

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

1. OBJETO

- 1.1. Esta norma describe los útiles necesarios, los procedimientos a seguir y la expresión de los resultados de las medidas para la determinación estática de la deflexión elástica recuperada de un firme, utilizando la viga Benkelman o equipos similares.
- 1.2. Este ensayo permite determinar la deflexión vertical 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. 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 a la deformación vertical puntual de una superficie bajo la acción de una carga. La deflexión así definida se denomina **deflexión total**. Cuando la sollicitación aplicada deja de actuar, en teoría la deformación del firme debería ser la inicial, sin embargo por ser los materiales viscoelásticos no ocurre así, quedando con una parte de la total que se denomina **deflexión remanente**. La diferencia entre la total y la remanente se denomina **deflexión elástica recuperada**.

$$d_t = d_e + d_r$$

$d_t$  = deflexión total

$d_e$  = deflexión elástica recuperada

$d_r$  = deflexión remanente.

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

- 1.6. 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  $\leq 4$  m.

## 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 Fig. 1. Comprende los siguientes elementos:

2.1.1. Bastidor.— Viga con tres pies 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.— De 3,60 m de longitud, puede desmontarse en tres partes durante el transporte. Se suspende al bastidor por un eje que la divide en dos partes en la relación 2/1.

2.1.3. Suspensión.— 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.— 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.— Sujeto al bastidor por una cadenilla, sirve para bloquear la palanca, haciéndola solidaria al bastidor.

2.1.6. Nivel.— 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.— Aparato con limbo dividido en 0,01 mm con curso  $\geq 10$  mm. Se fija al bastidor por un soporte solidario de éste, de modo que su vástago profulgado apoya en el extremo de la palanca de medida.

2.1.8. Palpador.— Pieza metálica de la forma y dimensiones indicadas en la figura, que reposa sobre el suelo en el punto de medida, de modo que asegure un apoyo regular.

2.1.9. Nudos.— 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 (13t). Separación entre los balones de las ruedas gemelas a plena carga  $\geq 5$  cm.

2.2.2. Los neumáticos serán de a medida 12.00 - 20 y de unas características tales que con presión de inflado de 0,7 a 0,9 MN/m<sup>2</sup> (7 a 9 kgf/cm<sup>2</sup>) den una superficie de contacto con el pavimento para las ruedas gemelas de  $(1050 \pm 25)$  cm<sup>2</sup> ajustándose a la forma de la figura 2.

### 2.3. Otros elementos accesorios.

2.3.1. Reloj.—Reloj convencional con cronómetro de 1 seg de precisión.

2.3.2. Termómetro.— Cualquier termómetro convencional o sistema de termopares con escala de  $-10^{\circ}$  a  $50^{\circ}$  C y precisión de  $1^{\circ}$  C.

2.3.3. Manómetro.— Dispondrá de una boquilla adecuada para medir la presión de inflado de los neumáticos con escala de 0 a  $1 \text{ MN/m}^2$  (0 a  $10 \text{ kgf/cm}^2$ ) y precisión de  $0,01 \text{ MN/m}^2$  ( $0,1 \text{ kgf/cm}^2$ ).

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 50 mm 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  $50 \times 70 \text{ cm}$ . Tizas y pintura para marcar el pavimento. Impresos y elementos de escritura. Bote de agua con boquilla de diámetro inferior a 10 mm. Silbato u otro avisador acústico. Glicerol 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 cargará preferiblemente con lingotes metálicos o prefabricados de hormigón, y se pesará en báscula contrastada hasta tener un peso con el eje trasero de  $128 \pm 2 \text{ kN}$  ( $13 \pm 0,2 \text{ t}$ ). Se comprobará la carga al comienzo del ensayo y, para series de ensayos, al comienzo y al final de la jornada de trabajo.

Se pesará el eje trasero del vehículo y las ruedas gemelas, bajo las que se realizarán las medidas. El peso de éstas últimas será de  $64 \pm 1 \text{ kN}$  ( $6,5 \pm 0,1 \text{ t}$ ).

