

## MEDIDA DE LAS DEFLEXIONES DE UN PAVIMENTO ASFÁLTICO EMPLEANDO LA VIGA BENKELMAN

INV E – 795 – 13

### 1 OBJETO

---

- 1.1** Esta norma describe el procedimiento a seguir para la determinación estática de la deflexión elástica recuperada de un pavimento asfáltico empleando la viga Benkelman. A tal fin, se utiliza un camión donde la carga, el tamaño de neumáticos, el espaciamiento entre ruedas duales y la presión de inflado están normalizados.
- 1.2** Esta norma reemplaza la norma INV E-795-07.

### 2 DEFINICIONES

---

- 2.1** *Deflexión total ( $d_t$ )* – Deformación vertical y puntual de una superficie de pavimento bajo la acción de una carga.
- 2.2** *Deflexión remanente o residual ( $d_r$ )* – En los materiales viscoelásticos, cuando la sollicitación aplicada deja de actuar, la recuperación del pavimento no es total, quedando este material con una deflexión residual o deflexión remanente.
- 2.3** *Deflexión elástica recuperable ( $d_e$ )* – Es la diferencia entre la deflexión total y la deflexión remanente,  $d_t = d_e + d_r$ . La deflexión elástica recuperable se utiliza para la modelación de las estructuras de pavimento mediante retrocálculo.
- 2.4** *Cuenca de deflexión* – Línea de influencia de la deformada del pavimento debido a la aplicación de una carga determinada.

### 3 RESUMEN DEL MÉTODO

---

- 3.1** Un camión donde la carga, el tamaño de los neumáticos, el espaciamiento entre ruedas duales y la presión de inflado están normalizados, se coloca en el pavimento de manera que la rueda dual quede sobre el punto escogido para el ensayo. A continuación, se coloca la viga tras la rueda, de manera que el

extremo de su brazo de medida quede exactamente en el centro del espacio comprendido entre los dos neumáticos de la rueda dual, ajustando a cero la lectura del dial del aparato. Se aleja el vehículo del punto de ensayo y se lee en el dial el valor de la recuperación elástica de la deformación sufrida por el pavimento. Si se está empleando una viga Benkelman doble, se registra, además, la lectura del segundo dial.

## 4 IMPORTANCIA Y USO

---

- 4.1** La medida de las deflexiones, como respuesta ante la aplicación de una carga sobre la superficie del pavimento, es la base de la mayoría de los procesos de evaluación estructural existentes en la actualidad. Aunque existen otras medidas que pueden dar una idea del estado estructural del pavimento, la deflexión en superficie es, sin duda, la que ofrece las posibilidades de análisis más amplias.
- 4.2** La medida de las deflexiones Benkelman es una operación relativamente sencilla, que emplea un dispositivo de bajo costo, de fácil adquisición y de sencilla aunque laboriosa operación.
- 4.3** El ensayo permite determinar la deflexión vertical y puntual de una superficie del pavimento bajo la acción de una carga normalizada, transmitida por medio de las ruedas gemelas de un eje simple tipo, pero no permite obtener el cuenco de deflexión. Sin embargo, cuando se utiliza una viga Benkelman doble, se pueden encontrar dos puntos del cuenco de deflexión, a partir de los cuales se puede estimar, grosso modo, un radio de curvatura.

## 5 EQUIPO

---

**5.1** *Viga Benkelman* – Es un deflectómetro mecánico simple. Un brazo móvil, suspendido en un bastidor a través de un pivote, transmite la deflexión vertical del punto de medida a un dial medidor. La Figura 795 - 1 presenta un esquema general del dispositivo y unas dimensiones típicas. Sus principales partes constitutivas se describen a continuación.

**5.1.1** *Bastidor* – Viga con tres patas de apoyo sobre el suelo, que sirve de sustentación a la palanca o brazo de medida, y de soporte al dial medidor. La altura de la pata trasera se puede regular con un tornillo, mientras que las delanteras, que son fijas, están situadas simétricamente con respecto al eje longitudinal de la viga.

