

Medida de las deflexiones de un firme mediante el ensayo con viga Benkelman

1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACION

1.1 Esta norma describe el procedimiento que debe seguirse, para la determinación estática de la deflexión elástica recuperada de un firme, utilizando la viga Benkelman.

1.2 El ensayo permite determinar la deflexión vertical y puntual de una superficie bajo la acción de una carga normalizada, transmitida por medio de las ruedas gemelas de un eje simple tipo.

1.3 Permite evaluar la línea de influencia de la deformada originada por la carga, midiendo las deflexiones para diferentes posiciones del punto de aplicación de la carga, con relación al punto de medida fijo en el que se quiere hacer la determinación de la línea de influencia.

1.4 Este ensayo puede utilizarse como escantillón para controlar las medidas de deflexión que, dado el caso, hayan de ejecutarse con aparatos basados en principios diferentes a la viga Benkelman.

1.5 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 (d_t). 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 (d_r). La diferencia entre las deflexiones total y remanente se denomina deflexión elástica recuperada (d_e):

$$d_t = d_e + d_r$$

siendo:

d_t = deflexión total

d_e = deflexión elástica recuperada

d_r = deflexión remanente

1.6 La deflexión elástica recuperada es el valor que se utiliza para el cálculo del refuerzo de un firme.

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 semilongitud de la deformada ≤ 4 m.

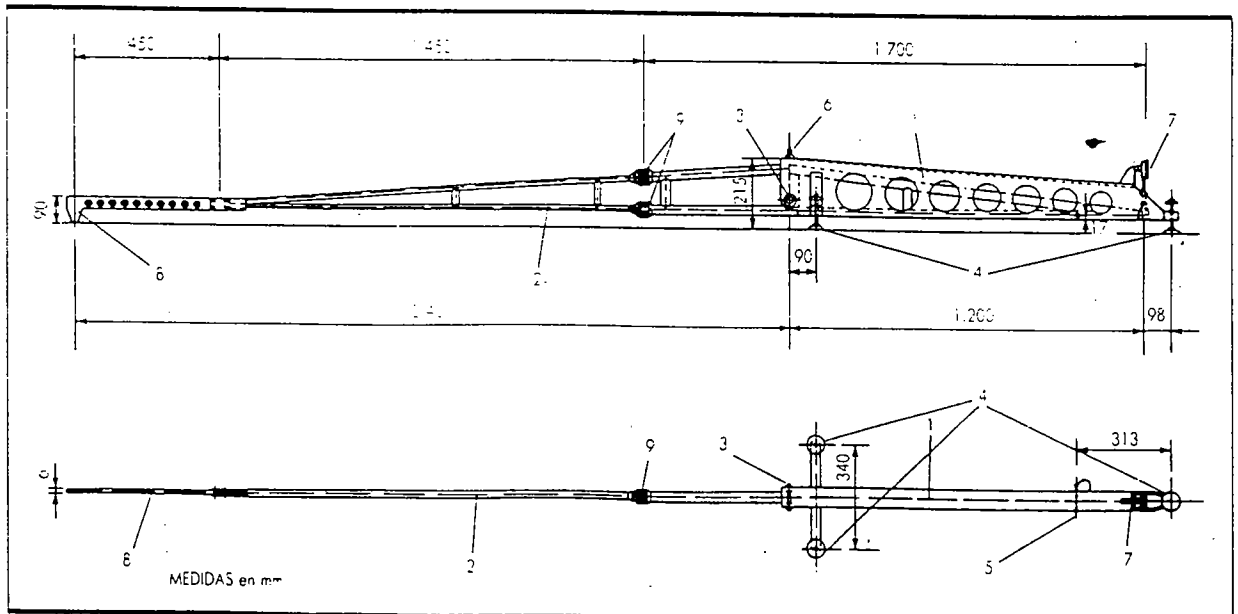


FIGURA 1. Viga Benkelman.