Si los materiales utilizados para cargar el vehículo son susceptibles de variaciones de humedad se protegerán con una lona.

3.2. Se imprimirá 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 levantarán las ruedas con un gato sobre una superficie lo más plana posible, se colocará el papel debajo y se descenderán las ruedas reposando libremente toda la carga sobre el papel.

Se comprobará si la huella obtenida se ajusta a la huella tipo de la figura 2.

Caso que difiera por defecto o exceso se corregirá la presión de inflado aumentándola o disminuyéndola, hasta que cumpla la condición anterior.

Se anotará 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  $\pm 0,01 \text{ MN/m}^2$  ( $\pm 0,1 \text{ kgf/cm}^2$ ) durante todas las series de ensayos a realizar. Se comprobará la presión de inflado cada 2 horas, corrigiéndose cuando esté fuera del intervalo anterior.

3.3. Se montará 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 comprobará el correcto funcionamiento de todo el conjunto.

3.4. Se situará la viga Benkelman en el punto de medida, de modo que la punta del palpador quede situada sobre dicho punto 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 protegerá la viga de la insolación directa.

Se quitará el bloqueo de la palanca y se ajustará 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, y asegurándose de que mantenga contacto con el extremo de la palanca de medida. Después de la realización del ensayo se deberá bloquear nuevamente la palanca.

Se nivelará 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 pondrá el dial, de medida de centésimas de mm, del comparador a cero mediante el giro de la esfera.

3.5. Se procederá a taladrar el pavimento, haciendo un orificio de 20 a 50 mm de profundidad con diámetro suficiente para la introducción del bulbo del termómetro. Se llenará dicho agujero con glicerol, o material de similares inercia térmica y viscosidad, y se introducirá el bulbo del termómetro leyéndose la temperatura después del tiempo necesario para la estabilización de la temperatura.

#### 4. PROCEDIMIENTOS OPERATIVOS

##### 4.1. Método de recuperación (figura 3).

4.1.1. 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 las ruedas a 0,30 m del punto a ensayar, hacia el operador, de manera que el eje del vehículo quede en la dirección elegida de movimiento, generalmente paralela al borde de la calzada.

4.1.2. Se coloca la viga Benkelman en el punto de medida, según lo indicado en el apartado 3.4., y la cuña de parada.

4.1.3. Se anotará la lectura inicial  $L_0$  del comparador, con la carga y la viga en la posición de ensayo, cuando la aguja del comparador no varíe más de 0,01 mm en 5 seg.

4.1.4. El operador deberá 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 2,50 m del punto de medida.

4.1.5. Se anotará la lectura máxima  $L_m$  del comparador, que se produce generalmente en las proximidades del paso del eje de las ruedas (o centro de la carga) sobre la vertical del punto de medida, y la lectura  $L_1$  del comparador después de transcurridos 5 seg de la aplicación de la carga en el punto de parada indicado anteriormente.

6. (

7. C

S  
M

- 4.1.6. Se desplaza nuevamente el camión hasta que el centro de carga se encuentre a 3,70 m del punto de medida, se para y se anota la lectura  $L_2$  después de 5 seg de aplicación de la carga.
- 4.1.7. De nuevo se desplaza el camión hasta que el centro de la carga se encuentre a 5,00 m del punto de medida, se para y se anota la lectura  $L_3$  después de 5 seg de aplicación de la carga.
- 4.1.8. 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.
- 4.1.9. Se anota la lectura final  $L_f$ , después de parado el camión, cuando la variación de la lectura del comparador sea inferior a 0,01 mm en 5 seg.
- 4.1.10. Se anota a temperatura del pavimento, retirando el medidor de temperatura del orificio, y la temperatura del aire.

