

MEDIDA DE DEFLEXIONES EN FIRMES Y PAVIMENTOS CON DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO

1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

1.1 Esta norma describe el procedimiento de ensayo que se debe seguir para la determinación de la deflexión y el radio de curvatura del cuenco de deflexiones en un firme o pavimento utilizando el equipo de medida denominado Deflectómetro de Impacto, así como los dispositivos de medida necesarios y la expresión de resultados.

1.2 El ensayo permite determinar la deflexión vertical puntual d_c y el radio de curvatura del cuenco de deflexiones R_c de una superficie, inducidos por una fuerza de impacto generada por una masa que cae sobre un sistema de muelles y es transmitida a la superficie de medición por medio de una placa, equivalente a una carga de 63,77 kN (6,5 t), utilizando para ello varios sensores alineados con la placa. Con objeto de que la medida sea razonablemente representativa de la capacidad estructural del firme o pavimento auscultado, la medición debe efectuarse en intervalos iguales o inferiores a 20 m. Excepcionalmente se pueden variar dicha carga e intervalo de medición en los casos especificados en otros epígrafes de esta norma.

1.3 Se define como deflexión la deformación vertical y puntual de una superficie bajo la acción de una carga. La deflexión así definida se denomina deflexión total (dt). En los materiales viscoelásticos, cuando la sollicitación aplicada deja de actuar, la recuperación del firme no es total, quedando este material con una deflexión residual o deflexión remanente (dr). La diferencia entre las deflexiones total y remanente se denomina deflexión elástica recuperada (de) y es el valor que se utiliza para el cálculo del refuerzo de un firme y equivale a la d_c citada:

$$d_c = de = dt - dr$$

1.4 Los valores de la deflexión y el radio de curvatura del cuenco de deflexiones obtenidos con este ensayo, proporcionan una indicación sobre la capacidad estructural y la rigidez global del firme o pavimento. Este ensayo también puede utilizarse para evaluar la transmisión de cargas a través de las juntas en pavimentos de hormigón, o detectar la existencia de huecos bajo losas rígidas.

1.5 El equipo de medida se puede emplear en cualquier tipo de carretera, sin existir restricciones geométricas de trazado longitudinal o transversal para su utilización. Sin embargo, el hecho de que deba permanecer estático durante la realización del ensayo hace que sea necesario adoptar precauciones especiales en carreteras de alta intensidad de tráfico, para garantizar en todo momento la fluidez del tráfico y la seguridad de la circulación vial.

1.6 Su utilización se debe limitar a un rango de temperatura del firme o pavimento entre 5 y 30 °C, o 40 °C cuando tenga un espesor de mezclas bituminosas inferior a 10 cm o esté muy fisurado. Las medidas de deflexión se deben realizar en la época de máxima humedad de la explanada. En caso contrario éstas se tienen que corregir en base a estudios específicos. En todo caso, hay que prescindir de medidas tomadas con la explanada helada o en época climática muy seca.

1.7 En esta norma se contempla el empleo del ensayo sobre cualquiera de las capas del firme, con carga y presión fijas, para una longitud de la deformada que, en general, será $\leq 1,5$ m. Para el estudio de la evaluación del apoyo de las losas en los pavimentos de hormigón se deben aplicar, como mínimo, las tres cargas siguientes: 68,67 kN (7 t); 98,10 kN (10 t) y 127,53 kN (13 t).

1.8 El empleo de los datos obtenidos con este ensayo se enmarca en los siguientes campos de aplicación:

1.8.1 En sistemas de gestión de rehabilitación de carreteras (Tipo I).- Evaluación general de las condiciones estructurales del firme o pavimento para el análisis de la red o tramo de carretera.

1.8.2 En proyectos específicos de rehabilitación de carreteras (Tipo II).- Análisis del firme o pavimento para el cálculo técnico de su posible rehabilitación.

1.8.3 En control de calidad de la construcción de un tramo de carretera (Tipo III).- Determinación de la capacidad de soporte de las capas construidas (explanaciones y firmes) y evaluación de la capacidad de refuerzo (firmes).

