

Medida de deflexiones en firmes con el deflectómetro de impacto

1 OBJETO, FUNDAMENTO Y CAMPO DE APLICACIÓN

1.1 Este método de ensayo describe el procedimiento que debe seguirse para medir las deflexiones de superficies pavimentadas y no pavimentadas con equipos de medición de deflexiones producidas por cargas tipo impacto. Estos equipos son denominados deflectómetros de impacto (véase Figura 1).

1.2 La deflexión vertical es la deformación vertical de la superficie debida al impacto generado por el deflectómetro (impulso de carga) sobre tal superficie.

1.3 Las deflexiones resultantes, medidas tanto en el eje de carga como a diversas distancias radiales de dicho eje, sirven para estimar las propiedades estructurales del firme en su conjunto y de los materiales que lo componen. También pueden utilizarse para evaluar la transmisión de cargas a tra-

vés de grietas y de juntas en pavimentos de hormigón, o detectar la existencia de huecos bajo losas rígidas.

1.4 Los datos pueden utilizarse, entre otras aplicaciones, para evaluar la capacidad de soporte de los firmes y los espesores de refuerzo necesarios para carreteras.

1.5 Se consideran cuatro campos de aplicación.

1.5.1 En gestión (**Tipo I**).- Revisión general de las condiciones estructurales del firme para el análisis de la red.

1.5.2 En proyecto (**Tipo II**).- Análisis del firme para la toma de decisiones técnicas en el diseño de rehabilitaciones del firme.

1.5.3 En control de la construcción (**Tipo III**).- De-

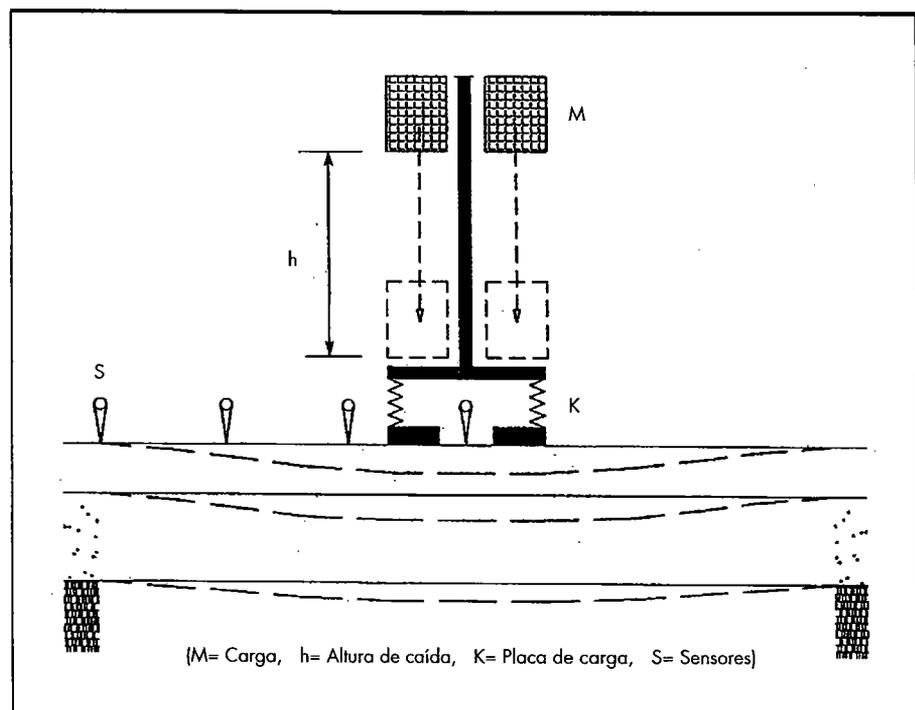


FIGURA 1. Esquema de un deflectómetro de impacto.

terminación de la capacidad de soporte de las capas construidas.

1.5.4 En detalle (Tipo IV).- Análisis de detalle para fines como la detección de fallos concretos, o la evaluación de la transferencia de carga en grietas y en juntas de firmes con losas de hormigón.

2 RESUMEN DEL MÉTODO DE ENSAYO

2.1 Este método de ensayo mide la deflexión producida por una fuerza de impacto generada por una masa que cae sobre un sistema de muelles y es transmitida a la superficie por medio de una placa. El aparato normalmente está montado sobre un remolque arrastrado por un vehículo.

