

## MÉTODO DE ENSAYO PARA MEDIR LA RIGIDEZ EN FLUENCIA POR FLEXIÓN A BAJAS TEMPERATURAS MEDIANTE EL REÓMETRO DE VIGA DE FLEXIÓN (BBR)

INV E – 752 – 13

### 1 OBJETO

---

- 1.1** Esta norma cubre la determinación de la rigidez o fluencia en flexión bajo carga constante de ligantes asfálticos, mediante un reómetro de viga de flexión. Es aplicable a materiales con valores de rigidez en flexión entre 20 MPa y 1 GPa (valores de deformabilidad en flexión de  $50 \text{ nPa}^{-1}$  a  $1 \text{ nPa}^{-1}$ ) y puede ser usado con material original o envejecido de acuerdo con los métodos de las normas INV-720 (RTFOT) o INV E-751 (PAV). El equipo de ensayo está diseñado para operar en un rango de temperatura desde  $-36$  hasta  $0^{\circ} \text{C}$ .
- 1.2** Los resultados obtenidos no son válidos para vigas de ligante asfáltico que se deflecten más de 4 mm o menos de 0.08 mm, cuando se ensayen de acuerdo con esta norma.
- 1.3** Esta norma reemplaza la norma INV E 752-07.

### 2 DEFINICIONES

---

**2.1** *Definiciones básicas:*

- 2.1.1** *Ligante asfáltico* – Cemento asfáltico producido a partir del residuo de petróleo, con o sin la adición de modificadores orgánicos no particulados.
- 2.1.2** *Endurecimiento físico* – Rigidización de los ligantes asfálticos dependiente del tiempo, la cual resulta del incremento retardado de rigidez cuando el asfalto es almacenado a bajas temperaturas. El incremento de rigidez debido a endurecimiento físico es reversible al elevar la temperatura.

## 2.2 Descripción de términos específicos de esta norma:

- 2.2.1** *Flujo plástico (creep) por flexión* – Para el propósito de este método, se usa este término para definir cualquier característica del ligante asfáltico que se determina en un ensayo de flujo plástico a la flexión, en el cual una viga simplemente apoyada es solicitada bajo carga constante en su punto medio, midiéndose la deflexión de la viga ( $\delta t$ ) con respecto al tiempo de carga. Cualquier propiedad que sea determinada a partir de los datos registrados en un ensayo como el descrito, es una propiedad de flujo plástico o *creep*.
- 2.2.2** *Rigidez flexural medida en flujo plástico,  $S_m(t)$*  – Relación entre el máximo esfuerzo de flexión y la máxima deformación a la flexión en la viga.
- 2.2.3** *Rigidez estimada en flujo plástico,  $S(t)$*  – Rigidez en flujo plástico, obtenida por ajuste de un polinomio de segundo orden al logaritmo de la rigidez medida a 8.0, 15.0, 30.0, 60.0, 120.0 y 240.0 segundos y el logaritmo del tiempo.
- 2.2.4** *Deformabilidad flexural en flujo plástico,  $D(t)$*  – Relación entre la máxima deformación de flexión y el máximo esfuerzo de tensión en la viga.  $D(t)$  es el inverso de  $S(t)$ .  $S(t)$  ha sido usado tradicionalmente en la tecnología del asfalto mientras que  $D(t)$  es comúnmente usado en estudios de visco-elasticidad.
- 2.2.5** *Valor  $m$*  – Valor absoluto de la pendiente de las curvas del logaritmo de la rigidez contra el logaritmo del tiempo.
- 2.2.6** *Carga de contacto ( $35 \pm 10$  mN)* – Carga requerida para mantener contacto positivo entre la viga y el vástago de carga.
- 2.2.7** *Carga de asentamiento ( $980 \pm 50$  mN)* – Carga de 1 s de duración, requerida para asentar la viga.
- 2.2.8** *Carga de ensayo ( $980 \pm 50$  mN)* – Carga de 240 s de duración, requerida para determinar la rigidez del material ensayado.
- 2.2.9** *Tiempo cero del ensayo* – Tiempo en segundos, en el cual se envía la señal a la válvula solenoide para cambiar desde el regulador de carga cero (carga de contacto) al regulador de carga de ensayo (carga de ensayo).