1.8.4 En patología y análisis de deterioros (Tipo IV).- Análisis de detalle para fines como la detección de fallos concretos, o la evaluación de la transferencia de carga en juntas de pavimentos de hormigón.

1.9 Para las aplicaciones de tipo I, II y III, la deflexión a considerar será la equivalente a la deflexión patrón normalizada, según especifica la norma 6.3-IC Rehabilitación de firmes o normativa que la sustituya.

2 APARATOS Y MATERIAL NECESARIOS

2.1 Mecanismo de generación del impacto. La masa del mecanismo se puede colocar a varias alturas predeterminadas y desde éstas se deja caer libremente (véase figura 1). La fuerza resultante del impacto sobre la superficie de medición debe ser repetible según los requerimientos referidos en el apartado 5. El tiempo transcurrido desde el principio del impulso de carga hasta que alcanza su valor máximo debe estar comprendido entre 5 y 30 milisegundos. La duración total del impulso de carga debe estar comprendida entre 20 y 60 milisegundos.

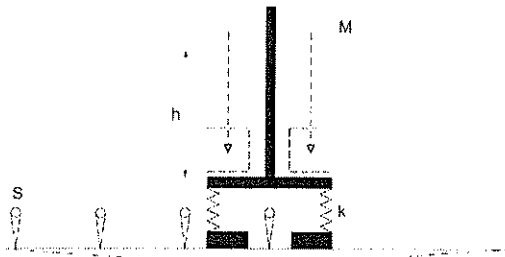


Figura 1. Esquema del equipo deflectómetro de impacto (M=carga; h=altura de caída; k= placa de carga; s=sensores)

2.2 Sistema de guía del mecanismo de generación del impacto. El sistema de guía está diseñado para funcionar con coeficientes de resistencia despreciables y para que la masa caiga perpendicularmente sobre la superficie de medición.

2.3 Placa de carga. El impulso de carga se transmite a la superficie del pavimento por medio de una placa de carga de 300 mm de diámetro que lleva incorporado un disco de goma, interpuesto entre ésta y la superficie de ensayo, de un espesor mínimo de 5 mm. Este disco de goma o bien está acanalado o dispone de algún otro sistema para asegurar su deformación

2.3.1 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 superficies deformadas o heterogéneas.

2.3.2 La placa permite la instalación de un sensor para la medida de la deflexión en el centro de aplicación de la carga.

2.4 Sensores. Miden la velocidad de vibración del firme o pavimento como respuesta a la carga aplicada y están instalados de forma que minimizan la rotación angular con respecto al plano de medida en el máximo movimiento esperado. Los sensores se sitúan a distancias entre 0 y 1500 mm del centro de la carga, pudiéndose llegar a los 2500 mm si fuera necesario.

2.4.1 La distancia entre sensores se determina en función del número de capas del firme y de los espesores de las mismas, si bien, con carácter general siempre debe haber sensores situados a las siguientes distancias respecto del centro de la placa de carga: 0 - 300 - 600 y 900 mm. En la medición de la transferencia de carga en las juntas de pavimentos de hormigón se sitúa un sensor en la losa anterior tal y como se recoge en la figura 2. El esquema de la disposición general de los sensores, para la realización del ensayo en cualquier tipo de firme o pavimento, se muestra en la figura 3.