2.2 La placa de carga del aparato baja hasta apoyarse sobre la superficie para ensayo. Los sensores de deflexión se apoyan también sobre el firme. La masa se eleva hasta la altura desde la cual al caer dará la carga que se especifique. El movimiento vertical de la superficie del firme, o la deflexión, se mide utilizando la instrumentación disponible. Se pueden realizar varios impactos antes de mover el equipo hacia otra localización.

2.3 Para cada impacto realizado se miden las deflexiones máximas en cada localización de los sensores.

2.4 El máximo de la fuerza aplicada por el impacto se mide como una fuerza o como una tensión media dividiendo la fuerza por el área de la placa de carga.

3 APARATOS Y MATERIAL NECESARIO

3.1 Mecanismo de generación del impacto, con un sistema de guía. La masa del mecanismo debe poder colocarse a varias alturas predeterminadas y desde éstas se deja caer libremente. La fuerza resultante del impacto sobre el firme debe ser reproducible según los requerimientos referidos en el apartado 4.

3.1.1 El sistema de guía estará diseñado para funcionar con coeficientes de resistencia despreciables y para que la masa caiga perpendicularmente sobre la superficie del firme.

3.1.2 El sistema debe ser capaz de generar una carga de pico igual o mayor a 65 kN.

3.1.3 El tiempo transcurrido desde el principio del impulso de carga hasta que alcanza su valor má-

ximo debe estar comprendido entre 5 y 30 milisegundos. La duración del impulso de carga debe estar comprendida entre 20 y 60 milisegundos.

3.1.4 Si se utilizan geófonos de rango máximo 2 mm como sensores de deflexión, no se pueden medir correctamente deflexiones superiores a dicho valor. En tal caso habrá que reducir el nivel de carga en intervalos de 10 kN hasta conseguir que la deflexión máxima medida sea inferior a 2 mm. El valor de la carga aplicada en superficies de mezcla bituminosa o capas tratadas con cemento deberá, como norma general, ser lo más próximo posible a 65 kN. Se utilizará una misma carga por tramo auscultado.

3.2 Placa de carga. En general el impulso de carga se aplicará por medio de una placa de carga de 300 mm de diámetro. La placa de carga llevará incorporado un disco de goma, interpuesto entre ésta y la superficie de ensayo, de un espesor mínimo de 5 mm. Este disco de goma deberá estar acanalado o disponer de algún otro sistema para asegurar su deformación.

3.2.1 Con el fin de asegurar una distribución homogénea de presiones bajo la placa de carga, es recomendable utilizar una placa dividida en sectores, especialmente en el caso de efectuar el ensayo sobre firmes deformados o heterogéneos.

3.2.2 La placa deberá permitir la instalación de un sensor para la medida de la deflexión en el centro de aplicación de la carga.

3.2.3 Cuando el ensayo se realiza directamente sobre capas granulares se recomienda utilizar una placa de carga de diámetro superior (generalmente 450 mm). Si se aplican cargas elevadas puede también ser necesario utilizar una placa de carga de mayor diámetro para limitar la presión de contacto.

3.3 Sensores de medida de deflexiones. Podrán medir la máxima deflexión vertical del firme y montados de forma que minimicen la rotación angular con respecto al plano de medida en el máximo movimiento esperado. Los sensores se situarán a distancias entre 0 y 2500 mm del centro de la carga.

3.3.1 La posición de los sensores se tomará de la siguiente serie: 0 - 200 - 300 - 450 - 600 - 900 - 1200 - 1500 - 1800 - 2100 - 2400 mm. Siempre habrá sensores situados a las siguientes distancias: 0 - 300 - 600 y 900 mm. La posición de los sensores se