### 3 RESUMEN DEL MÉTODO

---

- 3.1** El reómetro de viga de flexión mide la deflexión en el punto medio de una viga de ligante asfáltico simplemente apoyada, sometida a una carga constante aplicada en su punto medio. El dispositivo opera sólo en el modo de carga, es decir, no se obtienen mediciones de recuperación.
- 3.2** Se coloca una viga de ensayo en un baño de fluido a temperatura controlada y se somete a carga constante por 240 s. La carga de ensayo ( $980 \pm 50$  mN) y la deflexión del punto medio de la viga se registran usando un sistema computarizado de monitoreo durante el ensayo.
- 3.3** La tensión máxima de flexión en el punto medio de la viga se calcula a partir de las dimensiones de la viga, la luz (distancia entre apoyos) y la carga aplicada a la viga, para tiempos de carga de 8, 15, 30, 60, 120 y 240 s. La máxima deformación unitaria de flexión en la viga se calcula para los mismos intervalos de tiempo de carga, a partir de las dimensiones y la deflexión de la viga. La rigidez de la viga para los tiempos de carga especificados se calcula dividiendo el esfuerzo máximo por la deformación unitaria máxima.
- 3.4** Para verificar que la carga completa de ensayo ( $980 \pm 50$  mN) se aplica dentro de los primeros 0.5 s, se informan la carga y deflexión a los 0.0 y 0.5 s. Estos datos no se usan en los cálculos de la rigidez ni del “valor m” y no deberían ser considerados para representar propiedades del material. El tiempo de elevación de la carga (tiempo para aplicar la carga total) se puede ver afectado por la operación inapropiada de los reguladores de presión, por una presión de aire inapropiada, por mal funcionamiento de los sistemas de aire (fricción) y otros factores. Al reportar las señales a los 0.0 y 0.5 s, el usuario de los resultados del ensayo puede determinar las condiciones de carga.

### 4 IMPORTANCIA Y USO

---

- 4.1** La temperatura de ensayo está relacionada con las temperaturas experimentadas por el pavimento en el área geográfica en la cual se contempla el empleo del ligante asfáltico.
- 4.2** La rigidez o la deformabilidad flexural en flujo plástico (*creep*), determinadas a partir de este ensayo, describen la respuesta esfuerzo – deformación – tiempo del ligante asfáltico a baja temperatura, en el rango de temperaturas de ensayo dentro del cual la respuesta es visco-elástica lineal.

- 4.3** El comportamiento de las mezclas asfálticas al agrietamiento térmico a bajas temperaturas está relacionado con la rigidez en flujo plástico y el “valor m” (pendiente de la curva del logaritmo de la rigidez en flujo plástico versus el logaritmo del tiempo de carga), del ligante asfáltico contenido en la mezcla.
- 4.4** La rigidez flexural al flujo plástico y el “valor m” se usan como criterio de desempeño del ligante asfáltico, de acuerdo con la especificación Superpave para los diferentes grados de los cementos asfálticos.

## 5 EQUIPO

- 5.1** *Sistema de ensayo reómetro de viga de flexión (BBR)*(Figura 752 - 1) – El sistema de ensayo reómetro de viga de flexión consiste en: (1) un marco de carga que permite que la viga de ensayo, los soportes y la parte inferior del marco de ensayo estén sumergidos en un baño fluido a temperatura constante; (2) un baño líquido a temperatura controlada que permite mantener la viga de asfalto a la temperatura de ensayo y que provee una fuerza capaz de contrarrestar la fuerza resultante de la masa de la viga; (3) un componente de registro de datos controlado automáticamente por un computador; (4) moldes para las probetas; (5) elementos necesarios para calibrar y/o verificar el BBR.



Figura 752 - 1. Reómetro de viga de flexión

- 5.1.1** *Marco de carga* – El marco de carga consiste en soportes para la muestra, un vástago de punta redondeada que aplique la carga en el punto medio de la probeta, una celda de carga montada en el vástago,

instrumentos para reducir a cero la carga sobre la probeta, instrumentos para aplicar una carga constante al vástago de carga y un transductor medidor de deflexión adosado al vástago de carga. La Figura 752 - 2 muestra un esquema del dispositivo.