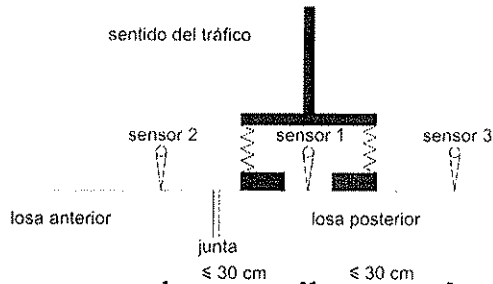
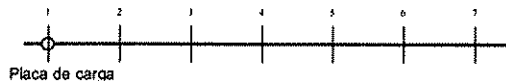


FIGURA 2. Esquema de medición de la transferencia de carga en la juntas de los pavimentos de hormigón



3.1 En firmes y pavimentos bituminosos.



3.2 En juntas de pavimentos de hormigón.

FIGURA 3. Esquemas de situación (en planta) de los sensores durante la medición

2.4.2 Los sensores pueden ser de varios tipos (en general: sismómetros, velocímetros o acelerómetros) y tienen las siguientes características expresadas en unidades de longitud:

- Resolución de la lectura: $\leq 0,1 \mu\text{m}$.
- Precisión: error sistemático de 2 % de la lectura + $1 \mu\text{m}$ o menor.
- Repetibilidad: error aleatorio de $2 \mu\text{m} + 1 \%$ de la lectura o menor.

2.4.3 En todo caso, se emplean sensores que permiten medir vibraciones equivalentes a las deflexiones calculadas a partir de ellas de más de 2 mm.

2.5 Célula de carga. Mide la carga aplicada en cada impacto, y se coloca en una posición donde se minimizan los efectos inerciales. Es resistente al agua, y a las reacciones del terreno y tiene las siguientes características:

- Resolución de la lectura: $\leq 0,1$ kN.
- Precisión: error sistemático \leq máx (0,5 % del rango total de la escala de lectura, 2% de la lectura).
- Repetibilidad: error aleatorio $\leq 0,1$ % del rango total de la escala de lectura.

2.6 Sistema para la medida de la temperatura ambiente y del pavimento. El equipo cuenta con un sistema capaz de medir y registrar en el mismo instante de la medición en cada punto de ensayo las temperaturas ambiente y de la superficie del firme o pavimento con una precisión de, al menos, 1 °C. Para esta última se utilizan termómetros sin contacto, los basados en la termografía de infrarrojos u otros que permitan realizar la medida con la precisión establecida.

2.7 Sistema de señalización del equipo. El equipo debe circular en todo momento cumpliendo las normas vigentes en materia de circulación y seguridad vial. Se deben adoptar todas las medidas necesarias para garantizar el cumplimiento de la normativa vigente en prevención de riesgos laborales y la seguridad de la circulación de los restantes usuarios de la carretera. La señalización que se disponga debe adecuarse a la normativa vigente al respecto de ámbitos: nacional, comunitario e internacional.

2.8 Procesador de datos y sistema de almacenamiento. El equipo consta de un sistema de almacenamiento informático para registrar las cargas aplicadas, las deflexiones calculadas, las temperaturas del aire y de la superficie del firme o pavimento, y la posición y los datos de identificación de los puntos de ensayo.

3 APARATOS Y MATERIAL OPCIONALES

3.1 Sistema para el posicionamiento del equipo. Es conveniente que el equipo lleve instalado un sistema de posicionamiento GPS o similar, con el fin de poder registrar, en el momento de la medición, las coordenadas UTM de cada medida realizada. Estas coordenadas permiten georreferenciar dichas medidas en un GIS diseñado a tal efecto.

3.2 Sistema de adquisición de imágenes. También es aconsejable que el equipo cuente con un dispositivo que permita capturar y almacenar imágenes de la carretera en cada punto ensayado, con el fin de discriminar el aspecto de la capa de rodadura para cada deflexión calculada y visualizar el punto kilométrico asociado a la misma.

4 PRINCIPIO DE MEDIDA

4.1 La placa de carga y los sensores del equipo bajan hasta apoyarse alineadamente sobre la superficie de medición (véase figura 4). La masa se eleva hasta la altura desde la cual al caer da la carga especificada que, por lo general, será de 63,77 kN (6,5 t). Los sensores registran una señal $S(t)$ generada por el desplazamiento vertical del firme al impactar la placa de carga sobre él. A partir de los registros de los sensores se calcula, si son geófonos, su aceleración vertical $\gamma(t)$, en m/s^2 , obtenida a partir de la siguiente expresión:

$$\gamma(t) = a \cdot \frac{dS(t)}{dt} + b \cdot S(t) + c \cdot \int S(t) \cdot dt \quad \dots(1)$$

siendo: a, b y c constantes expresadas en $m \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$, $m \cdot V^{-1} \cdot s^{-2}$ y $m \cdot V^{-1} \cdot s^{-3}$, respectivamente, y t el tiempo expresado en s.