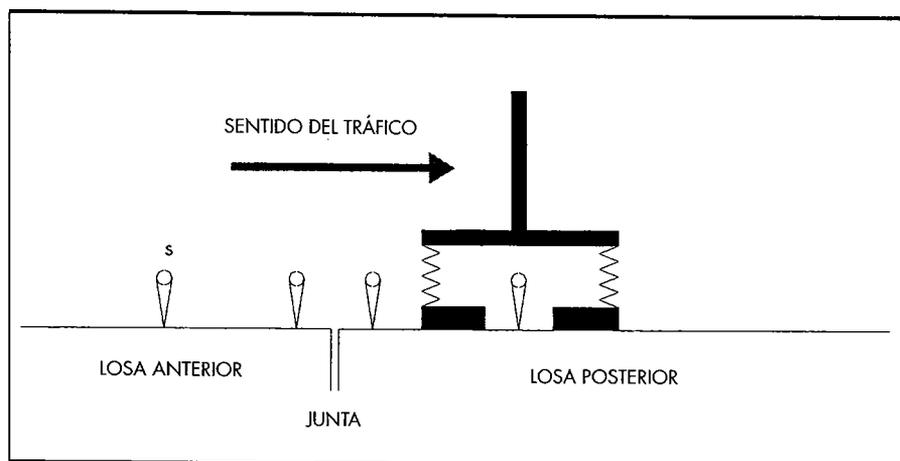


FIGURA 2. Disposición para medida de la transferencia de carga en junta.

elegirá en función del número de capas del firme y de los espesores de las mismas, teniendo en cuenta que la deflexión a distancia r del centro de carga es indicativa de las propiedades estructurales de las capas de firme situadas por debajo de la profundidad equivalente $h_e=r$ (véase apartado 6.4)

3.3.2 Cuando se utilice el deflectómetro de impacto para la evaluación de la transferencia de carga en grietas o juntas de pavimentos de hormigón, se colocarán dos (2) sensores lo más cercanos posible a ambos lados de la grieta o junta, situados simétricamente respecto a ésta, y lo más próximos posible a la placa de carga. La distancia entre ambos sensores será menor o igual a 150 mm (figura 2).

3.3.3 Los sensores podrán ser de varios tipos, como sismómetros, velocímetros o acelerómetros. Tendrán las siguientes características:

Resolución de la lectura: $1\mu\text{m}$ o menor.

Precisión: error sistemático de 2% de la lectura + $1\mu\text{m}$ o menor.

Repetibilidad: error aleatorio de $\pm 2\mu\text{m}$ + 1 % de la lectura o menor.

3.3.4 En el caso de que las deflexiones obtenidas se vayan a utilizar para la realización de cálculo inverso de firmes, el deflectómetro de impacto dispondrá de al menos seis (6) sensores.

3.4 Célula de carga. Medirá la carga aplicada en cada impacto, y deberá colocarse en una posición donde se minimicen los efectos inerciales. La célula deberá ser resistente al agua, y a las reacciones del terreno.

Resolución de la lectura: mayor de 0,1 kN.

Precisión: error sistemático \leq máx (0,5 % del rango total de la escala de lectura, 2% de la lectura).

Repetibilidad: error aleatorio $\leq \pm 0,1$ % del rango total de la escala de lectura.

3.5 Procesador de datos y sistemas de almacenamiento. Deberá usarse algún sistema de almacenamiento digital o en papel, o ambos, para registrar las cargas, los datos de deflexiones medidas, e información de apoyo como temperatura del aire, temperatura de la superficie del firme, posición de los puntos de ensayo y datos de identificación de cada punto ensayado. El ordenador que se utilice para este propósito deberá tener una pantalla. Esta información podrá registrarse también manualmente.

3.6 El vehículo de ensayo deberá, además de tener correctamente colocadas todas las conexiones con el equipo, llevar en regla todos los documentos del vehículo y las correspondientes licencias. Se deben tomar todas las precauciones necesarias para asegurar la máxima seguridad de los operarios, así como, del tráfico circulante.

4 CALIBRACIÓN

4.1 El fabricante del equipo debe asegurar y demostrar una calibración satisfactoria del mismo, y el operador debe asegurar la calidad de los ensayos.

4.2 Para controlar la repetibilidad del equipo se realizarán 12 impactos de 65 kN en el mismo punto, descartándose los dos primeros. La desviación típica de las deflexiones correspondientes a las 10 lecturas restantes y normalizadas para la misma fuerza de impacto debe ser menor o igual a $2\mu\text{m}$ o al 1,25% del valor medio de las 10 lecturas + $1,5\mu\text{m}$ (lo que re-

sulte mayor), para cada sensor. Esta comprobación se debe efectuar una vez al mes.

4.2.1 Se debe controlar la repetibilidad de la carga al menos cada 10 000 caídas, y cada 6 meses. Esta comprobación se llevará a cabo sobre un firme en perfecto estado, sin defectos de regularidad ni grietas, donde se pueda alcanzar una deflexión máxima bajo el centro de la placa de carga de 300 a 600µm. Se realizarán 12 impactos de 65 kN descartándose los dos primeros. La desviación típica de los valores de carga medidos debe ser menor al 2% del valor medio de las 10 lecturas.