**5.1.1.1** *Sistema de carga* – Un sistema capaz de aplicar una carga de contacto de  $35 \pm 10$  mN a la probeta de prueba y mantener una carga de prueba de  $980 \pm 50$  mN.

**5.1.1.2** *Requerimientos para el sistema de carga* – El tiempo para alcanzar la carga de prueba debe ser menor de 0.5 s. En ese tiempo, la carga de contacto debe subir de  $35 \pm 10$  mN a la carga de prueba de  $980 \pm 50$  mN. Durante el tiempo para alcanzar la carga, el sistema debe amortiguar la carga de prueba a  $980 \pm 50$  mN. Entre 0.5 y 5.0 s, la carga de la prueba deberá estar en  $\pm 50$  mN de la carga media de ensayo y, después de esto, estará dentro de  $\pm 10$  mN de dicha carga.

**5.1.1.3** *Apoyos para la muestra* – Apoyos transversales para la viga de asfalto, consistentes en una base y un soporte horizontal con una superficie superior curva de radio  $3.0 \pm 0.25$  mm y costados inclinados en un ángulo de  $45^\circ$  con la horizontal (ver Figura 752 - 2). Los apoyos, hechos de acero inoxidable (u otro material resistente a la corrosión), deben estar separados  $102.0 \pm 1.0$  mm entre sí. El ancho útil del soporte será de  $9.5 \pm 0.25$  mm. Esto se requiere para asegurar que los bordes de la viga, resultantes del proceso de moldeado, no interfieran con la medición de la deflexión del espécimen en su punto medio durante el ensayo. Además, los apoyos deben incluir pasadores de alineamiento vertical de 2 a 4 mm de diámetro, colocados en la parte posterior de los soportes de cada muestra a  $6.75 \pm 0.25$  mm del centro de ellos. Estos pasadores deben ser colocados sobre el lado posterior de los apoyos para alinear la probeta en el centro de ellos. Ver detalles en la Figura 752 - 2.

**5.1.1.4** *Vástago de carga* – Vástago de punta redondeada, con superficie de contacto esférica, de radio  $6.25 \pm 0.30$  mm, continua con una celda de carga y un transductor medidor de deflexión, capaz de aplicar una carga de contacto de  $35 \pm 10$  mN, y de mantener una carga constante de ensayo de  $980 \pm 50$  mN. La elevación de la carga de ensayo se debe producir

en menos de 0.5 s. Durante el tiempo de elevación de la carga, el sistema deberá amortiguar la carga luego de los primeros 5 s a un valor constante  $\pm 10$  mN.

**5.1.1.5** *Celda de carga* – Con una capacidad mínima de 2000 mN, y una resolución mínima de 2.5 mN, montada en línea con el vástago de carga y por encima del fluido del baño, para medir la carga de contacto y la carga de ensayo.

**5.1.1.6** *Transductor lineal diferencial variable (TLDV)* – Un transductor lineal diferencial variable u otro dispositivo montado axialmente sobre el vástago de carga, capaz de registrar un movimiento lineal menor o igual a  $2.5 \mu\text{m}$ , con un rango de al menos 6 mm para medir la deflexión de la viga de ensayo.

**5.1.2** *Baño líquido de temperatura controlada* – Capaz de mantener la temperatura en todos los puntos dentro del baño entre  $-36$  y  $0^\circ\text{C}$ , con un margen de  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ . La colocación de una probeta fría en el baño puede causar que la temperatura del baño fluctúe  $\pm 0.2^\circ\text{C}$  en relación con la temperatura de ensayo objetivo; en consecuencia, se permitirán variaciones en el baño de  $\pm 0.2^\circ\text{C}$  bajo condiciones isotérmicas.

**5.1.2.1** *Agitador de baño* – Un agitador para mantener la temperatura homogénea, con una intensidad de agitación tal, que las corrientes en el fluido no perturben el proceso de ensayo ni provoquen vibraciones que produzcan variaciones en las lecturas, mayores a las especificadas en los numerales 5.1.3 y 5.1.3.1.

