas producen el reblandecimiento de la carpeta asfáltica e incrementan las deflexiones. En los de concreto hidráulico, la temperatura en forma de cambios

globales del gradiente térmico representa una influencia muy importante en las deflexiones medidas cerca de las juntas o grietas. Las temperaturas altas provocan expansión en las losas, y por ende un acercamiento entre ellas; así, se incrementa la eficiencia de la transferencia de carga, y por consiguiente las deflexiones son menores.

El alabeo de las losas, debido a los gradientes de temperatura suele causar variaciones importantes en las deflexiones medidas, especialmente si se evalúan en la noche o en la mañana, cuando la cara superior de la losa está más fría que la inferior, ya que generarán deflexiones mayores en las esquinas y en las orillas que las que se realizan por la tarde, cuando la cara superior de la losa está mucho más caliente que la inferior.

La época del año ejerce una influencia muy significativa en las mediciones de la magnitud de las deflexiones. En regiones frías se pueden diferenciar cuatro periodos diferentes: El de congelamiento, que se presenta en invierno, provoca que el pavimento esté más rígido. El de primavera, o sea cuando se presenta el deshielo y existe agua libre en la estructura del pavimento, lo cual incrementa considerablemente la magnitud de las deflexiones medidas. El periodo de incremento rápido de la rigidez es que se presenta a principios de verano, cuando el exceso de agua libre disminuye en la estructura del pavimento y la deflexión se ve disminuida de manera considerable. Por su parte, el de rigidización continúa, aunque más lentamente, a finales de verano y la época de otoño cuando los niveles de las deflexiones se reducen en función del decremento del agua libre en el sistema de pavimento.

En regiones que no experimentan congelamiento ni deshielo, las deflexiones generalmente presentan una curva senoidal, correspondiendo la máxima deflexión en la época de lluvias, donde el contenido de agua libre es mayor en la estructura del pavimento. En regiones secas, el periodo de deflexión máxima puede ser en el verano, cuando la superficie del asfalto se reblandece debido a la intensa radiación solar.

Para comparar e interpretar las mediciones de la deflexión deben considerarse tanto la hora del día como la época del año en que se realizan. Generalmente, las deflexiones se correlacionan con una temperatura estándar, por ejemplo, 21 °C para un periodo de condiciones críticas, basado en procedimientos desarrollados localmente.

### **2.4.3 Condiciones del pavimento**

Es evidente que las condiciones en que se encuentre el pavimento influyen en la magnitud de las deflexiones medidas. Para asfálticos, las deflexiones obtenidas en áreas con agrietamientos y roderas serán mayores que las que se consigan en áreas libres de deterioros. En los de concreto hidráulico, las oquedades bajo las losas de concreto provocarán incrementos en las deflexiones; a su vez, la ausencia de deterioros de los dispositivos de transferencia de carga afectará a la deflexión medida en ambos lados de las juntas. Las deflexiones obtenidas cerca

de una alcantarilla suelen ser mucho mayores; y para secciones en corte y en balcón se presentan diferencias considerables en las deflexiones. Es importante considerar tales condiciones cuando se obtienen deflexiones en un tramo carretero, y más aún cuando se seleccionan las zonas de evaluación.

## **3 Calibración de deflectómetros de impacto**

---

### **3.1 Antecedentes**

Es ampliamente conocido que anualmente se requieren cantidades muy importantes de recursos económicos para rehabilitación y renivelación de pavimentos. Con la finalidad de tomar las mejores decisiones en cuanto a la asignación de recursos para los trabajos de rehabilitación, los organismos administradores de las diferentes redes de carreteras demandan siempre datos que reflejen las condiciones estructurales de los pavimentos.

Con la finalidad de determinar la capacidad estructural de los pavimentos, una de las tecnologías que se utiliza más ampliamente en varios países está basada en ensayos no destructivos, NDT, (Non Destructive Test), y el equipo con mayor aceptación es el Falling Weight Deflectometer (FWD), el cual al aplicar un golpe registra la información de la respuesta de la estructura, y la configuración del pavimento.

A pesar de la sofisticación de sus componentes, el FWD requiere ser calibrado adecuadamente; de no ser así, los valores obtenidos pueden ser imprecisos y conducir a soluciones inadecuadas; las cuales resultarían más costosas de lo que se calcularía en realidad, o serían insuficientes para las condiciones estructurales y de uso del pavimento de que se trate.

Es muy importante que las deflexiones medidas sean lo suficientemente precisas para realizar estimaciones correctas de las características estructurales de los pavimentos a partir de datos del FWD. Por tal razón, es indispensable la calibración de cualquier equipo FWD que intervenga en proyectos de rehabilitación de carreteras.

A raíz de esta problemática, a finales de la década de 80s, el Programa Comportamiento de Pavimentos a Largo Plazo, LTPP, (Long Term Pavement Performance) desarrolló procedimientos de calibración, los cuales fueron adoptados por la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) como una norma provisional; dichos procedimientos fueron aceptados solamente en los Estados Unidos como una medida para asegurar que la información que se obtiene del FWD es precisa.

A principios de los 90s se abrieron varios centros de calibración en cooperación con los departamentos de transporte de los estados de Minnesota, Nevada, Pennsylvania y Texas. Dichos departamentos administran los centros, y en tres estados el mismo personal supervisa las operaciones y calibraciones periódicas. El Instituto del Transporte de Texas opera al Centro de Calibración en Texas a través de un acuerdo con el Departamento de Transporte del Estado.

Los estados proporcionan las instalaciones y los recursos humanos para los centros de calibración; mientras que la Administración Federal de Carreteras, FHWA, (Federal Highway Administration) dona el equipo utilizado en los procedimientos de calibración. Por casi una década, los cuatro centros de calibración han operado con técnicos ampliamente capacitados.

Su impacto en los Estados Unidos ha sido cada vez mayor. Dentro de los beneficios que se han observado se pueden mencionar:

- a) Mejorar las decisiones acerca del sitio y tiempo de aplicación de recursos para la rehabilitación de carreteras
- b) Mayor efectividad y certidumbre en los análisis costo-beneficio de proyectos de rehabilitación
- c) Mejores decisiones en el diseño de pavimentos nuevos y sobrecarpetas

## **3.2 Calibración**

Existen dos niveles de calibración para este tipo de equipos; el primer nivel corresponde a la calibración propiamente dicha por parte de organismos certificados o acreditados, que realizan las comparaciones de los instrumentos de medición de los deflectómetros de impacto contra patrones con trazabilidad a patrones primarios nacionales o internacionales; el segundo nivel, que se describirá en los siguientes párrafos, corresponde a verificaciones intermedias, y que puede desarrollarlo el propietario del equipo como un seguimiento a la calidad de las mediciones de los transductores que utiliza el deflectómetro de impacto FWD.