4.2.2 La calibración relativa de los sensores se debe llevar a cabo dos veces al año como mínimo. Para ello se apilan verticalmente los sensores sobre el punto de medida y se efectúa un impacto, de forma que todos ellos registren la misma deflexión del firme. Las posiciones de los sensores dentro de la pila se rotan hasta que cada sensor haya ocupado todas las posiciones, efectuándose un impacto para cada configuración de sensores. Para este ensayo la deflexión debe estar comprendida entre 300 y 600µm. La diferencia entre los valores mayor y menor de lectura de los sensores apilados debe ser inferior al 1% de la lectura + 2µm.

4.2.3 La calibración absoluta de los sensores de medida de las deflexiones y de la célula de carga debe efectuarse anualmente. Después de cualquier servicio que pueda afectar a la calibración del equipo se debe proceder al control de referencia expuesto.

4.3 La temperatura de las capas del firme se registrará por medio de termómetros con las siguientes características: Resolución: 0,5°C, o mejor. Precisión: ±1°C, dentro del rango -10 a +60°C.

4.4 Para localizar la posición de los puntos en los que se ha auscultado con el deflectómetro de impacto, se debe medir la distancia desde comienzo del tramo. En la medida de distancias se deben cumplir las siguientes especificaciones: Resolución: 1,0 m ó menos. Precisión: ± 0,5% de la distancia medida ó ± 1 m (lo que sea mejor).

5 PROCEDIMIENTO

5.1 Antes de efectuar las medidas con el deflectómetro de impacto se precisa conocer los siguientes datos:

- a) Localización y longitud del tramo de carretera.
- b) Descripción del tipo de vía.

- c) Anchura de los carriles y número de carriles por sentido de circulación.
- d) Características y espesores de las capas del firme para estimar su rigidez (para la ubicación de los sensores) y para la medida de la temperatura.
- e) Presencia de bordillos y arcenes.

5.2 Temperatura del firme. El rango de la temperatura indicado para la auscultación con el deflectómetro de impacto es de 0°C a 30°C, midiéndose la temperatura de la mezcla bituminosa a una profundidad ≥ 40 mm. Para ello se procede a taladrar el pavimento, haciendo un orificio de 4 a 5 cm de profundidad con diámetro suficiente para la introducción del bulbo del termómetro.

5.2.1 Las perforaciones realizadas para la medida de temperaturas deben estar situadas a una distancia del borde del firme mayor o igual a 0,3 m, y la perforación debe hacerse un cierto tiempo antes del comienzo de las medidas, para permitir la disipación de la energía calorífica ocasionada.

5.2.2 Las perforaciones tienen que hacerse en el carril de ensayo o en puntos del firme con la misma estructura y con las mismas características superficiales (color) que el carril de ensayo.

5.2.3 Unas gotas de glicerol u otro líquido adecuado en el fondo de la perforación asegurará un buen contacto térmico entre el termómetro y el material tratado con ligantes o conglomerantes.

5.2.4 La temperatura debe medirse al menos:

- a) al comenzar la auscultación en un tramo.
- b) al finalizar la auscultación en un tramo.
- c) cada 4 horas como máximo.
- d) cuando cambien las condiciones del entorno. Por ejemplo: cambio de temperatura, cambio de la insolación, etc.

5.3 Número de puntos de ensayo por tramo de firme. Normalmente se requiere un mínimo de 12 puntos de ensayo por tramo homogéneo. Un tramo homogéneo de carretera es el que tiene la misma estructura de firme en toda su longitud, así como una capacidad de soporte uniforme. La situación de los ensayos y el número de ensayos se agrupan en tres categorías, y dependen del campo de aplicación seleccionado.

5.3.1 Categoría A. Campo de aplicación tipo I.

Es apropiada para un reconocimiento general de las condiciones del firme con limitación de los ensayos. El ensayo se realizará sobre la rodada exterior en intervalos de distancia no superiores a 150 m para firmes con pavimento de mezcla bituminosa.