**5.1.2.2** *Baño de circulación (opcional)* – Unidad circuladora de fluido, separada del marco de ensayo, la cual bombea el fluido a través del baño. Si se emplea esta unidad, las vibraciones producidas por el equipo deben ser aisladas de la cámara del baño, de manera que su efecto en los registros sea menor que lo indicado en los numerales 5.1.3 y 5.1.3.1.

**5.1.3** *Sistema de adquisición de datos* – Sistema que registre la carga con una precisión de 2.5 mN, la deflexión de la viga con una precisión de  $2.5 \mu\text{m}$  y la temperatura del baño líquido con una precisión de  $0.1^\circ\text{C}$ . El sistema debe detectar el momento en el cual se envía la señal a la válvula solenoide para cambiar el regulador de carga cero (carga de

contacto) al regulador de carga de ensayo (carga de ensayo). Este instante es el tiempo cero del ensayo. Usando este instante como referencia, el sistema debe registrar las medidas de carga y deflexión relativas a partir del tiempo cero. El sistema debe registrar la carga y la deflexión a los 0.0, 0.5, 8.0, 15.0, 30.0, 60.0, 120.0 y 240 s. Cada registro será el promedio de tres o más lecturas tomadas dentro de  $\pm 0.2$  s del tiempo especificado de registro; por ejemplo, se mide para un tiempo de carga de 7.8, 7.9, 8.0, 8.1 y 8.2 s.

**5.1.3.1 Filtro de la señal** – Se puede requerir el filtrado digital o análogo de los datos de deflexión y carga para eliminar el ruido electrónico que, de lo contrario, podría afectar la capacidad del polinomio de segundo orden para ajustar los datos con suficiente exactitud y obtener una estimación confiable del “valor m”. Las señales de carga y deflexión pueden ser pasadas con un filtro digital o análogo de bajo paso, que remueva las señales de frecuencia mayores que 4 Hz. El promedio deberá ser obtenido en un período menor o igual que  $\pm 0.2$  s con respecto al tiempo especificado de registro.

**5.2 Equipo para medir la temperatura** – Transductor de temperatura calibrado, capaz de medir temperaturas con una exactitud de  $0.1^{\circ}\text{C}$  en el rango de  $-36$  a  $0^{\circ}\text{C}$ . Debe ir montado dentro de los 50 mm del punto medio de los apoyos de la probeta de ensayo.

*Nota 1: La medida de la temperatura requerida se puede llevar a cabo con un termómetro de resistencia de platino (RTD) o con una resistencia térmica calibrada apropiadamente. La calibración del RTD o la resistencia térmica puede ser verificada como se indica en el numeral 5.6. Se recomienda el uso del RTD bajo estándar DIN 43760 (Clase A). Para obtener la exactitud y la precisión requeridas, es necesario que cada RTD sea calibrado como un sistema, con su respectivo medidor o circuito electrónico.*

**5.3 Moldes para la viga de ensayo** – Moldes para producir vigas de asfalto cuyas dimensiones, una vez desmoldadas, sean de  $6.35 \pm 0.05$  mm de espesor por  $12.70 \pm 0.05$  mm de ancho y  $127 \pm 2.0$  mm de largo. Los moldes serán fabricados de aluminio liso, en las dimensiones indicadas en la Figura 752 - 3.

**5.3.1** El espesor de los dos espaciadores usados para cada molde (pequeñas piezas finales utilizadas en los moldes metálicos) se debe medir con un micrómetro y no deberá haber una variación de más de 0.05 mm entre uno y otro.

*Nota 2: Pequeños errores en el espesor de la probeta de prueba pueden tener gran efecto sobre los módulos calculados, teniendo en cuenta que el módulo es función del espesor, h, elevado al cubo.*

**5.4 Elementos para calibración o verificación** – Se requieren los siguientes elementos para verificar y calibrar el BBR:

**5.4.1** *Viga gruesa de acero inoxidable para calibrar el medidor de deformaciones y la celda de carga* – Una viga de acero inoxidable de  $6.4 \pm 0.10$  mm de espesor por  $12.7 \pm 0.25$  mm de ancho y  $127 \pm 5$  mm de largo para medir el sistema de deformación y calibrar de la celda de carga.