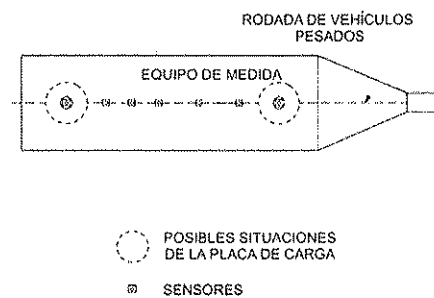


FIGURA 4. Esquema (en planta) de la placa de carga y los sensores.

4.2 Por doble integración de la aceleración vertical así calculada se obtiene dc.

4.3 Para cada impacto realizado se miden las vibraciones máximas a partir de las que se calculan las deflexiones en cada localización de los sensores, obteniéndose el cuenco de deflexiones y su radio de curvatura. La dc en cada punto ensayado es la calculada con la máxima vibración registrada por el sensor ubicado en la placa de carga.

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

5 PREPARACIÓN DEL ENSAYO

5.1 La ejecución de la medida requiere la realización de las siguientes operaciones previas:

- Calibración de los termómetros.
- Ajuste de la altura desde la que cae la masa para obtener una carga aplicada de 63,77 kN (6,5 t).
- Calibración de los sensores.

5.2 Calibración de los sensores.

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

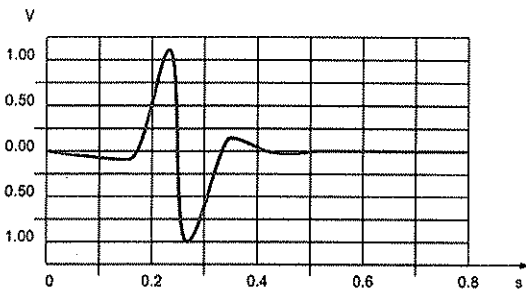
bración de los sensores debe efectuarse, al menos, una vez al año, así como después de cualquier servicio que pueda afectar a la calibración del equipo.

5.2.2 Si los sensores son geófonos, su calibración se realiza mediante la determinación de los coeficientes de ponderación a, b y c de la ecuación (1) para cada geófono, con la ayuda de un banco de calibración. Para ello, se coloca el geófono sobre un sistema con control del desplazamiento y se simula una deflexión sobre el sistema al mismo tiempo que se mide el desplazamiento real $D(t)$ del geófono, en 10^{-2} mm, y la señal $S(t)$ registrada. Se calculan los siguientes parámetros (véase figura 5):

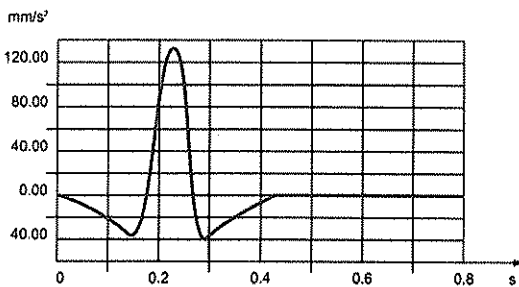
$$\frac{d^2}{dt^2}D(t) \quad \frac{d}{dt}S(t) \quad \text{y} \quad \int S(t) dt$$

Utilizando el método de los mínimos cuadrados, se ajustan los coeficientes de ponderación a, b y c para que la aceleración $\gamma(t)$ calculada por medio de la ecuación (1), sea lo más aproximada posible a la aceleración real (véase figura 6.2), dada por la expresión:

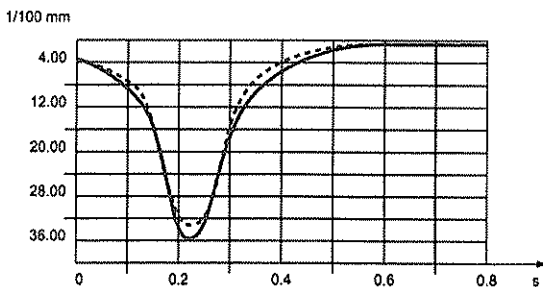
$$\frac{d^2}{dt^2}D(t)$$



5.1 Señal $S(t)$ producida por el geófono.



5.2 Aceleración real ($d^2D(t)/dt^2$) y aceleración calculada $\gamma(t)$ (se hacen coincidir).



5.3 Deflexión real $D(t)$ (trazo continuo) y deflexión calculada $dc(t)$ (trazo discontinuo).

FIGURA 5. Calibración de un geófono

5.3 Repetibilidad del equipo. La repetibilidad del equipo se comprueba, al menos, tras un mes de medición. Para ello, se realizan 12 impactos de 63,77 kN (6,5 t) en un mismo punto, descartándose los resultados de los dos primeros. Para cada sensor, 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 al mayor valor entre estos dos: $2 \mu\text{m}$ o el 1,25% del valor medio de las 10 lecturas + $1,5 \mu\text{m}$.

5.4 Repetibilidad de la carga. Se comprueba, al menos, cada 10.000 caídas y, en todo caso, cada 6 meses de medición. Esta comprobación se lleva a cabo sobre un firme sin defectos de regularidad ni grietas, donde se pueda alcanzar una deflexión máxima bajo el centro de la placa de carga de $300 \mu\text{m}$ a $600 \mu\text{m}$. Se realizan 12 impactos de 63,77 kN (6,5 t), descartándose los dos primeros. La desviación típica de los valores de carga medidos debe ser menor del 2 % del valor medio de las 10 lecturas.

6 PROCEDIMIENTO DE MEDIDA

6.1 Placa de carga, masa y sensores. Para iniciar la medida de las deflexiones se coloca la placa de carga sobre el punto de ensayo que debe estar lo más limpio posible de material suelto con objeto de asegurar su correcto apoyo sobre la superficie de medición. Si hay agua en la superficie ésta no debe cubrir por completo la macrotextura superficial bajo la placa de carga.

6.1.1 Se apoyan los sensores sobre el firme o pavimento asegurándose de 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 calculada.

6.1.2 Se pueden realizar varios impactos antes de mover el equipo hacia otra localización.

6.1.3 En el análisis de los resultados del ensayo realizado sobre pavimentos de hormigón hay que tener en cuenta las variaciones diarias de las condiciones de apoyo debidas a la curvatura producida por el gradiente térmico en el hormigón.

6.2 Nivel de carga. Cuando se utilicen cargas distintas a 63,77 kN (6,5 t), especialmente en estudios de patología y análisis de deterioros (Tipo IV del epígrafe 1.8 de esta Norma), donde se empleen una masa o altura de caída diferentes a las que producen dicha carga, se deben normalizar los valores de deflexión para este nivel de carga. Cuando las deflexiones calculadas a partir de las vibraciones 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:

- 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, en general, 63,77 kN (6,5 t).

6.3 Clasificación de los ensayos. Los ensayos se clasifican en tres categorías atendiendo al campo de aplicación seleccionado:

6.3.1 Categoría A. Campo de aplicación tipo I. Es apropiada para un reconocimiento general de las condiciones del firme o pavimento. El ensayo se lleva a cabo sobre la rodada exterior en intervalos de distancia no superiores a 50 m para firmes con pavimento bituminoso, aunque siempre será mucho más representativa la evaluación a intervalos iguales o inferiores a 20 m. Los pavimentos de hormigón con juntas se ensayan en el centro de la losa y en la rodada exterior a ambos lados de las juntas, en el sentido del flujo del tráfico.