### **3.2.1 Dispositivo generador de impacto**

Antes de realizar la calibración de los transductores de carga y deflexión, el dispositivo se preconditiona dejando caer la carga al menos cinco veces, y verificando la diferencia relativa para cada carga. La carga no debe variar entre ellas más del 3 %. Si la variación excede esta tolerancia, debe limpiarse el riel perfectamente con una franela y verificar las condiciones de uso de la carga. Las partes inapropiadas deben ser reemplazadas o reparadas antes de la calibración para asegurar que las fuerzas horizontales se minimicen.

### **3.2.2 Calibración relativa de los transductores de deflexión**

El procedimiento para realizar la calibración relativa de los transductores de deflexión asegura que las mediciones con este equipo se realizan de manera precisa y consistente. Es importante mencionar que esta calibración puede llevarla a cabo el propietario del equipo.

La calibración de los transductores tiene que hacerse como mínimo una vez al mes de acuerdo con las indicaciones del fabricante y con la frecuencia de uso.

Se requiere un transductor de deflexión de referencia que sirva como patrón de los otros transductores. Es necesario también, contar con equipo especializado como el utilizado en los centros de calibración de los Estados Unidos.

El procedimiento de calibración relativa, además revela si algún transductor se encuentra fuera de rango; de aquí, la importancia de esta calibración.

El procedimiento de calibración de la deflexión relativa debe utilizarse para el ajuste de las mediciones de la deflexión de cada transductor de deflexión para que en conjunto produzcan una misma medición (de acuerdo con los límites de precisión especificados más adelante). La calibración del transductor de deflexión relativa requiere de una barra de sujeción, que habrá de proporcionar el fabricante.

La barra será de una longitud adecuada para dar cabida a todos los transductores durante el ensayo, y colocar los transductores uno tras otro a lo largo de un eje vertical. Además, contar con la suficiente rigidez para permitir que cada transductor experimente la misma deflexión provocada por el dispositivo generador de impacto.

La cantidad de transductores en la barra y su posición debe ser lo más cerca posible a la placa de carga. La barra se colocara mediante una pequeña marca en el pavimento o por una arandela pegada en el pavimento, para proporcionar un punto sólido de contacto al soporte de la barra (Figura 3.1).



**Figura 3.1.**  
**Barra de sujeción para transductores de deflexión; se observa la colocación de los transductores en la barra**

La placa de carga necesita estar en contacto continuo con la superficie del pavimento mientras se reúnen los datos de la calibración. Durante la calibración, se deben cambiar de posición a los transductores de manera lineal sobre la barra. Para cada posición de la barra, registre cinco deflexiones en cada transductor, y colócala manualmente en posición vertical a una velocidad moderada, mientras se miden las deflexiones.

Las magnitudes aceptables de las deflexiones medidas son cercadas a  $400 \mu\text{m}$ . Durante la calibración debe mantenerse el mismo sistema de carga: determine la relación de cada transductor, dividiendo el promedio de todos los transductores entre el promedio de ese transductor; si alguna relación de transductor es mayor de 1,003 o menor de 0,997, todos los factores de calibración de los transductores deben ser reemplazados por el factor de calibración existente, multiplicado por la relación. Si alguno de los factores de calibración excede los límites establecidos por el fabricante, el dispositivo tendrá que ser reparado y recalibrado, acorde con las recomendaciones del fabricante.

Para asegurar que las deflexiones pequeñas (tal como las que se encuentran cercanas a la posición exterior de la cuenca de deflexiones) se registran con la aproximación adecuada, repita el procedimiento descrito a una distancia de 1 a 1,5 m de la placa de carga. Se consideran aceptables las deflexiones de entre 50 y 100  $\mu\text{m}$ . Asegúrese de que la diferencia entre los promedios de dos transductores es igual o menor a 2  $\mu\text{m}$ ; los factores de calibración de los transductores no debe ser alterado. Si cualquier diferencia entre promedios es mayor a 2  $\mu\text{m}$  el dispositivo debe repararse y recalibrarse, acorde con las recomendaciones del fabricante.

En resumen, la calibración se realiza de la siguiente manera:

- a) Se colocan los transductores en una barra rígida proporcionada por el fabricante del equipo
- b) Se coloca el extremo inferior de la barra en la parte trasera del equipo (cerca de la placa de aplicación de la carga)
- c) Se realiza la aplicación de cinco golpes (caídas de masa) de acondicionamiento
- d) Se aplican cinco golpes, (propriadamente la medición) y se determinan los desplazamientos de cada uno de los transductores
- e) Se cambian los transductores de posición, y se repiten los pasos a) a d)
- f) Lo descrito en e) se realiza para cada transductor, de tal manera que cada uno ocupe todas las posiciones posibles en la barra
- g) Se obtienen las relaciones de deflexiones para cada serie de aplicaciones de carga

Existen métodos desarrollados por agencias ajenas al fabricante para calibrar el deflectómetro de impacto mediante celdas de carga y transductores de deflexión independientes. Uno de ellos es el procedimiento de referencia de calibración, desarrollado por Strategic Highway Research Program (SHRP), supervisada por la dirección del Programa Comportamiento de Pavimentos a Largo Plazo, LTPP, (Long Term Pavement Performance), de la Oficina Federal de Administración de Pavimentos, FHWA, (Office of Federal Highway Administration).

Se emplea en la calibración del deflectómetro de impacto usado en los estudios del LTPP; con lo que se han establecido cuatro centros de calibración; uno en cada unidad regional de la LTPP. Estos centros se ubican en Pennsylvania, Minnesota, Texas, y Nevada, y son dirigidos por su respectivo Departamento de Transporte del Estado (State Departments of Transportation).

Otro método esta basado en un sistema de calibración portátil desarrollado por la Universidad de Texas, El Paso (UTEP), para Texas DOT. Este sistema también usa celda de carga y transductores de deflexión independientes para medir la carga, y la deflexión provocada por el deflectómetro de impacto.



Ambos métodos (SHRP y UTEP) pueden recurrir al mismo punto en la superficie del pavimento para la calibración, moviendo el transductor de ensayo de la barra sujetadora y colocando una barra de referencia; el método UTEP también puede emplear la barra de transductores proporcionada por el fabricante, con los transductores de verificación colocados lo más cerca posible del transductor de ensayo.

Ambos métodos con transductores independientes, son más completos que los intercambiables, ya que el estacionario se utiliza en el ajuste de las ganancias de los transductores iguales o menores al 2 %; y el método portátil UTEP para la verificación de transductores de deflexión y la combinación del sujetador de transductores para campo, bajo condiciones actuales de trabajo.