**5.4.2** *Viga delgada de acero inoxidable para chequeo de todo el sistema* – Una viga de acero inoxidable de  $1.3 \pm 0.3$  mm de espesor por  $12.7 \pm 0.1$  mm de ancho, por  $127 \pm 5$  mm de largo, de módulo elástico conocido (especificado por el fabricante con tres cifras significativas). El fabricante deberá medir e informar el espesor de esta viga con aproximación a 0.01 mm y el ancho con aproximación a 0.05 mm. Las dimensiones de esta viga se deben emplear para calcular el módulo durante la verificación de todo el sistema. Ver numeral 9.1.4.

**5.5 Masas estándar** – Se requieren una o más de las siguientes masas normalizadas:

**5.5.1** *Para la verificación de la calibración de la celda de carga* – Una o más masas que totalicen  $100 \pm 0.2$  g y dos masas de  $2 \pm 0.2$  g cada una (ver nota 3) para verificar la calibración de la celda de carga.

*Nota 3: En Colombia, las monedas de 20 pesos, de la serie emitida desde 2004, tienen una masa aproximada de 2 g y, por lo tanto, pueden ser convenientes para sustituir estas masas.*

**5.5.2** *Para la calibración de la celda de carga* – Cuatro masas, cada una de masa conocida  $\pm 0.2$  g e igualmente espaciadas en masa a través del rango de la celda de carga.

**5.5.3** *Para el chequeo cotidiano de todo el sistema* – Dos o más masas, cada una de masa conocida con aproximación de 0.2 g, para conducir el chequeo de todo el sistema como lo especifica el fabricante.

**5.5.4** *Exactitud de las masas* – Se debe verificar la exactitud indicada en el numeral 5.5, por lo menos una vez cada tres años.

**5.6 Termómetros calibrados** – Termómetros de líquido en vidrio, calibrados para la verificación del transductor de temperatura, con un rango adecuado y subdivisiones de  $0.1^{\circ}$  C. Estos termómetros deben estar calibrados de acuerdo con la práctica ASTM E77 por lo menos una vez al año. Un termómetro



adecuado es el denominado 62C, cuyas características relevantes son las siguientes:

RANGO	– 38 a 2° C
DIVISIONES	0.1° C
LONGITUD	379 mm
INMERSIÓN	Total

- 5.7** *Medidor de espesor* – Un medidor de espesores escalonados, para verificar las calibraciones del transductor de desplazamiento, como se describe en la Figura 752 - 4.

## 6 MATERIALES

- 6.1** *Láminas plásticas* – Plástico laminado limpio, de  $0.12 \pm 0.04$  mm de espesor, para revestir las tres caras interiores más grandes del molde de aluminio. Las láminas no deben ser deformadas por el ligante asfáltico caliente. Las transparencias para impresora láser han dado resultados adecuados.
- 6.2** *Grasa derivada del petróleo* – Se usa para adherir las láminas plásticas a las caras interiores del molde. No se pueden usar productos a base de silicona.
- 6.3** *Mezcla glicerol-talco* – Lubricante usado como desmoldante para revestir las piezas extremas de los moldes de aluminio. Para este propósito, se puede utilizar una mezcla de 20 % en peso de glicerina grado USP y 80 % de talco grado USP o caolín (arcilla china).
- 6.4** *Fluido para el baño térmico* – Un fluido que no sea absorbido por el ligante asfáltico y que no afecte sus propiedades. La densidad del fluido no debe exceder  $1.05 \text{ g/cm}^3$  en el rango de temperaturas de ensayo. El fluido debe ser transparente para el rango de temperaturas de ensayo. Resultan adecuados fluidos como el etanol, el metanol y mezclas de glicolmetanol (por ejemplo, 60 % glicol, 15 % de metanol y 25 % de agua). No se deben utilizar fluidos de silicona ni mezclas que la contengan.