2 APARATOS Y MATERIAL NECESARIOS

2.1 Viga Benkelman. Es un deflectómetro mecánico simple. Una palanca, suspendida de un bastidor, transmite la deflexión vertical del punto de medida a un comparador. Las dimensiones son las que se indican en la figura 1 y comprende los siguientes elementos:

2.1.1 Bastidor. Viga (1) con tres pies (4) de apoyo sobre el suelo, que sirve de sustentación a la palanca de medida y de soporte al comparador.

2.1.2 Palanca de medida (2). De 3,60 m de longitud, que puede desmontarse en tres partes durante el transporte. Se suspende al bastidor por un eje (3) que la divide en dos partes en la relación 2/1.

2.1.3 Suspensión (3). Un eje, punto de apoyo de la palanca, suspendido en dos rodamientos a bolas, estancos al polvo y solidarios al bastidor.

2.1.4 Puntos de apoyo (4). Son tres pies solidarios al bastidor, con regulación de su altura mediante tornillo; los dos anteriores están situados simétricamente con respecto al eje longitudinal de la viga a 170 mm del mismo, y separados del posterior, situado en el extremo del bastidor, 1.208 mm.

2.1.5 Pasador (5). Sujeto al bastidor por una cadenera, sirve para bloquear la palanca, haciéndola fija al bastidor.

2.1.6 Nivel (6). Para nivelar transversalmente la viga y, por tanto, poner horizontal el eje de rotación de la palanca, por medio de los dos tornillos de los pies anteriores.

2.1.7 Comparador (7). Aparato con limbo dividido en 0,01 mm y con curso igual o superior a 10 mm. Se fija al bastidor por un soporte solidario de éste, de modo que su vástago prolongado apoya en el extremo de la palanca de medida. Este compa-

rador puede sustituirse por un captador electrónico con presentación de lectura digital.

2.1.8 Palpador (8). Pieza metálica de la forma y dimensiones indicadas en la figura, que reposa sobre el suelo en el punto de medida. Es una de las partes de la palanca de medida (2.1.2).

2.1.9 Nudos (9). Para unir los tres tramos en que puede dividirse la palanca de medida.

2.1.10 Herramientas para montaje y ajuste de la viga.

2.2 Vehículo de carga

2.2.1 Camión de dos ejes simples distanciados más de 4 m; uno de ellos con ruedas gemelas y 12 cm de separación entre huellas. Capacidad de carga total en el eje trasero 128 kN (13 t). Separación entre los balones de las ruedas gemelas a plena carga ≥ 5 cm.

2.2.2 Los neumáticos serán de la medida 12.00-20 y de unas características tales que, con presión de inflado de 0,7 a 0,9 MPa (7 a 9 kgf/cm²), den una superficie de contacto con el pavimento para cada par de ruedas gemelas de 1.050 ± 25 cm², ajustándose a la forma de la figura 2.

2.3 Otros elementos accesorios

2.3.1 Reloj. Reloj convencional con indicador de segundos.

2.3.2 Termómetro. Cualquier termómetro convencional o sistema de termopares con escala de -10 °C a 50 °C y precisión de 1 °C.

2.3.3 Manómetro. Dispondrá de una boquilla adecuada para medir la presión de inflado de los neumáticos con escala de 0 a 1 MPa (0 a 10 kgf/cm²) y precisión de 0,01 MPa (0,1 kgf/cm²).

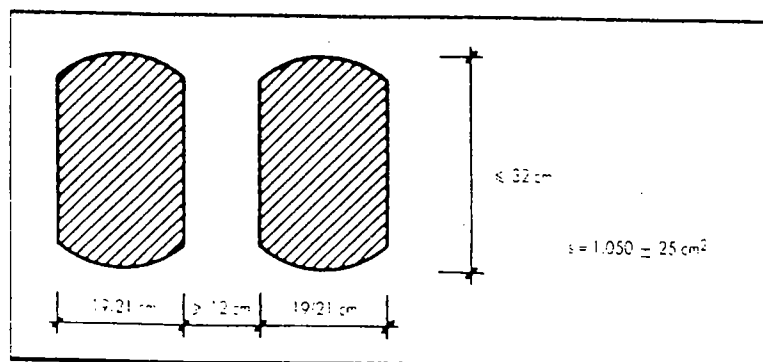


FIGURA 2.
Superficie de carga.