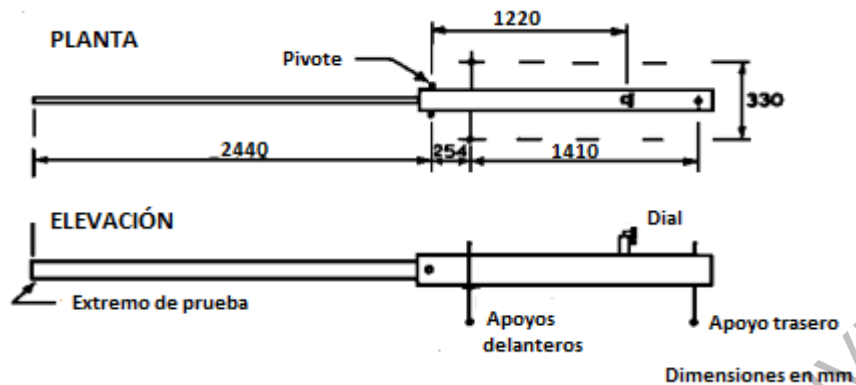


Figura 795 - 1. Viga Benkelman típica

**5.1.2** *Palanca o brazo de medida* – Perfil metálico suspendido del bastidor a través un pivote que lo divide en dos partes con una determinada relación. La viga de la Figura 795 - 1 tiene una relación de brazo (constante de la viga) de 2:1 (2440/1220), pero se acepta el uso de vigas con otras constantes (por ejemplo, 4:1). Para facilitar su transporte, el brazo de medida se debe fabricar de manera que se pueda desmontar en varias partes.

**5.1.3** *Pivote* – Un eje, que hace de punto de apoyo del brazo de medida, suspendido en dos rodamientos a bolas, estancos al polvo y solidarios al bastidor.

**5.1.4** *Seguro* – Elemento que sirve para bloquear el brazo de medida, dejándolo fijo al bastidor.

**5.1.5** *Dial* – Aparato con limbo dividido en 0.01 mm y con un recorrido igual o superior a 10 mm. Se fija al bastidor con un soporte solidario de éste, de modo que su vástago prolongado quede apoyado sobre el extremo posterior del brazo de medida. El dial puede ser sustituido por un captador electrónico con presentación de lectura digital.

**5.1.6** *Palpador* – Pieza metálica de la forma que muestra la Figura 795 - 2, colocada en el extremo anterior del brazo de medida y que reposa sobre el suelo en el punto de la medición.

**5.2** *Viga Benkelman de doble brazo (Opcional)* – Viga con doble brazo de medida (Figura 795 - 3), con sus correspondientes diales registradores (al 0.01 mm y recorrido 10 mm) y las siguientes dimensiones típicas:

- 5.2.1 Longitud del primer brazo de ensayo, desde el pivote al punto de prueba de 2440 mm.
- 5.2.2 Longitud del primer brazo de ensayo, desde el pivote al punto de apoyo del vástago del dial registrador de 610 mm. (Relación 1:4).
- 5.2.3 Longitud del segundo brazo de ensayo, desde el pivote a la punta de prueba de 2190 mm.
- 5.2.4 Longitud del segundo brazo de ensayo, desde el pivote al punto de apoyo del vástago del deformímetro registrador de 548 mm. (Relación 1:4).



Figura 795 - 2. Palpador en el extremo del brazo de medida



Figura 795 - 3. Viga Benkelman doble

*Nota 1: Se permite el empleo de vigas con dimensiones diferentes a las indicadas en esta Sección, siempre y cuando no sean tan reducidas que el radio de acción de la carga afecte permanentemente la posición de sus patas*

- 5.3 **Vehículo de carga** – El vehículo usado para cargar el pavimento deberá ser un camión que lleve una carga de prueba de 80 kN (18 000 lbf) en un eje trasero simple con sistema de rueda doble. Los neumáticos serán de 10.00 – 20 y

tendrán una presión de inflado tal, que la presión de contacto sobre el pavimento sea de 552 kPa (80 lbf/pg<sup>2</sup>).