Los pavimentos de hormigón con juntas se ensayan en el centro de la losa y en la rodada exterior en borde de juntas o grietas, con la carga en la losa posterior en el sentido del flujo del tráfico. El ensayo se realizará en intervalos de distancia no superiores a 150 m.

5.3.2 Categoría B. Campos de aplicación tipos II y III.

Esta categoría es apropiada para un análisis más detallado del firme, para propósitos como el dimensionamiento de refuerzos o el control de calidad en capas granulares. Las medidas han de ser suficientes para poder dividir la carretera en estudio en los tramos homogéneos precisos. El ensayo se llevará a cabo en la rodada exterior, en intervalos de distancia no superiores a 25 m para firmes con pavimento de mezcla bituminosa.

Los pavimentos de hormigón se ensayarán en intervalos de distancia no superior a 25 m, registrando la deflexión bajo impacto en el centro de la losa. Se registrarán también las deflexiones a ambos lados de la junta posterior de losa, con objeto de evaluar la transferencia de carga. Si existen indicios de la posible existencia de huecos bajo las losas se realizará el estudio correspondiente.

5.3.3 Categoría C. Campo de aplicación tipo IV

Es apropiado en análisis detallado del firme, para fines como la localización de fallos concretos, la evaluación de la transferencia de carga o la detección de huecos bajo las losas de pavimentos de hormigón. El ensayo se realizará sobre la rodada exterior en intervalos no superiores a 10 m dentro del tramo a analizar en detalle para la localización de fallos, y en cada fisura o junta del tramo considerado para analizar la transferencia de carga o la detección de huecos.

5.4 Carril para la medida de deflexiones. Se elegirá en función del tipo de vía en la que se vaya a realizar el ensayo:

5.4.1 En carreteras de dos carriles y doble sentido de circulación la medida de deflexiones puede efectuarse en un único carril, y por lo tanto en un único sentido, o bien en ambos sentidos situando los puntos de medida a tresbolillo.

5.4.2 Cuando existan diferencias importantes en la composición del tráfico en uno y otro sentido habrá que efectuar medidas en ambos carriles.

5.4.3 En el caso de vías con varios carriles, se deben efectuar medidas al menos en el carril más cargado (carril lento). En los demás carriles sólo se llevarán a cabo medidas en casos especiales, cuando se requiera información adicional.

5.5 Nivel de carga. Cuando se miden deflexiones sobre capas de mezcla bituminosa o materiales tratados con cemento, la carga máxima que se aplica debe ser de 65 kN. Pueden utilizarse cargas mayores sobre estructuras de elevada rigidez, resultando especialmente recomendable en firmes con pavimento de hormigón. No se superarán los 150 kN. Cuando se utilicen cargas distintas a 65 kN se normalizarán los valores de deflexión para este nivel de carga.

Si el ensayo se realiza directamente sobre capas granulares, la carga debe producir una presión de contacto próxima a 150 kPa, con el fin de aproximarse a los niveles tensionales a los que estarán sometidos las capas granulares en el firme en servicio. Es recomendable utilizar una placa de carga de mayor diámetro (generalmente 0,45 m).

Cuando las deflexiones medidas por los sensores más alejados del centro de la carga son pequeñas, por ejemplo $< 20 \mu\text{m}$, la importancia de la falta de precisión en la medida de las deflexiones es mayor. En este caso se puede actuar del siguiente modo:

- Aumentar la cuantía de carga en intervalos de 10 kN para alcanzar una medida mínima de la deflexión exterior superior a $20 \mu\text{m}$.
- Si se sabe que la explanada es muy rígida se pueden admitir valores de deflexión inferiores a $20 \mu\text{m}$, aunque sean menos precisos.
- En cualquier caso, sólo se debe emplear un valor de la carga por tramo de carretera auscultado.

5.6 Medida en el punto de ensayo. Se lleva el equipo al lugar del ensayo y se coloca la placa de carga sobre el punto deseado. El punto de ensayo deberá estar lo más limpio posible de material suelto para asegurar que la placa de carga se apoya apropiadamente sobre el terreno. Las superficies de gravas o tierra deberán presentar una superficie compacta y homogénea. Si hay agua en superficie no debe cubrir por completo la macrotextura superficial en la zona bajo la placa de carga.

5.6.1 Se baja la placa de carga y los sensores hasta asegurarse que descansan sobre una superficie firme y estable. Se coloca la masa a la altura deseada y se deja caer. Se registran los máximos de la carga y la deflexión.