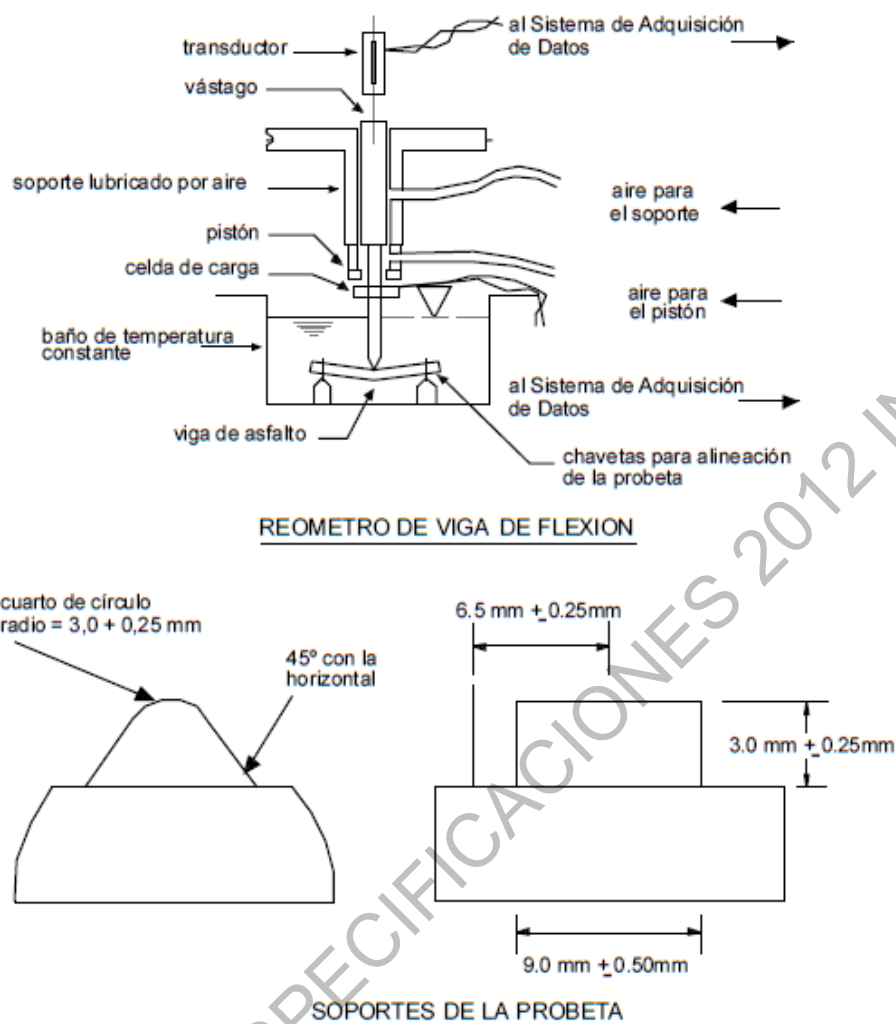


Figura 752 - 2. Representación esquemática de un reómetro de viga de flexión

## 7 PELIGROS

- 7.1 Se deben observar los procedimientos de seguridad normalizados cuando se esté calentando el ligante asfáltico y preparando las probetas de prueba.
- 7.2 Los baños de alcohol son inflamables y tóxicos. Por lo tanto, se debe localizar el baño térmico en un área bien ventilada, ubicada lejos de fuentes de ignición. Se debe evitar la respiración de los vapores del alcohol y el contacto del fluido del baño con la piel.
- 7.3 El contacto entre el fluido del baño y la piel a las bajas temperaturas usadas en este método de prueba puede causar quemaduras.