### **3.2.3 Calibración de los transductores por temperatura ambiente**

Se realiza mediante la línea de mejor ajuste una regresión lineal de una serie de nueve mediciones de temperatura a partir del procedimiento de calibración de referencia con un bloque seco, certificado de alta precisión y trazable a patrones internacionales. Las temperaturas de referencia son de 5 a 45 °C en incrementos de 5 °C. El transductor se aprobará, sólo si cumple con las especificaciones de linealidad.

El programa del deflectómetro de impacto requiere dos parámetros de calibración (V1 y V2, es decir, dos salidas de voltaje del transductor a 0 y a 100 °C), calculados a partir de la ecuación obtenida como se describe en el párrafo anterior. Es importante mencionar que con este procedimiento se asegura la precisión dentro del rango más probable de uso del termómetro 0 a 50 °C.

La verificación periódica se realiza a partir de la determinación de dos lecturas de temperatura, lo cual es adecuado en la mayoría de los casos debido a que la linealidad del transductor ya ha sido verificada en la calibración del equipo, y normalmente no cambia de manera significativa con el tiempo; y éstas son suficientes para definir la línea de la ecuación de regresión.

Para mayor precisión es necesario hacer la calibración a partir de nueve lecturas, usando el mismo procedimiento descrito en párrafos anteriores. Para la verificación de la temperatura a dos puntos, se requieren de uno o dos líquidos en el baño. Se recomienda un termómetro digital con rango de 0 a 50 °C con precisión de 0,4 °C, o mejor con una resolución de al menos 0,1 °C.

La temperatura del baño debe ajustarse a temperaturas baja y alta; para la baja conviene un rango entre 0 y 10 °C; y para la alta un rango entre 40 y 50 °C.

Los puntos en los cuales se determina la temperatura con el termómetro del equipo y con el patrón, deben estar lo más cerca posible. Cuando finalice la verificación es necesario introducir los nuevos valores de voltajes V1 y V2.

### **3.2.4 Calibración de los transductores por temperatura en la superficie del pavimento**

Se efectúa de manera semejante al procedimiento descrito para los transductores para determinar la temperatura del aire, solamente que en este caso no es recomendable que el usuario realice esta operación a menos que sea realmente necesario. El transductor de temperatura de superficie y el baño con el transductor patrón tienen que estar encerrados de tal manera que la evaporación del agua no disminuya su temperatura en la superficie y se evite la humedad de condensación en el lente del transductor de temperatura de superficie, el cual debe colocarse verticalmente, de preferencia a una distancia de 300 mm entre la lente del transductor y la superficie del agua, teniendo cuidado de que dicho espacio permanezca libre de obstáculos.

### **3.2.5 Calibración del indicador de distancia**

Para la calibración del indicador de distancia es necesario contar con una vialidad recta y plana con una longitud de al menos 1 km, y conocer su longitud de manera precisa con una cinta calibrada por comparación con patrones trazables a patrones internacionales. Se deben marcar claramente los puntos de inicio y fin del tramo.

Una vez realizado lo anterior, se hace circular el equipo sobre el tramo de verificación de distancia y se marcan en el programa los puntos de inicio y fin: es importante verificar las diferencias entre los factores de calibración de distancia anteriores y actuales con el fin de llevar un seguimiento de la calidad de medición del equipo, e identificar y controlar las variaciones que éste pudiera presentar.



## **4 Métodos para la estimación del módulo elástico a partir de mediciones con deflectómetro de impacto (FWD)**

---

### **4.1 Antecedentes**

Una vez obtenidos los datos de la calibración, éstos se procesan por medio de una técnica analítica conocida como retrocálculo para definir el módulo elástico equivalente de capas de pavimento que corresponde a una carga aplicada, y a unas deflexiones inducidas. El análisis se puede desarrollar a partir de métodos iterativos, búsqueda en bases de datos, ecuaciones simultáneas, etc; en este apartado se escudriñará, principalmente el análisis por métodos iterativos.

Este procedimiento de análisis involucra la suposición de los valores de módulo elástico para una estructura de pavimento por capas, mediante el cálculo de la deflexión en la superficie a diferentes distancias radiales del punto de aplicación de la carga. Una vez obtenidas las deflexiones calculadas, se comparan con las deflexiones medidas; así, el proceso se repite cambiando el módulo elástico de las capas en cada iteración, hasta que la diferencia entre las deflexiones medidas y las calculadas se encuentren dentro de las tolerancias especificadas, o cuando se haya alcanzado el máximo número de iteraciones. Alternativamente, el procedimiento de análisis puede involucrar investigaciones a bases de datos de cuencas de deflexión precalculadas a partir de módulos de capa y espesores conocidos, hasta que la cuenca se aproxime lo suficiente a la de deflexiones medidas.

Cuando se analiza el comportamiento de un pavimento, se calculan las deflexiones en la superficie y otras respuestas a partir de programas de análisis que utilizan el módulo elástico como insumo. En el retrocálculo se selecciona y ajusta el módulo elástico, de acuerdo con la última deflexión de superficie calculada que mejor se ajustó a las deflexiones conocidas de una superficie.

En este capítulo se presentan diferentes criterios para la estimación del módulo elástico, y las consideraciones que en cada uno de ellos se establecen dentro de sus metodologías. En mayor medida se discutirán procesos para pavimentos asfálticos y en algunos casos para rígidos; sin embargo, el marco de trabajo es la teoría elástica multicapa como método de análisis. Debe destacarse que algunos de los programas de cómputo disponibles utilizan diferentes consideraciones y algoritmos, por lo que los resultados suelen tener discrepancias considerables. Es posible utilizar otros procedimientos de análisis tal como el elemento finito, sin embargo, es necesario realizar adecuaciones para su uso.

Cuando se realiza un diseño de rehabilitación o de refuerzo de pavimentos con sobrecarpetas de concreto hidráulico, es necesario definir el valor estructural “efectivo” o de sitio del pavimento existente.

Es importante señalar que por muchos años, solamente se consideró para este análisis a la deflexión máxima como indicador de la capacidad estructural de todo el sistema de pavimento para resistir las cargas del tránsito que lo circula. El estudio de los valores de la deflexión individual máxima y de la forma de la deflexión o cuenca de deformaciones, representa una técnica que puede utilizarse para determinar estimaciones separadas de las propiedades efectivas de la capa que describen colectivamente, la capacidad estructural del sistema de pavimento.

Una cuenca de deflexiones en un pavimento se puede inducir a partir de cargas estáticas o dinámicas. Algunos materiales en pavimentos son viscoelásticos, y su comportamiento se torna elástico debido a las velocidades de aplicación de carga rápida, mientras que presentan flujo plástico en mayor medida, para velocidades bajas de aplicación de la carga; es por ello que la teoría elástica es apropiada para cargas dinámicas; sin embargo, es muy difícil verificar si dichas magnitudes de deflexión igualan a las que se determinan a partir de cargas estáticas.