- 5.4** *Elementos misceláneos* – Herramientas menores para el montaje y ajuste de la viga, termómetro con escala de 0 a 50° C o mayor y divisiones cada grado, cinta métrica de 2 o 3 m, odómetro, taladro para ejecutar orificios en el pavimento hasta de 50 mm de profundidad y 10 mm de diámetro, papel para impresión de las huellas de los neumáticos (dimensiones mínimas de 50 × 70 cm), tiza y pintura para marcar el pavimento, etc.

## 6 SEGURIDAD

---

- 6.1** Cuando estos ensayos se realizan en carreteras abiertas a la circulación, el equipo, el operario y el personal auxiliar invaden un área del pavimento obstruyendo el tránsito. Por lo tanto, se deberán tomar todas las medidas adecuadas para conseguir una zona de trabajo segura, conforme a los reglamentos vigentes.

## 7 PREPARACIÓN DEL ENSAYO

---

- 7.1** El camión especificado en el numeral 5.3 se carga con lingotes de metal o bloques de concreto o de piedra y se pesa en una báscula contrastada hasta tener la carga de 80 kN (18 000 lbf) en el eje simple trasero. Se comprueba la carga al comienzo del ensayo y, para series de ensayos, al comienzo y al final de la jornada de trabajo. Se pesan el eje trasero y las ruedas gemelas, bajo las cuales se realizarán las medidas. La masa en estas últimas será de 40 kN (9000 lbf). Si los materiales utilizados para cargar el vehículo son susceptibles a las variaciones de humedad, se deberán proteger con una lona.
- 7.2** Se imprime sobre un papel la huella de las ruedas gemelas cargadas correctamente, con la presión de inflado adecuada. Para ello, se levantan las ruedas con un gato sobre una superficie lo más plana posible, se coloca el papel debajo y se descenden las ruedas reposando libremente toda la carga sobre el papel. Se levantan de nuevo las ruedas y se mide el área de cada impronta. Conocidas la carga por rueda y las áreas de las improntas, se calcula la presión de contacto. Si ésta difiere de la especificada en el numeral 5.3, se deberá ajustar la presión de inflado según corresponda.
- 7.3** Se arma la viga Benkelman, se le coloca el dial (o los diales si es una viga doble) y se comprueba el correcto funcionamiento de todo el conjunto.

## 8 PROCEDIMIENTO

### 8.1 Operaciones previas:

- 8.1.1** El punto del pavimento a ser ensayado deberá ser marcado convenientemente con una línea transversal al camino. Sobre dicha línea será localizado el punto de ensayo a una distancia prefijada del borde. Se recomienda utilizar las distancias indicadas en la Tabla 795 - 1.

Tabla 795 - 1. Localización del punto de ensayo

ANCHO DEL CARRIL	DISTANCIA DESDE EL BORDE DEL PAVIMENTO
2,70 m	0,45 m
3,00 m	0,60 m
3,30 m	0,75 m
3,60 m o más	0,90 m

- 8.1.2** Con el fin de medir la temperatura del pavimento, se practica un orificio de 40 a 50 mm de profundidad y 10 mm de diámetro, aproximadamente, emplazado sobre la línea paralela al eje del camino, que pasa por el punto de determinación de la deflexión y a 500 mm del mismo, en el sentido de avance del camión. Se llena con glicerina o aceite, no menos de 10 minutos antes de iniciar el ensayo, y se lee la temperatura inmediatamente antes de la colocación del camión en el sitio de prueba. El rango de temperatura de trabajo deberá quedar dentro de los siguientes límites: inferior 5° C y superior 35° C.