2.3.4 Cinta métrica. De 25 m de longitud. Puede sustituirse con ventaja por un cuentametros y una cinta métrica de bolsillo de 2 ó 3 m de longitud.

2.3.5 Puntero y martillo, o taladro, adecuados para practicar orificios en el pavimento hasta 5 cm de profundidad.

2.3.6 Elementos para proteger la viga de la insolación.

2.3.7 Cuña o calzo de parada, de chapa metálica o de madera.

2.4 Varios. Papel para impresión de huellas de los neumáticos con unas dimensiones mínimas de 50 × 70 cm. Tizas y pintura para marcar el pavimento. Impresos y elementos de escritura. Bote de 1 litro de capacidad con boquilla de diámetro inferior a 10 mm. Silbato u otro avisador acústico. Glicerina o material de similares inercia térmica y viscosidad.

3 PREPARACION DEL ENSAYO

3.1 El camión de las características especificadas en el apartado 2.2 se carga preferiblemente con lingotes metálicos o paralelepípedos de piedra u hormigón, y se pesa en báscula contrastada hasta tener una carga en el eje trasero de 128 ± 2 kN ($13 \pm 0,2$ t). Se comprueba la carga al comienzo del ensayo y, para series de ensayos, al comienzo y al final de la jornada de trabajo. Se pesa el eje trasero del vehículo y las ruedas gemelas, bajo las que se realizarán las medidas. La masa de estas últimas será de 64 ± 1 kN ($6,5 \pm 1$ t). Si los materiales utilizados para cargar el vehículo son susceptibles a las variaciones de humedad, se protegerán con una lona.

3.2 Se imprime sobre un papel la huella de las ruedas gemelas cargadas correctamente con la presión de inflado recomendada por el fabricante de los neumáticos para esa carga. Para ello se levantan las ruedas con un gato sobre una superficie lo más plana posible, se coloca el papel debajo y se descienden las ruedas reposando libremente toda la carga sobre el papel. Se comprueba si la huella obtenida se ajusta a los límites de la huella tipo de la figura 2. Caso que el área difiera de la indicada por defecto o exceso, se corrige la presión de inflado disminuyéndola o aumentándola, hasta que cumpla la condición anterior. Se anota la presión de inflado con la que se ha obtenido la huella correcta. Esta presión es la que debe mantenerse constante con oscilaciones máximas de $\pm 0,01$ MPa ($0,1$ kgf/cm²) durante todas las series de ensayos a realizar. Se comprueba la pre-

sión de inflado cada 2 horas, corrigiéndose cuando esté fuera del intervalo anterior.

3.3 Se monta la viga Benkelman, comenzando por la unión de los tres tramos de la palanca de medida. Luego se coloca el nivel y finalmente el comparador. Se comprueba el correcto funcionamiento de todo el conjunto.

4 PROCEDIMIENTOS OPERATIVOS

4.1 Operaciones previas

4.1.1 Se procede a taladrar el pavimento, haciendo un orificio de 2 a 5 cm de profundidad con diámetro suficiente para la introducción del bulbo del termómetro. Se llena dicho agujero con glicerina, o material de similares inercia térmica y viscosidad, y se introduce el bulbo del termómetro leyéndose la temperatura después del tiempo necesario para su estabilización.

4.1.2 Se mide y anota la temperatura ambiente cada hora o si cambian las condiciones ambientales. Se mide la temperatura del pavimento al comienzo del ensayo y cuando la temperatura del aire varíe en 2 °C o cambie la insolación en el pavimento.

4.1.3 Se coloca la viga Benkelman de modo que la punta del palpador quede situada sobre el punto de medida y la palanca alineada con una paralela al eje de la calzada o con la dirección elegida para el movimiento del vehículo de carga. Se protege la viga de la insolación directa. Se quita el bloqueo de la palanca y se ajusta el comparador, por medio del tornillo del pie del bastidor, de modo que el vástago del comparador quede a más de 4 mm de los finales de recorrido, asegurándose que mantenga contacto con el extremo de la palanca de medida (después de la realización del ensayo se debe bloquear nuevamente la palanca). Se nivela el eje de rotación de la palanca por medio del nivel de burbuja (6) y los tornillos de los dos pies anteriores del bastidor. Se pone el dial comparador a cero, mediante el giro de la esfera.