Cuando se aplican cargas dinámicas, los desplazamientos resultantes registrados por cada transductor de deflexión son también dinámicos, no obstante, estas amplitudes máximas no ocurren todas al mismo tiempo. En un análisis estático, tal como lo es la teoría elástica, dichas deflexiones máximas se analizan como si fueran equivalentes en magnitud a las deflexiones que se presentarían para una carga igual en magnitud, pero en condiciones estáticas.

La teoría de elasticidad multicapa es uno de los métodos de análisis más comunes utilizados en el diseño de pavimentos flexibles, y en menor grado de los rígidos.

Varios de los programas de cómputo que utilizan algún tipo de procedimiento iterativo de ajuste de deflexiones o alguna técnica de búsqueda en base de datos, se han desarrollado para estimar el módulo elástico del material del pavimento; algunos de los programas de cómputo para estimar módulos elásticos de un sistema de pavimento son, entre otros, MODULUS, ELMODE, ISSEM4, MODCOMP, FPEDDI, EVERCALC, WESDEF, BOUSDEF, etc.

En la actualidad, existen dos métodos de análisis que se pueden aplicar a los pavimentos flexibles: cuasiestático y dinámico.

El cuasiestático aquí presentado, incluye métodos de sección transformada Boussinesq-Odemark y subrutinas de integración numérica por capas, y los métodos de elemento finito. Como principio general, la selección del procedimiento de análisis de datos provenientes de un ensayo no destructivo NDT, con el fin de definir módulos elásticos de capa, debe ser compatible con el de análisis que se utilizará para diseñar la rehabilitación del pavimento flexible; esto es, si se utiliza un programa de cómputo para definir módulos de capa, en particular para analizar

pavimentos con fines de rehabilitación, el mismo programa de cómputo (o su equivalente) se deberá tomar como base para determinar las propiedades del material a partir de ensayos no destructivos en pavimentos.

De manera similar, si se recurre a un programa de elemento finito como base para el diseño, también deberá utilizarse para analizar los datos de los ensayos no destructivos. Es importante aplicar consistentemente el mismo método de análisis tanto en el retrocálculo como en las aplicaciones de diseño.

La aproximación fundamental empleada en la mayoría de los métodos de análisis por retrocálculo para estimar los módulos de capa en el lugar, es aquél cuya solución inicia en la deflexión del transductor externo para definir el módulo de la capa inferior de subrasante por encima de la aparente capa rígida, y a la que normalmente se le ha asignado un módulo. La secuencia del cálculo progresa hacia el centro de la cuenca mediante el “módulo conocido” de la capa inferior, y la deflexión para distancias menores. Se repite esta secuencia en un ciclo iterativo, hasta que se obtiene la solución que se aproxime más a las deflexiones medidas y calculadas.

Cuando se utilizan investigaciones en bases de datos, o métodos de sección transformada Boussinesq-Odemark la secuencia puede no ser la misma. En todos los enfoques se deben conocer o suponer los espesores de capa y las relaciones de Poisson. Aun cuando los principios de tales enfoques se aplican a todos los tipos de pavimentos, algunos métodos de análisis son más apropiados para un tipo específico de pavimento, y un dispositivo de prueba no destructiva en particular. Asimismo, algunos modelos de análisis de pavimentos se restringen a estructuras de carpetas en donde la rigidez de las capas decrecen con la profundidad (por ejemplo, las bases estabilizadas con cemento no podrían modelarse bajo una base granular).

## 4.2 Aproximación analítica

La finalidad del presente capítulo es presentar los elementos de un criterio para estimar los módulos de capa a partir de mediciones de deflexión, que pueden utilizarse en la evaluación de pavimentos o diseño de sobrecarpetas.

Con la finalidad de caracterizar los materiales en las capas de los pavimentos, el módulo resiliente medido en laboratorio constituye un insumo para varios procedimientos de diseño de sobrecarpetas.

El análisis de la deflexión proporciona una técnica que puede utilizarse para estimar el módulo elástico equivalente de una estructura de pavimento, que sustituye al módulo resiliente obtenido en laboratorio de muestras pequeñas y en algunas ocasiones de muestras alteradas.

Para muchos procedimientos de diseño de sobrecarpetas que se basan en la teoría elástica multicapa, el módulo resiliente se aproxima por medio de este módulo elástico de capa equivalente, debido a que el módulo equivalente se determina como un promedio del total de las capas en las condiciones de esfuerzo en campo, de un pavimento actual.

Es importante destacar que el módulo de capa calculado con este procedimiento es una condición específica de carga y para las condiciones ambientales en el momento de hacer las mediciones. Para que ese módulo se pueda utilizar en evaluación de pavimentos y diseño de sobrecarpetas, es necesario hacer ajustes por temperatura, época del año, y carga de diseño.

Las consideraciones implícitas utilizadas en la solución se basan en la existencia de un arreglo representativo de módulos de capa para las condiciones particulares de carga (magnitud y área) y de temperatura. De tal manera que la cuenca de deflexiones calculada (mediante la teoría elástica multicapa cuasiestática, y suponiendo características estáticas en el equipo de pruebas no destructivas) se aproxima en gran medida a la cuenca de deflexiones medida. En realidad, lo anterior depende de la tolerancia que se permita en el procedimiento. Y en la relación entre el número de capas evaluadas y el número de transductores de deflexión; varias combinaciones de módulo pueden causar que las dos cuencas se ajusten (o estén dentro de tolerancia) en forma razonable.

Es necesario aplicar juicios ingenieriles para evaluar estas alternativas de solución, y seleccionar la combinación más aplicable o eliminar soluciones irracionales, o ambas.

Existen estudios que comparan los resultados de varios tipos de equipamiento y métodos de análisis, desafortunadamente se han observado variaciones muy importantes. A la fecha no se ha obtenido la estimación de la precisión a partir de series de pruebas diseñadas estadísticamente para diferentes materiales y espesores de capas “conocidos”.

El retrocálculo presenta variaciones muy importantes en las diferentes consideraciones utilizadas en el análisis para evaluar la condición actual, así como con las técnicas para inducir y medir las deflexiones. Dado que las metodologías para el cálculo utilizan procesos analíticos por computadora, la repetibilidad es muy buena si la entrada de datos y los parámetros empleados permanecen constantes.

La dispersión de dichos procedimientos no se ha determinado a la fecha. La identificación del módulo verdadero en el sitio, basado en ensayos de módulo de resiliencia, o en algunas otras pruebas de laboratorio requieren estandarizarse antes de que sea posible establecer la dispersión para estos métodos.