#### 4.2. Método de retroceso (ver figura 4).

- 4.2.1. 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 sea paralelo a la dirección elegida del movimiento, en general paralela al borde de la calzada.
- 4.2.2. Se coloca la viga Bendelman en el punto de medida, según lo indicado en el apartado 3.4., y la cuña de parada, según 3.5. y 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, teniendo en cuenta que la aguja del comparador no varíe más de 0,01 mm cada 15 seg.
- 4.2.3. El operador avisa al conductor para que éste desplace el camión lentamente, 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.
- 4.2.4. Se anotará 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.
- 4.2.5. El operador avisa al conductor el momento de invertir el sentido de marcha, que será cuando el centro de carga haya sobrepasado 0,30 m el punto de medida. La inversión de marcha se hará con parada y arranque suave y sin que las ruedas toquen el calzo o cuña de seguridad.
- 4.2.6. Se anotará la lectura máxima durante el movimiento de la carga hacia adelante, tomándose como  $L_m$  la mayor de las dos anotadas.
- 4.2.7. El camión se alejará 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  $L_f$  cuando la aguja del comparador no varíe más de 0,01 mm cada 5 seg.

4.2.8. Se anota la temperatura del pavimento y, retirando el medidor de temperatura del orificio, la temperatura del aire.

#### 4.3. Método de la línea de influencia.

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 anotará la lectura intermedia  $L_i$  para las posiciones de la carga a 0; 0,10; 0,25; 0,50; 1,00; 2,50; 3,70 y 5 m del punto de medida, según indica la figura 5. En cada posición el operador indicará cuándo debe parar el camión y tomará lectura cuando la aguja del comparador varíe menos de 0,01 mm en 5 seg, avisando, luego, la reanudación del movimiento del vehículo. Se pondrá especial cuidado en que las paradas y arranques del vehículo sean lo más suaves posible.

### 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 viene dada en los métodos de recuperación y de retroceso por la expresión:

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

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:

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

$$\text{Deflexión remanente: } d_r = 2 (L_f - L_o)$$

5.2.2. La deflexión elástica para cada posición de la carga viene dada por la expresión:

$$d_{ei} = 2 (L_i - L_f)$$

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 considerará no correcto debiéndose repetir la medida, y si se repite la condición se considerará no válido 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. La temperatura se medirá y anotará cada hora o si cambian las condiciones ambientales y la temperatura del aire. Se medirá la temperatura del pavimento al comienzo del ensayo y cuando la temperatura del aire varíe en 2° C o cambie la insolación del pavimento.

5.3.3. 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 línea de 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 lectura 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:

$$d_{ec} = d_e + 6,12 (L_1 - L_f) - 4,12 (L_2 - L_f)$$

donde:  $d_{ec}$  = deflexión elástica corregida.

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

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

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

$L_f$  = lectura para la posición de carga a 5 m o más.

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 temperaturas del aire y pavimento.

Carga del vehículo, eje trasero y ruedas gemelas.

Presiones de inflado de los neumáticos y la superficie de contacto entre ruedas y pavimento.

Las fechas y horas 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. OBSERVACIONES

Si se realiza una serie de medidas sobre un tramo de carretera con la misma sección estructural, pueden suprimirse las lecturas a 2,50; 3,70 y 5m, 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.

## 7. CORRESPONDENCIA CON OTRAS NORMAS:

SNV núm. 670362 (Suiza); Método WASHO (EE.UU.); Método CGRA (Canadá); Método CRB (Australia).