- 8.1.3** Se mide y anota la temperatura ambiente.

- 8.1.4** Se coloca la rueda dual externa del camión sobre el punto de ensayo seleccionado. Para la correcta ubicación de la misma, se recomienda colocar en la parte trasera externa del camión una guía vertical en correspondencia con el eje de carga. Desplazando suavemente el camión, se hace coincidir la guía vertical con la línea transversal indicada en el numeral 8.1.1, de modo que simultáneamente el punto quede entre ambos neumáticos de la rueda dual.

## 8.2 Medición de la deflexión:

- 8.2.1** Se coloca la viga sobre el pavimento, detrás del camión, perpendicularmente al eje de carga, de modo que la punta del brazo de medida (palpador) coincida con el punto de ensayo y la viga no roce contra las llantas de la rueda dual (Figura 795 - 4). Si se trata de una viga doble, el palpador que deberá quedar entre los neumáticos en coincidencia con el eje, será el delantero (Figura 795 - 5).



Figura 795 - 4. Colocación de la viga en el punto de ensayo

- 8.2.2** Se libera el seguro del brazo y se ajusta la base de la viga por medio del tornillo trasero, de manera que la parte posterior del brazo de medición quede en contacto con el dial. En el caso de vigas dobles, se realiza esta operación con ambos brazos y diales.
- 8.2.3** Se ajusta cada dial, de modo que su vástago tenga un recorrido libre comprendido entre 4 y 6 mm. Se gira el limbo del dial hasta que las agujas queden en cero y se verifica la lectura golpeándolo suavemente con un lápiz. Se gira el limbo si es necesario y se repite la operación hasta obtener la posición cero. También se puede registrar una lectura inicial diferente de cero ( $L_0$ ).



Figura 795 - 5. Colocación de la viga doble

- 8.2.4** Se hace avanzar suave y lentamente el camión hasta una distancia no menor de 5 m (Figura 795 - 6) y se lee el dial cada 60 segundos, golpeándolo suavemente con un lápiz. Cuando dos lecturas sucesivas no difieran en más de 0.01 mm, se da por finalizada la recuperación, registrándose la última lectura observada ( $L_f$ ) (Figura 795 - 7).

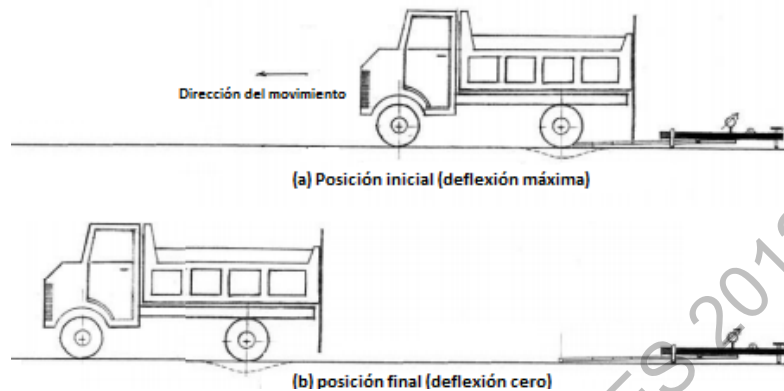


Figura 795 - 6. Esquema del proceso de medición

*Nota 2: Las medidas de deflexión no se considerarán válidas, así se hayan realizado a temperaturas inferiores al límite superior indicado en el numeral 8.1.2, si se produce deformación plástica entre ambas llantas de la rueda dual. Para detectar si ello sucede, se procederá de la siguiente forma: Una vez registradas la lectura  $L_f$ , se hace retroceder suave y lentamente el camión hasta que la rueda dual externa quede colocada sobre el punto de ensayo, observando la marcha en la aguja del dial. Si alcanzada cierta posición la aguja se detiene y luego se observa un desplazamiento en sentido contrario, como si se produjera la recuperación del pavimento, ello indica que existe deformación plástica medible entre ambas llantas de la rueda dual. Esa aparente recuperación puede ser debida, también, al hecho que el radio de acción de la carga del camión afecte las patas de la viga.*

- 8.3** Se repite el proceso de medida seleccionado, a los intervalos de medida indicados en la Sección 9. Normalmente, se toman medidas bajo las dos ruedas usando dos dispositivos. Sin embargo, si se usa un solo instrumento, la prueba puede ser alternada entre las ruedas, obteniéndose dos o más medidas en la rueda exterior por cada rueda interior medida a través de toda la sección de prueba.