Existen varias técnicas matemáticas basadas en la teoría elástica multicapa para analizar las mediciones de la deflexión, y determinar el módulo elástico multicapa efectivo en una estructura de pavimento.

Se debe tener cuidado al emplear el módulo que se estima a partir de un modelo de análisis diferente al modelo que se usará para el diseño o rehabilitación, debido a las diferencias inherentes entre los modelos. Como regla general, el mismo modelo utilizado en el diseño o rehabilitación del pavimento requiere utilizarse en el estudio de retrocálculo del módulo de capas.

Es posible aplicar las ecuaciones de regresión o algoritmos simplificados, desarrollados a partir de modelos computacionales elásticos multicapa; dichos modelos producen el módulo elástico de capa equivalente que se usa para recalcular en el modelo elástico multicapa, las deflexiones para cada punto utilizado con la cuenca de deflexiones medida. El porcentaje de error (entre las cuencas de deflexiones calculada y medida) suelen cumplir con los requerimientos establecidos más adelante.

### **4.3 Estimación del módulo de capa para pavimentos existentes**

En el siguiente apartado se establece una guía para estimar el módulo de capa estructural en pavimentos.

#### **4.3.1 Ensayo de deflexión**

El ensayo se realizará de acuerdo con lo descrito en capítulos anteriores, y pueden utilizarse para dicho ensayo equipos de deflexión de pavimentos que emplean carga dinámica cíclica o por impacto.

Es importante destacar que la calibración, propiamente dicha de los transductores de deflexión, es esencial para las mediciones precisas de deflexión de los pavimentos, especialmente para aquellos puntos alejados del de aplicación de la carga. La localización y espaciamiento de las mediciones se comentaron en el capítulo 2 de la presente publicación.

#### **4.3.2 Definición de las secciones de pavimento**

La esquematización de los parámetros de deflexión en función de la distancia o estación, puede ser muy útil para definir subsecciones de pavimento con características similares. Las gráficas de los perfiles longitudinales tanto de la deflexión máxima como de las mediciones de deflexión más alejadas del punto de aplicación de carga, deben realizarse para el pavimento que se está evaluando.

Si la carga que se aplica para inducir dichas deflexiones varía más allá del 5 %, las de tipo individual (particularmente las que representan la deflexión máxima) deben



normalizarse con respecto a la magnitud de referencia para disminuir la dispersión en los datos. Lo anterior se realiza al multiplicar la deflexión medida por la relación de cargas de referencia, respecto a la carga aplicada.

Se pueden graficar otros parámetros, por ejemplo el AREA como indicador de la variación de la capacidad de distribución de la carga del pavimento. Sin embargo, el anterior proceso de normalización no es necesario o apropiado para el cálculo de AREA. La fórmula general para ello se define para más de un transductor de deflexión (existen otras definiciones para un número específico de transductores). Los resultados a partir de diferentes ecuaciones, pueden no ser comparables.

$$AREA = (Dist_2 / 2) + \left[ \sum_{i=2}^{n-1} d_i \times (Dist_i + Dist_{i+1}) / (2d_{\max}) \right] + [Dist_n \times d_n / (2d_{\max})]$$

En donde:

<b>n</b>	=	número de transductores utilizados para medir la cuenca de deformaciones
<b>d<sub>i</sub></b>	=	deflexión medida con el transductor i
<b>Dist<sub>2</sub></b>	=	distancia entre el transductor 2 y el 1
<b>Dist<sub>n</sub></b>	=	distancia entre el transductor n y el n-1
<b>Dist<sub>i</sub></b>	=	distancia entre el transductor i y el i-1
<b>Dist<sub>i+1</sub></b>	=	distancia entre el transductor i y el i+1, y
<b>d<sub>máx</sub></b>	=	deflexión máxima al centro de la carga, medida con el transductor 1

Con la evaluación de éstos y otros perfiles longitudinales, los segmentos de pavimentos con características de respuesta significativamente diferentes, se pueden visualizar o diseñar estadísticamente, o ambos, como subsecciones individuales.

Para algunos procedimientos de diseño de sobrecarpetas, los resultados a partir de las deflexiones medidas se utilizan inicialmente para designar secciones de diseño, y ayudar en la evaluación de las diferencias en las propiedades del material. Los datos de deflexión se grafican en forma de perfil, localizándolos en toda la longitud de la sección del pavimento; y entonces se separan en subsecciones con características similares de cuencas de deflexión.

En otros procedimientos, inicialmente se calcula el módulo de capa para cada cuenca de deflexiones medida; entonces ese módulo, o el comportamiento esperado del pavimento (basado en dicho módulo) se utiliza para definir subsecciones homogéneas.

Las subsecciones con deflexiones similares, características de la cuenca de deflexiones, módulo, comportamiento esperado, o cualquier combinación de ellos,

se puede verificar estadísticamente con la técnica de  $t$  de student a fin de determinar si dos series de datos son significativamente diferentes.

Con base en las condiciones variables topográficas o geológicas, el retrocálculo del módulo elástico para cada punto medido puede preferirse o ser necesario. Para situaciones más uniformes, y/o para fines de simplificación, conviene seleccionar una cuenca de deformaciones representativa, y proceder así al análisis. Sin embargo, puede faltar alguna información específica del sitio, o introducirse error adicional, o ambos.

Las cuencas con diferencias importantes (mayores de dos desviaciones estándar en la sección de diseño) que pueden presentarse, podrían pasarse por alto al analizar solamente una cuenca “representativa”. Los sitios con diferencias severas en las magnitudes de las deflexiones, requieren evaluarse individualmente.

Si los pavimentos presentan sólo grietas ocasionales, tales como agrietamientos por temperatura en pavimentos asfálticos o juntas, o grietas en concreto hidráulico, la cuenca de deformaciones seleccionada deberá representar superficies sin agrietamiento, o bien las deflexiones ser tomadas con la carga y todos los transductores separados de las grietas al menos 1,50 m, ya que la teoría elástica no considera dichas discontinuidades. Si la superficie del pavimento está muy agrietada, dichas áreas se evaluarán y se anotará en el reporte el tipo y severidad de grietas, junto con el valor del módulo elástico de capa que se obtuvo a partir del retrocálculo. Este tipo de datos debe ser útil para explicar el análisis realizado de una zona en particular. El módulo equivalente calculado, normalmente refleja las condiciones de la superficie.

Las clasificaciones aproximadas del material y espesores de las capas se pueden obtener a partir de los registros de construcción. Por su parte, los sondeos en el pavimento existente pueden brindar espesores más precisos, así como el tipo de material para cada capa de la estructura del pavimento, y verificar la existencia de una capa rígida superficial (por ejemplo, estrato de roca).