6.3.2 Categoría B. Campos de aplicación tipos II y III. Es apropiada para un análisis más detallado del firme o pavimento, para propósitos como el dimensionamiento de refuerzos o el control de calidad del firme o pavimento ejecutado. Las medidas han de ser suficientes para poder dividir la carretera en estudio en los tramos homogéneos precisos. El ensayo se realiza sobre la rodada exterior, en intervalos de distancia no superiores a 20 m. En pavimentos de hormigón se registra la deflexión bajo impacto en el centro de la losa en una de cada cuatro losas si el pavimento tiene juntas, y a ambos lados de éstas, con objeto de evaluar la transferencia de carga. Si hay indicios de la posible existencia de huecos bajo las losas se realiza el estudio específico correspondiente.

6.3.3 Categoría C. Campo de aplicación tipo IV. Es apropiado para el análisis detallado del firme o pavimento 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 realiza 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 el centro de la losa y en cada junta del tramo considerado para analizar la transferencia de carga o la detección de huecos en los pavimentos de hormigón con juntas.

6.4 Carril para la medida de deflexiones. Se elige en función del tipo de carretera en la que se realiza el ensayo y de su campo de aplicación:

6.3.1 En carreteras de dos carriles y doble sentido de circulación la medida de deflexiones puede efectuarse en un único carril para los Tipos I y III, por lo tanto, en un único sentido, o bien, en ambos sentidos para el Tipo II.

6.3.2 Cuando hay diferencias importantes en la composición del tráfico de ambos sentidos es conveniente efectuar medidas en ambos carriles para las aplicaciones I y III.

6.3.3 En el caso de carreteras con varios carriles, se efectúan medidas al menos en el carril más cargado (carril lento). En los demás carriles sólo se realizan ensayos en casos especiales y cuando se requiera información adicional.

6.5 Cuenco de deflexiones

6.5.1 El cuenco de deflexiones es el gráfico resultante de la representación sobre el eje de abscisas de las distancias de los sensores al centro de la placa de carga y en ordenadas las deflexiones obtenidas en cada uno de los sensores. Las deflexiones se representan como si fueran valores negativos con objeto de visualizar mejor la forma de la deformada o del cuenco de deflexiones.

6.5.2 Un dato que suele utilizarse para conocer la flexibilidad general del firme, es el área del cuenco de deflexiones. Para obtener dicha área de forma suficientemente aproximada se puede emplear el método de los trapecios en los que se descompone esta. Con el objeto de que los resultados de dicha aproximación sean comparables entre sí, la extensión del cálculo aproximado del área se limita a la encerrada entre el punto de aplicación de la carga y el situado a 1,5 m de dicho punto. El valor del área del cuenco así calculado, viene dado por la expresión:

$$Área_{\text{cuenco}} = \sum \frac{(d_i + d_{i+1}) \cdot s_{i,i+1}}{2}$$

siendo d_i y d_{i+1} , las deflexiones de los sensores i e $i+1$ respectivamente, y $s_{i,i+1}$ la distancia entre el sensor i y el $i+1$. El sumatorio comprende las deflexiones calculadas a través de los registros de los sensores desde el primero, situado en el punto de aplicación de la carga, hasta el situado a 1,5 m de distancia de éste.

6.6 Radio de curvatura del cuenco de deflexiones.

6.6.1 El radio de curvatura del cuenco de deflexiones se define como el de la circunferencia que pasa por los extremos de las deflexiones calculadas a través de los registros de los sensores 1 y 2, y cuyo centro se encuentra en el eje que pasa por la deflexión máxima (la del sensor 1), tal y como se muestra en la figura 6.