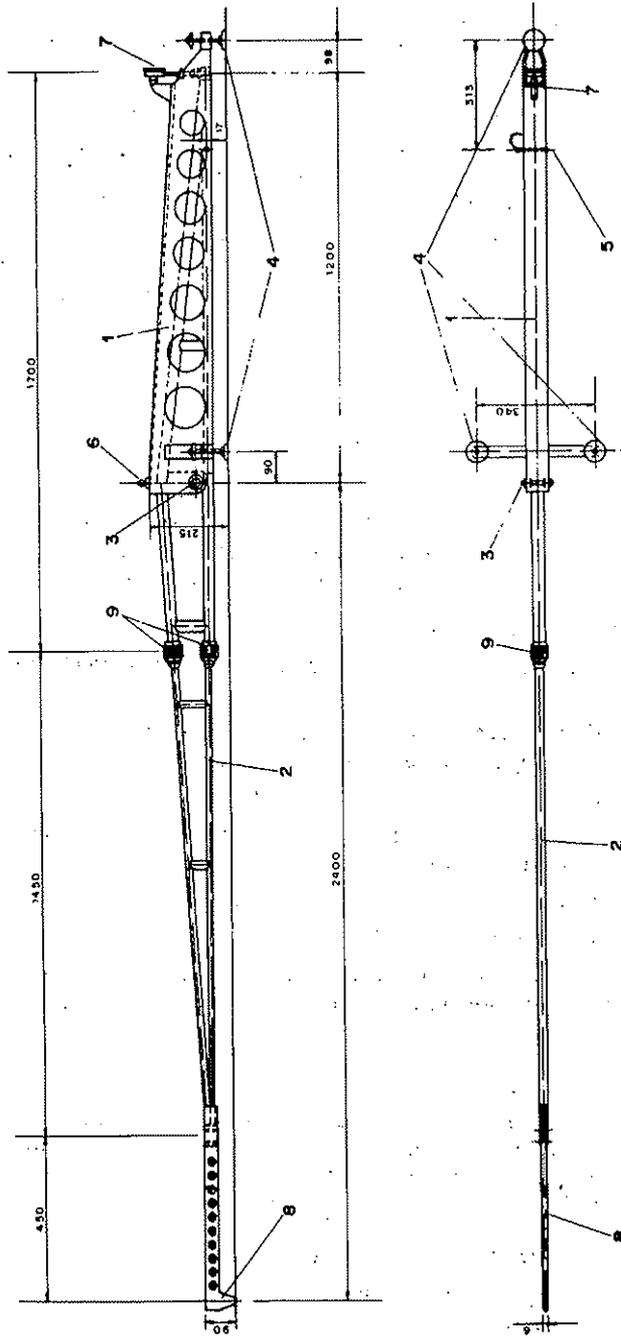


Fig. 1.— Viga BENKELMAN

COTAS EN mm.