Como una regla general, todos los tipos de material y espesores de capa obtenidos a partir de los planos de construcción necesitan verificarse con base en sondeos de campo, tanto como sea posible. El número de sondeos por sección de análisis o proyecto debe definirse para cada caso en particular.

Es necesario aplicar el criterio ingenieril con ayuda, incluso de métodos estadísticos con el fin de definir el número de muestras para estimar el espesor de las capas con la precisión y nivel de confianza deseado. Las variaciones en los espesores de las capas dependen de la calidad de la construcción y de las actividades de mantenimiento. No obstante habrá que destacar que cualquier diferencia entre los espesores supuestos y los verificados pueden afectar de manera bastante severa a los valores de los módulos de capa retrocalculados,

Es necesario introducir los datos señalados por el modelo de análisis elegido para cada deflexión individual, o para la cuenca de deflexiones medida que se pretende analizar.

Se incluyen en el conjunto de datos de entrada las características del dispositivo de ensayo no destructivo, la relación de Poisson, el espesor de todas las capas individuales definidas, los valores de deflexión y su ubicación, y posiblemente, estimaciones iniciales de los módulos elásticos por capa.

La relación de Poisson de la subrasante tendrá que seleccionarse cuidadosamente, ya que simplemente pequeñas variaciones en su valor, pueden causar diferencias considerables en la estimación del módulo de las capas superiores. Los rangos típicos de la relación de Poisson que se pueden utilizar si no se dispone de otros datos, son los siguientes:

<b>Material</b>	<b>Relación de Poisson</b>		
Concreto asfáltico	0,30	a	0,40
Concreto hidráulico	0,10	a	0,20
Bases granulares	0,20	a	0,40
Suelos cohesivos	0,25	a	0,45
Suelos estabilizados con cemento	0,10	a	0,30
Suelos estabilizados con cal	0,10	a	0,30

Es importante destacar que los valores de la relación de Poisson para bases granulares y suelos cohesivos, dependen del nivel de esfuerzo-deformación y el grado de saturación.

En los programas en los que se requiere el módulo, su selección puede afectar el número de iteraciones necesario, el tiempo requerido para alcanzar una solución aceptable, y posiblemente el valor final del módulo que se acepte. En una selección extremadamente pobre del módulo el análisis puede fallar, al intentar encontrar la solución dentro de las tolerancias especificadas entre las deflexiones medidas y las calculadas. En este caso es factible aceptar un arreglo alternativo de módulos que puede proporcionar una solución aceptable antes de alcanzar el número máximo de iteraciones.

A menudo, cuando la tolerancia es muy cerrada el módulo final que se calcula no se ve afectado por los valores elegidos para la combinación inicial del módulo. Se pueden utilizar los siguientes valores de módulo si no se dispone de otros datos:

Material	Módulo elástico MPa
Concreto asfáltico	3 500
Concreto hidráulico	35 000
Bases tratadas con cemento	4 100
Suelos estabilizados con cemento	350
Bases granulares	200
Suelo estabilizado con cal	140
Sub bases granulares	100
Suelos cohesivos	50

Por otro lado, muchos programas requieren un rango de valores de módulo aceptable en cada capa, para proporcionar velocidad de operación y limitar el módulo a sus valores prácticos aproximados.

### 4.3.3 Capas delgadas de pavimento

Cuando las capas superiores son delgadas; esto es, menores de un cuarto del diámetro del área cargada (por ejemplo, 75 mm o menos para una placa de 300 mm de diámetro), o capas más delgadas que la capa inmediatamente superior, el módulo elástico a menudo no puede determinarse con precisión por la mayoría de los métodos de retrocálculo. Estas capas delgadas, si es posible deberán combinarse al asignar el espesor con un tipo de material similar por arriba o por abajo de dicha capa delgada. O bien, el módulo de capas delgadas puede estimarse y asignarse como valor “conocido”.

Para capas delgadas de concreto asfáltico (con pocas grietas) sobre bases granulares, el módulo elástico se llega a medir en laboratorio por el método ASTM D 4123, o estimarlo matemáticamente utilizando ecuaciones de regresión disponibles o nomogramas. La temperatura para la cual se determina o estima el módulo, corresponderá a la que existe en campo al momento de haber medido las deflexiones.

Para pavimentos flexibles, con tratamiento superficial simple o doble (uno o dos riegos), la capa superficial se combina normalmente con el material de base en el procedimiento de retrocálculo.

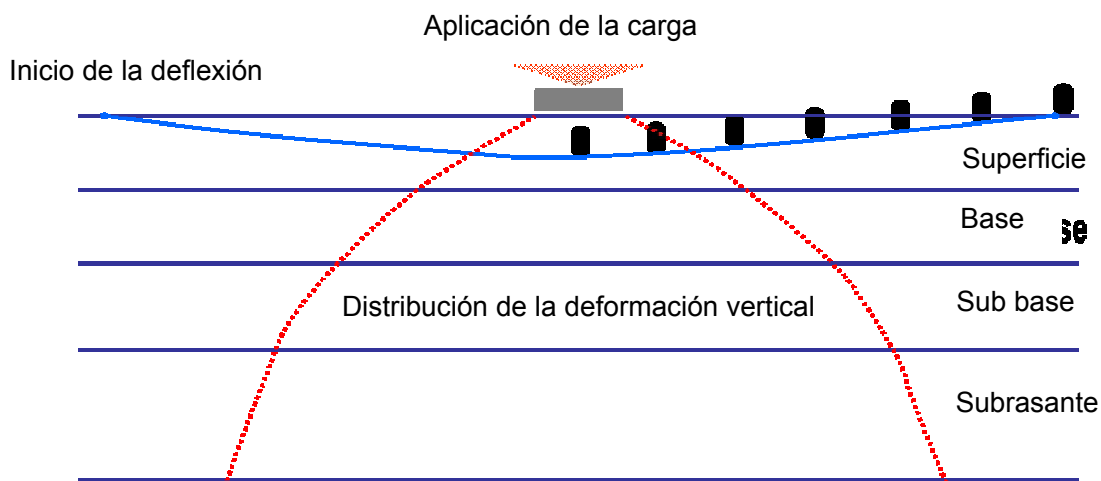
### 4.3.4 Número de capas

Con base en recomendaciones prácticas, el número de capas desconocidas (incluyen la subrasante, pero excluyen cualquier capa aparentemente rígida) para

que se haga su retrocálculo, no debe ser mayor de cinco y preferentemente menor. Con el fin de obtener la solución para un número de capas “desconocidas” (por ejemplo, cuatro módulos de capa), como mínimo que el mismo número o mas, si están disponibles de “conocidas” (por ejemplo, cinco deflexiones) se deben proporcionar para definir de mejor manera la cuenca, y reducir el número de combinaciones factibles de módulo que podrían conllevar a un arreglo de la cuenca de deflexiones.