Figura 795 - 7. Lecturas finales de los diales en una viga doble



## 9 FRECUENCIA DE MEDICIÓN

- 9.1** La ubicación de las pruebas variará según el propósito para el cual se obtengan los datos. Por lo general, el método que comúnmente es utilizado es el de realizar la prueba principalmente en las huellas de las ruedas, puesto que la reacción del pavimento en estos lugares refleja el efecto del daño que se ha estado acumulando. Se pueden efectuar pruebas de deflexión entre las huellas de circulación en pavimentos flexibles, para comparar con los resultados bajo las huellas de las ruedas, de manera de conocer el daño relativo.
- 9.2** *Ensayos a nivel de red* – Este nivel de prueba proporciona una perspectiva general de la capacidad de resistencia del pavimento con un número limitado de pruebas. Las pruebas de deflexión se ejecutan generalmente a intervalos de 200 a 500 metros (656 a 1640 pies), dependiendo de las condiciones específicas del pavimento. Un mínimo de siete pruebas por sección de pavimento uniforme, se recomienda para asegurar una muestra estadísticamente significativa.
- 9.3** *Ensayos a nivel general de proyecto* – Este nivel de prueba proporciona un análisis más detallado del pavimento, por ejemplo: para el diseño de un refuerzo o una rehabilitación. Las pruebas se deberán hacer a intervalos de 50 a 200 m (164 a 656 pies), dependiendo de las condiciones específicas del pavimento, con un mínimo de 15 pruebas recomendadas por cada sección de pavimento uniforme.
- 9.4** *Ensayos a nivel detallado de proyecto* – Este nivel de prueba proporciona un análisis altamente detallado y específico del pavimento para propósitos tales como la identificación de áreas de alta deflexión. En este caso, las medidas se toman, generalmente, a intervalos entre 10 y 50 m (32.8 a 164 pies), según recomiende el ingeniero, en ambas huellas de las ruedas.

## 10 CÁLCULOS

- 10.1** Se calcula la deflexión de la superficie del pavimento en cada punto de medida ( $d_i$ ), con la expresión:

$$d_i = |L_0 - L_f| \times \text{Constante de la viga} \quad [795.1]$$

Donde:  $L_0$ : Lectura inicial del dial, 0.01 mm;

$L_f$ : Lectura final del dial, 0.01 mm.

*Nota 3: Algunos diales presentan lecturas que ya vienen afectadas por la constante de la viga, caso en el cual ésta no se deberá aplicar en el cálculo de la deflexión.*

**10.2** Si el ensayo se ha realizado con una viga doble, la deflexión de la segunda viga,  $d_{i25}$ , se calcula de la misma manera a partir de las dos lecturas de su dial.

**10.3** Si las medidas se realizaron con una viga doble, se calcula el radio de curvatura en el sitio de ensayo, con la expresión:

$$RC = \frac{3125}{d_i - d_{i25}} \quad [795.2]$$

Donde: RC: Radio de curvatura, m (Tabla 795 - 2);

$d_i$ : Deflexión recuperable en el eje vertical de la carga, 0.01 mm;

$d_{i25}$ : Deflexión recuperable a 25 cm del eje vertical de la carga, 0.01 mm.

**10.4** Corrección de la deflexión por temperatura:

**10.4.1** Se considera como deflexión patrón, la que se produce cuando las capas asfálticas del pavimento se encuentran a 20° C.