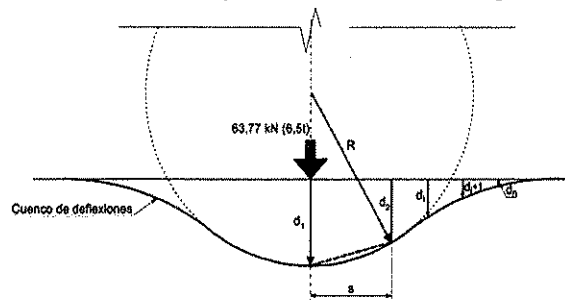


FIGURA 6. Radio de curvatura del cuenco de deflexiones

6.6.2 La expresión matemática del radio de curvatura (en m) así definido es la siguiente:

$$R = \frac{s^2}{2 \cdot (d_1 - d_2)}$$

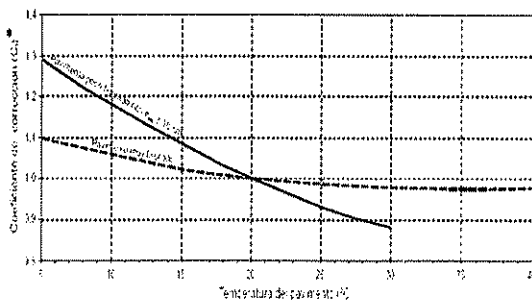
siendo d_1 y d_2 las deflexiones de los sensores 1 y 2 (en m), respectivamente, y s la distancia entre el sensor 1 y el 2 (en m).

7 EXPRESIÓN DE RESULTADOS

7.1 El informe del ensayo debe incluir para cada punto de medida, al menos, los siguientes valores:

- Identificación de la carretera, con su nomenclatura oficial.
- Carril ensayado.
- Valor de la carga utilizada en el ensayo (en kN), especialmente en estudios de patología y análisis de deterioros (Tipo IV del epígrafe 1.8 de esta Norma) donde se utilicen una masa o altura de caída diferentes a las que producen la carga normalizada de 63,77 kN (6,5 t).
- La temperatura ambiente y la de la superficie del pavimento, en °C.
- La deflexión máxima normalizada a una temperatura del firme o pavimento de 20 °C y correlacionada con la deflexión patrón, en 10^{-2} mm.
- El radio de curvatura, en m.
- Gráficos de variación de la deflexión máxima y del radio de curvatura con la distancia recorrida. También deben indicarse los valores del ensayo rechazados por causas imputables al mecanismo de registro.

7.2 La normalización de las deflexiones para una temperatura del firme o pavimento de 20 °C se realiza aplicando un coeficiente de corrección C_t que es función del espesor del pavimento de mezclas bituminosas y del nivel de fisuración superficial de la carretera. Su valor se obtiene como se especifica en el anejo 3 de la norma 6.3-IC Rehabilitación de firmes o normativa que la sustituya (véase figura 7).



* $C_t = 1$ en firmes flexibles con $e_{ue} < 10$ cm, o firmes totalmente fisurados

FIGURA 7. Coeficiente corrector por temperatura del pavimento

Nota 1. Se recuerda que para el cálculo de los espesores de refuerzo es preceptivo efectuar la corrección de las deflexiones por humedad de la explanada de acuerdo con el apartado 2.5 del anejo 3 de la norma 6.3-IC Rehabilitación de firmes o normativa que la sustituya.

7.3 El informe debe incluir, además de los datos anteriores, información sobre las condiciones del ensayo que pueda ayudar a la interpretación de los resultados:

- Hora y fecha del ensayo.
- Información e identificación del equipo.
- Condiciones climáticas específicas.
- Sentido de avance del vehículo.
- Número del impacto dentro de cada secuencia de impactos.
- La localización de la medida en la sección transversal respecto de la marca longitudinal de borde, en m.
- Sección del firme ensayado señalando, al menos, el tipo de firme: semirrígido, semiflexible o flexible.

Nota 2. Para la definición del tipo de firme se estará a lo dispuesto en la norma 6.3-IC Rehabilitación de firmes, o normativa que la sustituya.

8 CORRESPONDENCIA CON OTRAS NORMAS

ASTM D4694-96.

"Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device".

ASTM D4695-03.

"Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements".

AASHTO T 256-2001.

"Standard Method of Test for Pavement Deflection Measurements".