A pesar de que se pueden derivar artificialmente más puntos de deflexión por interpolación entre puntos medidos, no es recomendable debido a que resulta fácil introducir errores adicionales por no interpretar los cambios correctos en las pendientes entre puntos. Por tanto, si se utilizan cuatro transductores, entonces es necesario contar con cuatro capas conocidas (tres capas de pavimento y la subrasante) en la evaluación estructural.

En un pavimento en donde se construyeron de tres a cinco capas, el espesor de las capas de materiales similares (mismo tipo de carpeta) se puede combinar en una capa estructural efectiva para fines de retrocálculo. Estas técnicas de análisis, en general progresan iterativamente hacia el centro de la cuenca de deflexiones a partir de la orilla de la cuenca, determinando dichos módulos de capa. Por ejemplo si es factible calcular la distancia mínima a partir del centro de la aplicación de la carga para la cual la deflexión medida en la superficie del pavimento, ésto se debe principalmente a la deformación o deflexión de la subrasante (Figura 4.1) relativamente independiente de las capas superiores.



**Figura 4.1. Representación de un ensayo no destructivo, en donde se aprecia la distribución de las deformaciones en las diferentes capas de un pavimento**

Por tanto, una deflexión obtenida más allá de esta distancia se puede utilizar para obtener el módulo efectivo de la subrasante directamente para este nivel de esfuerzos. En materiales cuya rigidez depende del nivel de esfuerzos, es de

suponer que el primer transductor más allá de esta distancia se utiliza para calcular el módulo de la subrasante.

De acuerdo con los materiales que conforman la estructura del pavimento, podrán emplearse parámetros no lineales de respuesta en el proceso. Cada punto de deflexión sucesiva es factible atribuirse a deformaciones que surgen en respuesta a la carga en más capas sucesivas y ésta por tanto, proporciona información adicional “conocida” acerca de capas superiores. El módulo efectivo de tales capas superiores se estima entonces, utilizando las deflexiones más cercanas (a la carga) y el módulo de capa calculado con anterioridad para la capa inferior.

### 4.3.5 Estimación de una capa aparente rígida

Muchos procedimientos de cálculo incluyen una capa rígida aparente ( $M_r = 700$  a  $7000$  MPa) para algún espesor en la subrasante. Lo anterior intenta simular ya sea a la capa dura o el espesor, para el cual la deflexión es despreciable. Las investigaciones han mostrado que los resultados del análisis llegan a calificarse como bastante imprecisos por no incluir tal capa, o por no localizar esta capa rígida cerca de la profundidad en el sitio; particularmente si dicha profundidad es menor a seis metros.

La magnitud de este error también se ve afectado por el modelo de la subrasante, por ejemplo, un material cuya rigidez varía por el nivel de esfuerzos (reblandecimiento) podría también clasificarse como una subrasante “más rígida” con el espesor, o disminución de esfuerzo, si se incluye en el total de las capas.

### 4.3.6 Tolerancias en el ajuste de las deflexiones

La precisión en el módulo final en el retrocálculo se ve afectado por la tolerancia permitida en el procedimiento para determinar la concordancia entre las deflexiones medidas y las calculadas. Se emplean dos diferentes aproximaciones para evaluar dicha concordancia: la suma aritmética absoluta del porcentaje de error (AASE por sus siglas en inglés) y la raíz cuadrada media del porcentaje de error (RMSE, por sus siglas en inglés). En ambos, el ingeniero deberá tener en mente que el significado del error aleatorio del transductor puede ser mucho más grande para los transductores localizados en los extremos en donde las deflexiones medidas son muy pequeñas; por tanto, pueden considerarse diferentes factores de peso.

Se puede utilizar una suma aritmética absoluta del porcentaje del error para evaluar la concordancia entre las cuencas de deflexión medida y la calculada, y se define como:

$$AASE = 100 \sum_{I=1}^N |(dmed_i - dcalc_i) / dmed_i|$$

En donde:

N	=	número de transductores para definir la cuenca de deflexiones
dmed <sub>i</sub>	=	deflexión medida en el punto i
dcalc <sub>i</sub>	=	deflexión calculada en el punto i

La magnitud de la tolerancia varía con el número de los transductores de deflexión utilizados para definir la cuenca de deflexiones. Se sugiere que la suma del porcentaje de error no sea mayor que los siguientes valores para la sección del pavimento que se quiere caracterizar:

9 a 18 %	para nueve transductores de deflexión
7 a 14 %	para siete transductores de deflexión
5 a 10 %	para cinco transductores de deflexión

No se deben utilizar menos de cinco transductores de deflexión para definir la cuenca de deflexiones.

Como ya se mencionó, se puede utilizar también una raíz cuadrada media del porcentaje de error para evaluar la concordancia entre las cuencas de deflexión medida y calculada. Esta medición aunque depende menos del número de transductores utilizados para caracterizar la cuenca de deflexiones, debe cumplir con el mínimo de cinco transductores como se había indicado en el caso anterior; este parámetro se define como:

$$RMSE = 100 \left\{ 1/n \sum_{i=1}^n [(dcalc_i - dmed_i) / dmed_i]^2 \right\}^{0.5}$$

En donde los parámetros tienen el mismo significado que el indicado anteriormente. En este caso se recomienda una tolerancia límite de 1 a 2 % del parámetro.

En el caso de que no se cumplan los requerimientos del porcentaje de error señalados, entonces se pueden establecer condiciones para adaptar las consideraciones que se hacen en la teoría de elasticidad multicapa; o bien la composición actual de capas o espesores propender a diferir significativamente de aquellos utilizados en el modelo. Se soluciona el problema mediante más muestreos de materiales en la zona; pero de no ser así, entonces se hará necesario utilizar modelos más complejos que puedan simular cargas dinámicas, sin homogeneidades en el material o discontinuidades físicas en el pavimento.

Existen algunos factores que pueden afectar la precisión y aplicabilidad del retrocálculo del módulo de capas. Cualquier método de análisis que utiliza un procedimiento iterativo o de búsqueda para ajustar cuencas de deflexiones

calculadas con medidas, contendrá algún tipo de error. La magnitud de éste depende de diferentes factores; algunos de los cuales incluyen: la combinación de diferentes capas en una capa estructural; número de puntos de deflexión y limitaciones en el número de capas utilizadas para el análisis; “ruido” o imprecisiones encontradas en los transductores de medición por sí mismos; pequeñas deflexiones que están muy cerca de la magnitud de los errores aleatorios para dichos transductores; discontinuidades tales como grietas en el pavimento, particularmente si se localizan entre la carga y el transductor; consideraciones imprecisas de la existencia y profundidad de la capa firme; profundidades menores de 1,5 m de dicha capa, que suelen requerir análisis dinámico; diferencias entre los espesores reales de capa y los espesores supuestos.