4.1.4 Se coloca la cuña, indicada en el apartado 2.3.7, a 45 cm del punto de medida, hacia el operador, y separada de la viga más de 5 cm.

4.2 Método de recuperación (Figura 3)

4.2.1 Una vez elegida la situación del punto a ensayar y realizados los procesos preparatorios indicados en el apartado 3, se sitúa el vehículo con el centro de la huella de las ruedas a 0,30 m del punto a ensayar, hacia el operador, de manera que el eje del

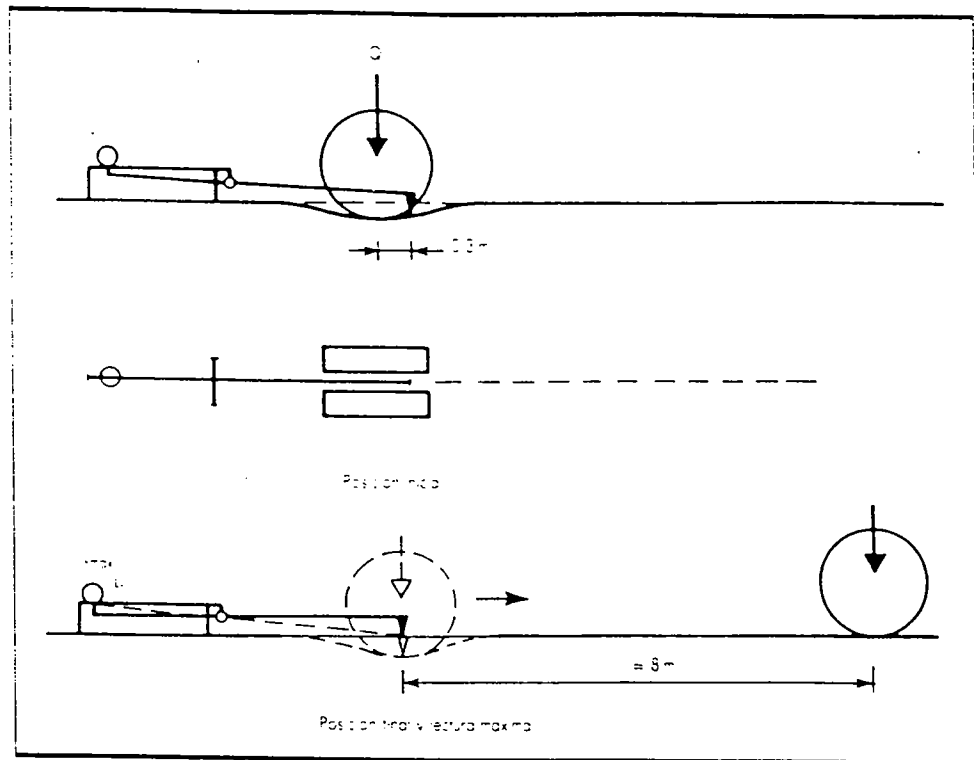


FIGURA 3.
Método de recuperación.

vehículo quede en la dirección del movimiento elegida, generalmente paralela al borde de la calzada.

4.2.2 Se coloca la viga Benkelman en el punto de medida, según lo indicado en el apartado 4.1.3, y la cuña de parada.

4.2.3 Seguidamente se anota la lectura inicial L_0 del comparador.

4.2.4 El operador debe avisar al conductor para que éste desplace el camión lentamente, con velocidad inferior a 3 km/h hacia adelante, de forma continuada hasta que el eje de las ruedas (o centro de carga) se encuentre a 2,5 m del punto de medida.

4.2.5 Se anota la lectura máxima L_m del comparador, que se produce generalmente en las proximidades del paso del eje de las ruedas (o centro de carga) sobre la vertical del punto de medida, y la lectura L_1 del comparador para la aplicación de la carga en el punto de parada indicado anteriormente.