**10.4.2** Las deflexiones medidas a temperaturas diferentes a 20° C se deberán corregir cuando el espesor de las capas asfálticas sea igual o mayor a 5 cm, empleando la expresión:

$$F_T = \frac{1}{1 + [8 \times 10^{-4} \times H_a \times (T - 20)]} \quad [795.3]$$

Donde:  $F_T$ : Factor de corrección;

$H_a$ : Espesor de las capas asfálticas, cm;

T: Temperatura de las capas asfálticas en el instante del ensayo, ° C.

Tabla 795 - 2. Tabla para la determinación del radio de curvatura

Diferencia $d_i - d_{i25}$ (0,01 mm)	Radio de Curvatura m	Diferencia $d_i - d_{i25}$ (0,01 mm)	Radio de curvatura m	Diferencia $d_i - d_{i25}$ (0,01 mm)	Radio de curvatura m
1	3125	28	112	55	57
2	1562	29	108	56	56
3	1042	30	104	57	55
4	781	31	101	58	54
5	625	32	98	59	53
6	521	33	95	60	52
7	446	34	92	61	51
8	391	35	89	62 - 63	50
9	347	36	87	64	49
10	312	37	84	65	48
11	284	38	82	66 - 67	47
12	260	39	80	68	46
13	240	40	78	69 - 70	45
14	223	41	76	71	44
15	208	42	74	72 - 73	43
16	195	43	73	74 - 75	42
17	184	44	71	76 - 77	41
18	174	45	69	78 - 79	40
19	164	46	68	80 - 81	39
20	156	47	66	82 - 83	38
21	149	48	65	84 - 85	37
22	142	49	64	86 - 88	36
23	136	50	63	89 - 90	35
24	130	51	61	91 - 93	34
25	125	52	60	94 - 96	33
26	120	53	59	97 - 99	32
27	116	54	58	100	31

**10.5 Procesamiento de la información** – Para cada sub-tramo de pavimento de comportamiento homogéneo se definirá una deflexión promedio ( $d_m$ ) y una deflexión característica ( $d_c$ ), obtenidas con las expresiones:

$$d_m = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad [795.4]$$

$$d_c = d_m + Z_r \times \sigma \quad [795.5]$$

- Donde:  $d_i$ : Deflexión recuperable en el eje vertical de la carga en cada punto de ensayo, 0.01 mm;
- $Z_r$ : Factor que depende del grado de confiabilidad deseado en la deflexión característica (Tabla 795 - 3);
- $\sigma$ : Desviación estándar de los valores de deflexión en el sub-tramo, obtenida con la expresión:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (d_i - d_m)^2}{n - 1}} \quad [795.6]$$

Tabla 795 - 3. Valores de  $Z_r$  por aplicar a la desviación estándar para diferentes niveles de confiabilidad

CONFIABILIDAD (%)	$Z_r$
50	0.000
75	0.674
85	1.037
90	1.282
95	1.645
97	1.881
98	2.054
99	2.327

## 11 INFORME

---

- 11.1** Para cada serie de medidas se indicarán la carga del eje trasero y de sus sistemas de rueda dual, así como la presión de contacto entre ruedas y pavimento.
- 11.2** Para cada punto de ensayo, el informe deberá incluir la abscisa de la prueba, el estado superficial, la temperatura del pavimento y las  $d_i$  y  $d_{i25}$  (si esta última se midió), corregidas a 20° C.
- 11.3** El radio de curvatura, en metros, en cada punto de ensayo donde se haya empleado la viga doble.
- 11.4** Gráficos representando las deflexiones individuales y los radios de curvatura a lo largo del sector evaluado.
- 11.5** Las deflexiones promedio y característica de cada sub-tramo homogéneo.

## 12 NORMAS DE REFERENCIA

---

NLT 356/88

VN-E-28-77

VN-E-65-83