Debido a la imprecisión o no disposición de mediciones o variabilidad de punto a punto; saturación de arcillas inmediatamente por debajo de los materiales de base; suelos extremadamente blandos por debajo de la base, y sobreyaciendo a suelos mucho más rígidos; distribución de presión debida a la carga de manera no uniforme en el área de contacto con el pavimento; materiales no lineales, no homogéneos o anisotrópicos en la estructura del pavimento (especialmente en la subrasante) y para capas sucesivas; relaciones de rigidez ( $Mr_{\text{capa\_superior}}/Mr_{\text{capa\_inferior}}$ ) menores que 0,5.





# Conclusiones

---

La medición de las deflexiones se utiliza ampliamente para evaluar la capacidad estructural de los pavimentos en campo y dentro de la tecnología en pavimentos; particularmente en el análisis estructural de los mismos existen diversas metodologías y equipos para tales propósitos.

Por su naturaleza, los ensayos realizados mediante este procedimiento se denominan no destructivos NDT (Non Destructive Test).

Los ensayos no destructivos de deflexiones proporcionan información acerca de la evaluación estructural de los pavimentos. Además, los resultados de dichas deflexiones también son aplicables para determinar características de pavimentos tales como el módulo de elasticidad de cada capa; rigidez combinada de los sistemas de pavimentos; eficiencia en la transferencia de carga en las juntas de pavimentos de concreto hidráulico; módulos de reacción de la subrasante; espesor efectivo; número estructural, o valor de soporte del suelo; capacidad de carga, o capacidad de soporte del pavimento, entre otros.

Como se ha comentado en incisos anteriores, las mediciones realizadas con el deflectómetro de impacto se pueden utilizar en la comparación del estado de las capas del pavimento, basándose exclusivamente en las deflexiones medidas y/o en la forma que presenta la cuenca de deformaciones. Lo anterior toma particular importancia si se considera que las tensiones y deformaciones de las capas del pavimento, constituyen los elementos fundamentales en el proyecto.

Cuando se comparan, simplemente los niveles de deflexión es importante tomar en cuenta que una comparación de pavimentos con diversas características, que se basa exclusivamente en la medida de la deflexión debe tenerse precaución, ya que la relación entre las deflexiones, y las tensiones y deformaciones varían en estructuras de pavimentos diferentes. Para una cuenca de deflexiones única, es factible definir valores de tensión y de deformación distintos dependiendo de la estructura.

Se destacan varios de los factores que afectan los resultados de las pruebas no destructivas en la determinación de deflexiones, las cuales deben tomarse en cuenta para eliminar o minimizar su efecto, o bien considerarlos en la interpretación de los resultados. Dichos factores son entre otros, la magnitud y duración de la carga; las propiedades no lineales de los materiales que conforman los pavimentos; la temperatura y humedad; condición en la que se encuentre el pavimento.

Uno de los factores que afectan en gran medida, la magnitud de las deflexiones medidas es la temperatura, por lo que es necesario realizar investigación tendiente

a entender mejor este fenómeno; existen varios intentos en ese sentido, sin embargo, no ha sido posible a la fecha llegar a un consenso.

Por otro lado, es indispensable considerar los cambios estacionales en el comportamiento de los pavimentos, particularmente en su cambio de rigidez; lo anterior enfatizando las variaciones de humedad en las capas del pavimento, sobre todo en las subrasantes con materiales finos.

Se han desarrollado intentos orientados a estudiar la profundidad de la capa rígida, en la cual se ha determinado que existe una importante influencia en los valores de los módulos calculados, especialmente si se encuentra para profundidades someras; es necesario estudiar su respuesta en dichos valores a fin de considerar su influencia en el momento de interpretar los resultados a partir de ensayos no destructivos en campo.

# Bibliografía

---

ASTM D 5858, Cálculo del módulo elástico equivalente de pavimentos en el sitio usando la teoría elástica multicapa, (2000).

ASTM D 4694, Determinación de deflexiones con un dispositivo de carga de impulso, tipo deflectómetro de impacto, (2003).

Manual for FWD Testing in the Long Term Pavement Performance Study, Operational Field Guidelines, Version 2.0 (Feb 1993).

ASTM D 4695, Medición de deflexiones en general en pavimentos, (2003).

Cheryl Richter, Estados que utilizan los resultados de FWD para desarrollar estrategias de rehabilitación, económicamente más efectivas, FHWA, (2002).

Kim Y.R., Valoración de las condiciones de las capas en pavimentos, usando los resultados de deflexiones, NCHRP, (2001).

Kestler M.A., Prácticas actuales, y propuestas para ensayos no destructivos en pavimentos carreteros, CRREL, (1997).

FHWA-LTPP, LTPP Manual para realizar mediciones con FWD. Instructivo de campo, Versión 3.1, LTPP, (2000).

Hakim B.A., Evaluación de pavimentos, y diseño de refuerzo: Dieciséis años de experiencia, (2000).

Lukanen L.O., Predicciones de temperatura, y factores de ajuste para pavimentos asfálticos, (2000).

FHWA-LTPP , FWD Análisis de calibración relativa, FHWA, (2001).

Ullidtz P., Módulo de capa durante el ensayo HVS: Comparación de resultados con retrocálculos a partir de FWD y MDD deflexiones, (1998).

Houston W.N., Ensayos de laboratorio contra ensayos no destructivos para diseño de pavimentos, Journal of Transportation Engineering, (1992).

Roesset J.M., Ensayos de laboratorio contra ensayos no destructivos para diseño de pavimentos, TRR, 1504.





‡ **Certificación ISO 9001:2000 según documento No 03-007-MX, vigente hasta el 24 de octubre de 2006 ([www.imt.mx](http://www.imt.mx))**

§ **Laboratorios acreditados por EMA para los ensayos descritos en los documentos MM-054-010/03 y C-045-003/03, vigentes hasta el 9 de abril de 2007 ([www.imt.mx](http://www.imt.mx))**

**CIUDAD DE MÉXICO**

Av Patriotismo 683  
Col San Juan Mixcoac  
03730, México, D F  
tel (55) 5598-5610  
fax (55) 55 98 64 57

**SANFANDILA**

km 12+000, Carretera  
Querétaro-Galindo  
76700, Sanfandila, Qro  
tel (442) 216-9777  
fax (442) 216-9671

[www.imt.mx](http://www.imt.mx)  
[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)