4.2.6 Inmediatamente se desplaza el camión hasta que el centro de carga se encuentre a 3,7 m del punto de medida: se para y se anota la lectura L_2 .

4.2.7 De nuevo se desplaza el camión hasta que el centro de carga se encuentre a 5,0 m del punto de medida, se para y se anota la lectura L_3 .

4.2.8 Se avisa al conductor para que desplace el

vehículo hasta que el centro de carga se aleje más de 8 m del punto de medida y se anota la lectura final L_f .

4.2.9 Se anotan las temperaturas del pavimento y del aire.

4.3 Método de retroceso (ver Figura 4)

4.3.1 Una vez elegida la situación del punto a ensayar y realizados los preparativos del apartado 3, se sitúa el vehículo a 8 m aproximadamente del punto a ensayar, de manera que quede paralelo a la dirección elegida del movimiento, en general paralela al borde de la calzada.

4.3.2 Se coloca la viga Benkelman en el punto de medida, según lo indicado en el apartado 4.1.3, y la cuña de parada, según 4.1.4, de tal forma que el centro de las ruedas de carga esté alineado con el eje de la viga. Se anota la lectura inicial L_0 del comparador.

4.3.3 El operador avisa al conductor para que éste desplace el camión lentamente hacia el punto de medida con velocidad constante inferior a 3 km/h siguiendo las indicaciones del operador, que lo dirigirá por la dirección apropiada para que el centro de las ruedas de carga pase por la vertical del punto de medida y dichas ruedas no toquen al palpador ni a la palanca.

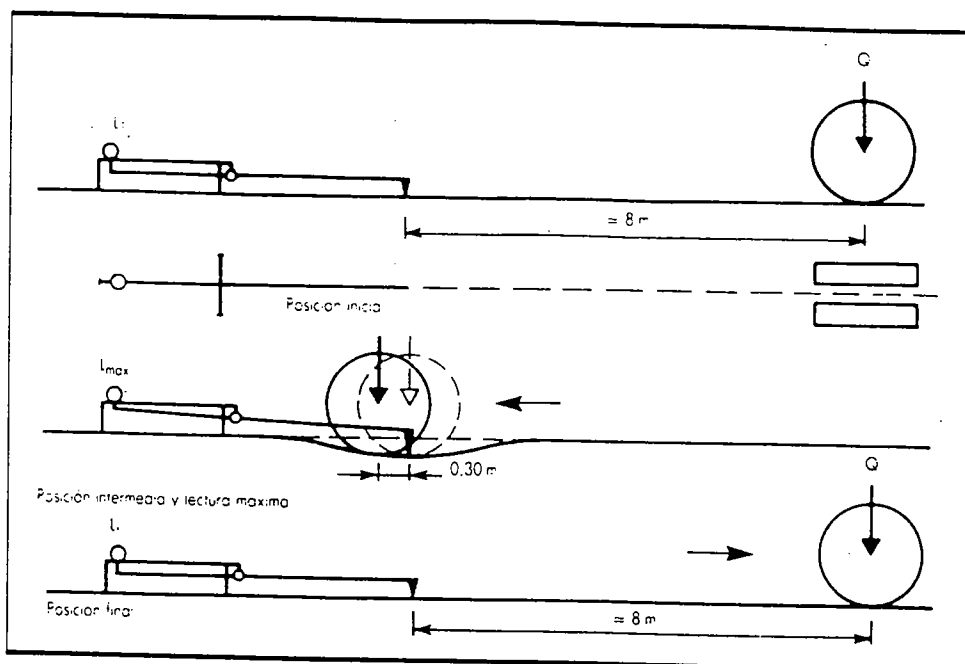


FIGURA 4.
Método de retroceso.

4.3.4 Se anota la lectura máxima L_m en el comparador, que se produce generalmente en la proximidad del paso del eje de las ruedas (o centro de carga) sobre la vertical del punto de medida.

4.3.5 El operador avisa al conductor el momento de invertir el sentido de marcha, que será cuando el centro de carga haya sobrepasado 0,3 m el punto de medida. La inversión de marcha se hará con parada y arranque suave y sin que las ruedas toquen la cuña de parada.