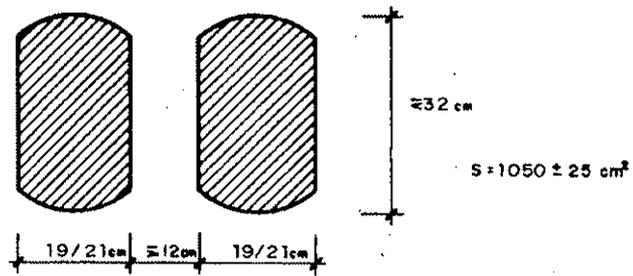


Fig. 2.— Superficie de carga

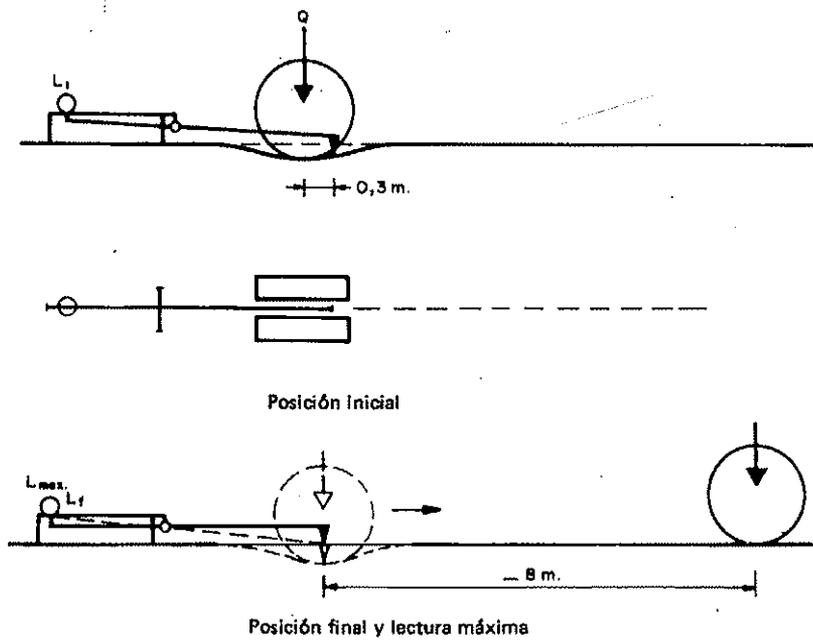


Fig. 3.— Método de recuperación

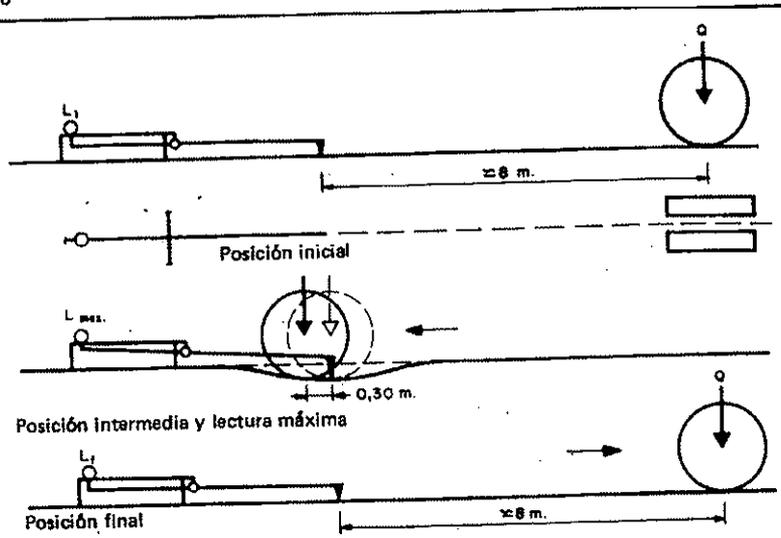


Fig. 4.- Método de retroceso

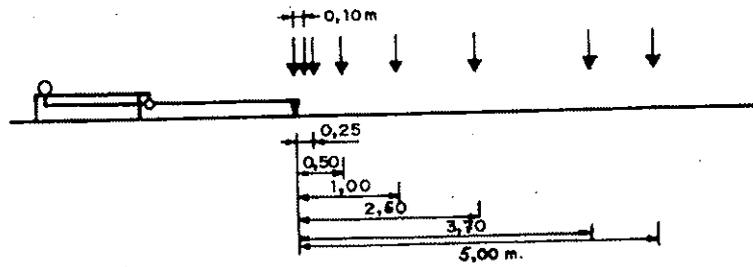


Fig. 5.- Método de la línea de influencia. Posición de la carga.

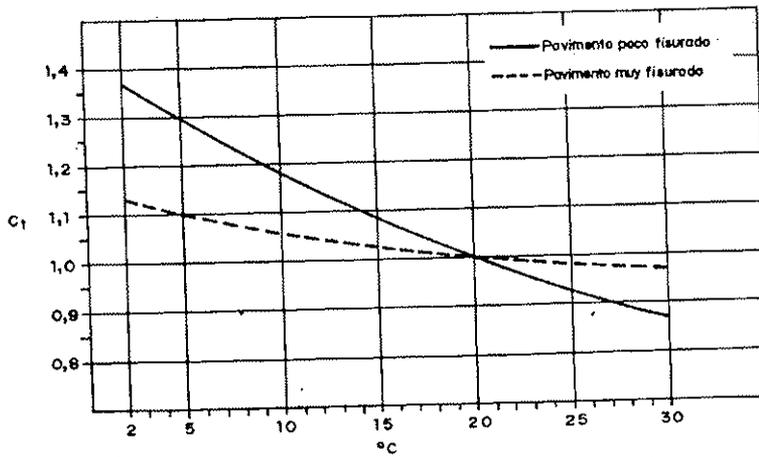


Fig. 6.- Coeficiente de corrección por temperatura del pavimento