5.6.2 Se realizará un primer impacto de bajo nivel de carga para asentar la placa y posteriormente un mínimo de 3 ciclos de carga. Las medidas correspondientes al primer ciclo de carga no se incluyen en el estudio. Se determina la relación carga-deflexión de las dos últimas secuencias usando la deflexión bajo el centro de la carga. Si la diferencia en la relación carga-deflexión de ambas secuencias es mayor del 5 %, se hacen ensayos adicionales hasta que esta diferencia baje del 5 %.

5.6.3 En el análisis de pavimentos de hormigón hay que tener en cuenta las variaciones diarias de las condiciones de apoyo debidas al combado producido por el gradiente térmico en el hormigón. Las deflexiones deben calibrarse sobre la base de las medidas registradas en puntos concretos (preferiblemente en borde de losa) a distintas horas del día.

6 RESULTADOS

6.1 Expresión de los resultados. Se deben registrar los siguientes datos para cada punto de ensayo:

- Número correlativo de identificación del punto de ensayo.
- Carril y posición transversal dentro del carril.
- Número del impacto dentro de cada secuencia de impacto.
- Hora (expresada en horas y minutos).
- Temperatura de la superficie y del firme.
- Valor máximo de carga aplicada y deflexiones (Nota)

Nota. Se recomienda registrar todo el ciclo temporal de carga y de las deflexiones en un punto de ensayo por tramo homogéneo.

6.2 Cuenco de deflexiones. El cuenco de deflexiones medido en el ensayo define la forma de la superficie del firme deformado. Viene definido por el conjunto de valores correspondientes al último impacto, o bien por el valor medio de los impactos en un punto de ensayo y para cada sensor. No se tiene en cuenta el primer impacto.

6.3 Si se desea comparar resultados de ensayos realizados con distintas condiciones de temperatura, o efectuar una estimación directa de la capacidad de soporte del firme a partir de las deflexiones, éstas se normalizarán para una temperatura

de 20°C. El factor de corrección por temperatura depende, entre otros, del tipo de sección y del estado de deterioro de la misma. En ausencia de curvas de corrección específicas podrán utilizarse las curvas de la figura 3. A estos efectos se considerarán secciones flexibles aquellas secciones con espesores de mezcla bituminosa iguales o superiores a 18 cm, con independencia de la naturaleza de la base.

6.4 Si para llevar a cabo el cálculo inverso de los módulos de rigidez de las capas de firme se van a utilizar programas o algoritmos basados en la teoría elástica multicapa, los cuencos de deflexión que sirven de base del ajuste deben presentar deflexiones decrecientes con la distancia al centro de aplicación de la carga. Si se desea normalizar los resultados del cálculo inverso a condiciones tipo de temperatura (20°C) la corrección por temperatura se introducirá en los módulos de los materiales.

6.5 Módulo de superficie. Se recomienda representar gráficamente la variación del "módulo de superficie", con el fin de obtener una impresión de la rigidez de las distintas capas del firme.

El módulo de superficie a distancia r del punto de aplicación de la carga expresa la rigidez equivalente del conjunto de capas situadas por debajo de la profundidad equivalente $h_e=r$.

Por lo tanto, el módulo de superficie para $r=0$ representa la rigidez equivalente del conjunto del firme y la explanada; y el módulo de superficie para los sensores más alejados ($r>$ espesor equivalente total del firme) expresa directamente el módulo de rigidez de la explanada.

El módulo de superficie para $r = 0$ mm se calcula mediante la expresión:

$$E_0 = 2(1 - \nu^2)\sigma_0 a / \delta_0$$

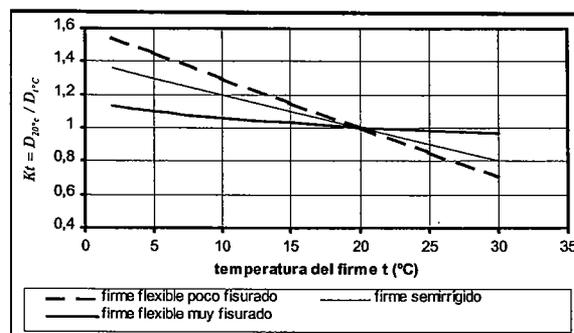


FIGURA 3. Corrección de las deflexiones por la temperatura.