4.3.6 Se anota la lectura máxima durante el movimiento de la carga hacia adelante, tomándose como L_m la mayor de las dos anotadas.

4.3.7 El camión se aleja hasta que el eje de las ruedas de carga se distancie en más de 8 m del punto de medida y se anota la lectura final L_f .

4.3.8 Se anotan las temperaturas del pavimento y del aire.

4.4 Método de la línea de influencia

4.4.1 El desarrollo del ensayo es igual que en cualquiera de los otros métodos anteriores, con la particularidad de que después de la lectura inicial se anota la lectura intermedia L_i para las posiciones de la carga a 0, 10, 25 y 50 cm y 1, 2,5, 3,7 y 5 m del punto de medida, según indica la figura 5. En cada posición el operador indica cuándo debe parar el camión, toma lecturas y avisa luego la reanudación del movimiento del vehículo. Se pondrá especial cuidado en que las paradas y arranques del vehículo sean lo más suaves posible.

4.5 Observaciones. Si se realizan una serie de medidas sobre un tramo de carretera con la misma sección estructural, pueden suprimirse las lecturas a 2,5, 3,7 y 5 m, siempre que en los dos primeros ensayos de cada 500 m se compruebe que no existe influencia de la deformada sobre los apoyos de la viga. Si en cada punto o momento de lectura la agu-

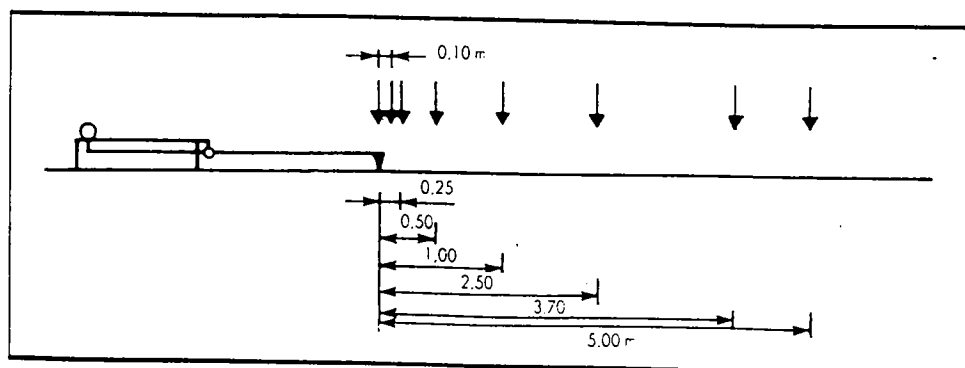


FIGURA 5.
Método de la línea de influencia. Posición de la carga.

ja del comparador se mueve a más de 0,01 mm por segundo no serán válidas las lecturas y habrá de procederse a iniciar el ensayo, protegiendo adecuadamente la viga del sol, del viento y, en su caso, de las ondas de aire originadas por el tráfico adyacente.

5 RESULTADOS

5.1 Para las dimensiones de la viga Benkelman especificada en esta norma, la deflexión es el doble de la medida de la lectura del comparador.

5.2 La deflexión elástica en los métodos de recuperación y de retroceso viene dada por la expresión:

$$d_e = 2 (L_m - L_r)$$

5.2.1 En el método de retroceso, además de la deflexión elástica se pueden calcular la deflexión total y la remanente de la siguiente forma:

$$\text{Deflexión total: } d_t = 2 (L_m - L_0)$$

$$\text{Deflexión remanente: } d_r = 2 (L_r - L_0)$$

5.2.2 La deflexión elástica para cada posición de la carga, d_{e_i} , viene dada por la expresión:

$$d_{e_i} = 2 (L_i - L_r)$$

5.2.3 Cuando la diferencia de lecturas para las posiciones de la carga a 5 m y a más de 8 m sea igual o superior a 0,01 mm, el ensayo se considera incorrecto debiéndose repetir la medida, y si se repite la condición se considerará inviable el ensayo con viga Benkelman en ese punto.