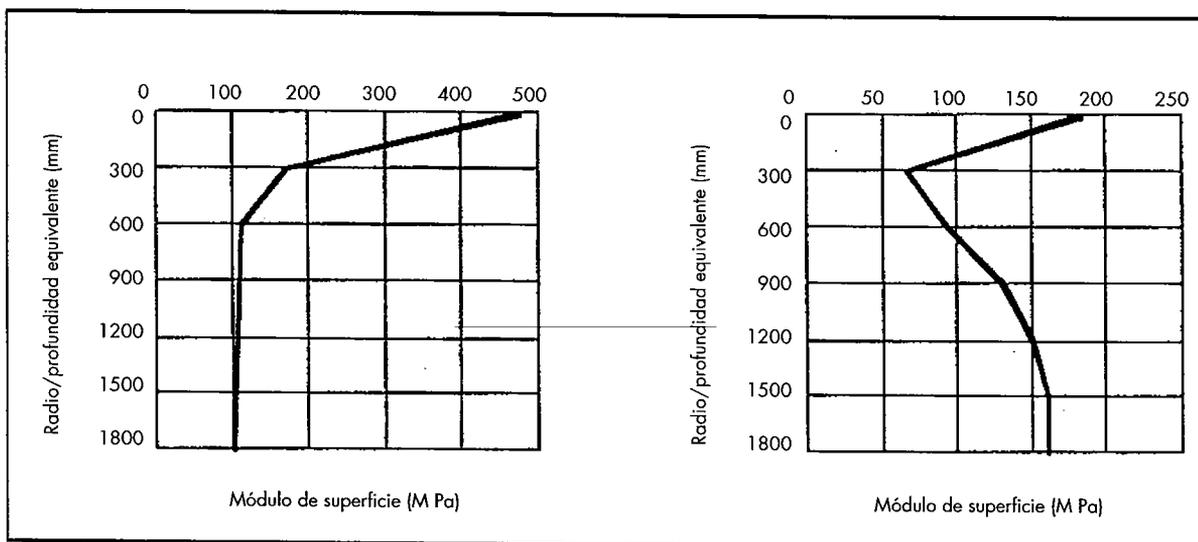


FIGURA 4. Ejemplos de representación gráfica del módulo de superficie.

El módulo de superficie a distancia r ($>2a$) se calcula mediante:

$$E_0(r) = (1 - \nu^2) \sigma_0 a^2 / (r \delta_r)$$

donde:

$E_0(r)$ = módulo de superficie a la distancia r (MPa)

ν = coeficiente de Poisson

σ_0 = presión de contacto bajo la placa de carga (kPa)

a = radio de la placa de carga (mm)

r = distancia del sensor al centro de la carga (mm)

δ_r = deflexión a la distancia r (μm)

La profundidad equivalente ($h_{e,n}$) de la capa n de firme se calcula mediante la siguiente expresión.

$$h_{e,n} = \left[\left(\dots \left(\left(h_1 \cdot \sqrt[3]{E_1 / E_2} + h_2 \right) \cdot \sqrt[3]{E_2 / E_3} + h_3 \right) \dots + h_{n-1} \right) \cdot \sqrt[3]{E_{n-1} / E_n} \right]$$

Donde

E_i = módulo de rigidez de la capa i

h_i = espesor de la capa i

La figura 4 muestra dos ejemplos de la representación gráfica del módulo de superficie. El primer

gráfico muestra una estructura de firme formada por capas de rigidez decreciente con la profundidad, asentado sobre una explanada de módulo de rigidez = 100 MPa. El segundo gráfico representa un firme con una capa de baja rigidez (inferior a 70 MPa) situada a una profundidad equivalente de 300 mm, asentado sobre una explanada de módulo de rigidez algo superior a 150 MPa.

7 CORRESPONDENCIA CON OTRAS NORMAS

- ASTM D4694-96. "Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device".
- ASTM D4695-96. "Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements".
- AASHTO T 256-77. "Standard Method of Test for Pavement Deflection Measurements".

8 BIBLIOGRAFÍA

- "Armonización del Uso del Deflectómetro de Impacto en Firmes. Parte 1. Firmes Flexibles". FEHRL. Manuales y Recomendaciones CEDEX. Ministerio de Fomento 1997.
- Borrador del "Informe Final de la Acción COST 336: Falling Weight Deflectometer". Comisión Europea.