5.3 Corrección de la temperatura

5.3.1 Se considera como deflexión patrón la que se produce con el pavimento a 20 °C de temperatura.

5.3.2 Las deflexiones medidas en pavimentos bituminosos a temperaturas distintas a 20 °C, se corregirán en los casos en los que el firme tenga un espesor de mezclas bituminosas igual o superior a 10 cm, por medio del coeficiente obtenido de la figura 6.

5.4 Corrección de la deflexión elástica por influencia de la deformada

5.4.1 Si la semilongitud de la deformada es superior a 2,50 m afecta a los puntos de apoyo de la viga Benkelman, obteniéndose unas medidas de la deflexión incorrectas.

5.4.2 Si la diferencia de lecturas para las posiciones de carga a 2,50 y 5,00 m es igual o inferior a 0,01 mm, se puede admitir que la línea de influencia no afecta a los apoyos de la viga Benkelman. En el caso contrario, se corregirán las deflexiones medidas mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

$$d_{e_{cr}} = d_e + 6,12 (L_1 - L_r) - 4,12 (L_2 - L_r)$$

donde:

$d_{e_{cr}}$ = deflexión elástica corregida.

d_e = máxima deflexión elástica medida = $2 (L_m - L_r)$

L_1 = lectura para la posición de carga a 2,50 m.

L_2 = lectura para la posición de carga a 3,70 m.

L_r = Lectura para la posición de carga a 5 m o más.

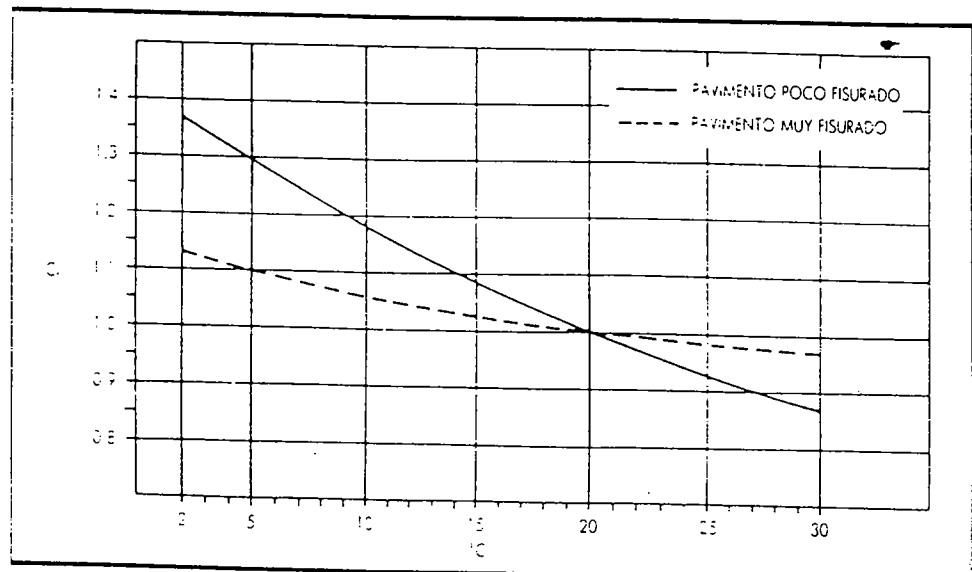


FIGURA 6.
Coeficiente de corrección por temperatura del pavimento.

5.5 Expresión de los resultados. Para cada ensayo o serie de medidas de deflexión se indicarán los siguientes datos:

- Posición de la sección auscultada y puntos de medida.
- Meteorología y temperatura del pavimento.
- Carga del eje trasero y de las ruedas gemelas del vehículo.
- Presiones de inflado de los neumáticos y superficie de contacto entre ruedas y pavimento.
- La fecha y hora en que se realiza el ensayo.
- Las lecturas de las medidas.

— Los valores de las deflexiones elásticas obtenidas, expresadas en centésimas de milímetro (10^{-2} mm) y corregidas para 20 °C.

6 CORRESPONDENCIA CON OTRAS NORMAS

SNV núm. 670362 (Suiza) (1970) Versuche Benkelmanbalken.

Método WASHO (EE. UU.).

Método CGRA (Canadá).

Método CRB (Australia).