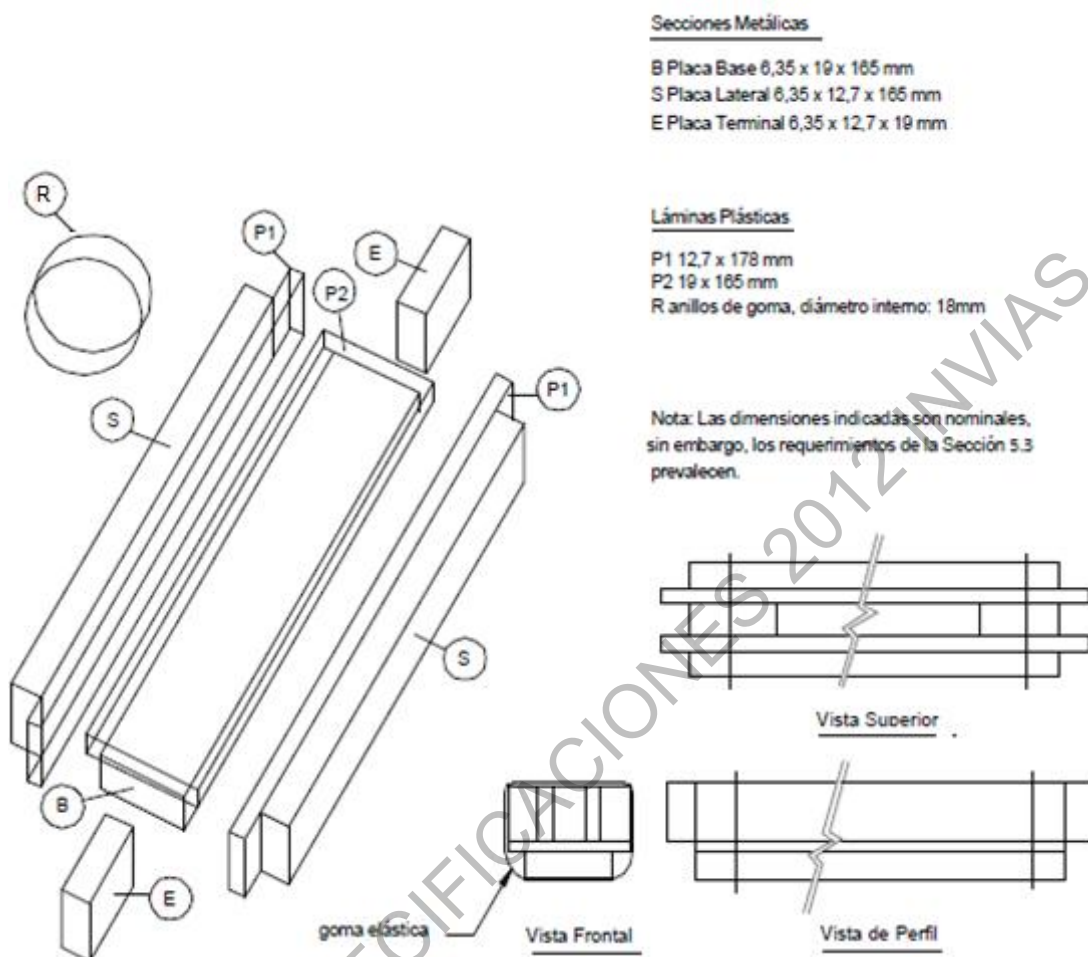


Figura 752 - 3. Dimensiones y especificaciones para los moldes de aluminio

## 8 PREPARACIÓN DEL EQUIPO

- 8.1** Se limpian los apoyos, la cabeza de carga y el baño de fluido de cualquier partícula o revestimiento, en caso necesario.

*Nota 4: Debido a la fragilidad del ligante asfáltico a las temperaturas a las que se realiza este ensayo, es posible que en el líquido del baño se introduzcan pequeños fragmentos de ligante. Si estos fragmentos se ubican en los apoyos o en la cabeza de carga, se afectará la deflexión medida. Los fragmentos pequeños, debido a su tamaño, se deformarán al ser cargados y agregarán una deflexión aparente a la viga. El uso de filtros puede ayudar a mantener los requerimientos de limpieza del baño.*

- 8.2** Se selecciona la temperatura de ensayo y se ajusta el baño líquido a la temperatura seleccionada. Se espera hasta que la temperatura se estabilice y luego se permite el equilibrio del baño a la temperatura de ensayo  $\pm 0.1^\circ \text{C}$ .

- 8.3** Se activa el sistema de adquisición de datos y se carga el software como se explica en el manual del fabricante para el sistema de ensayo.

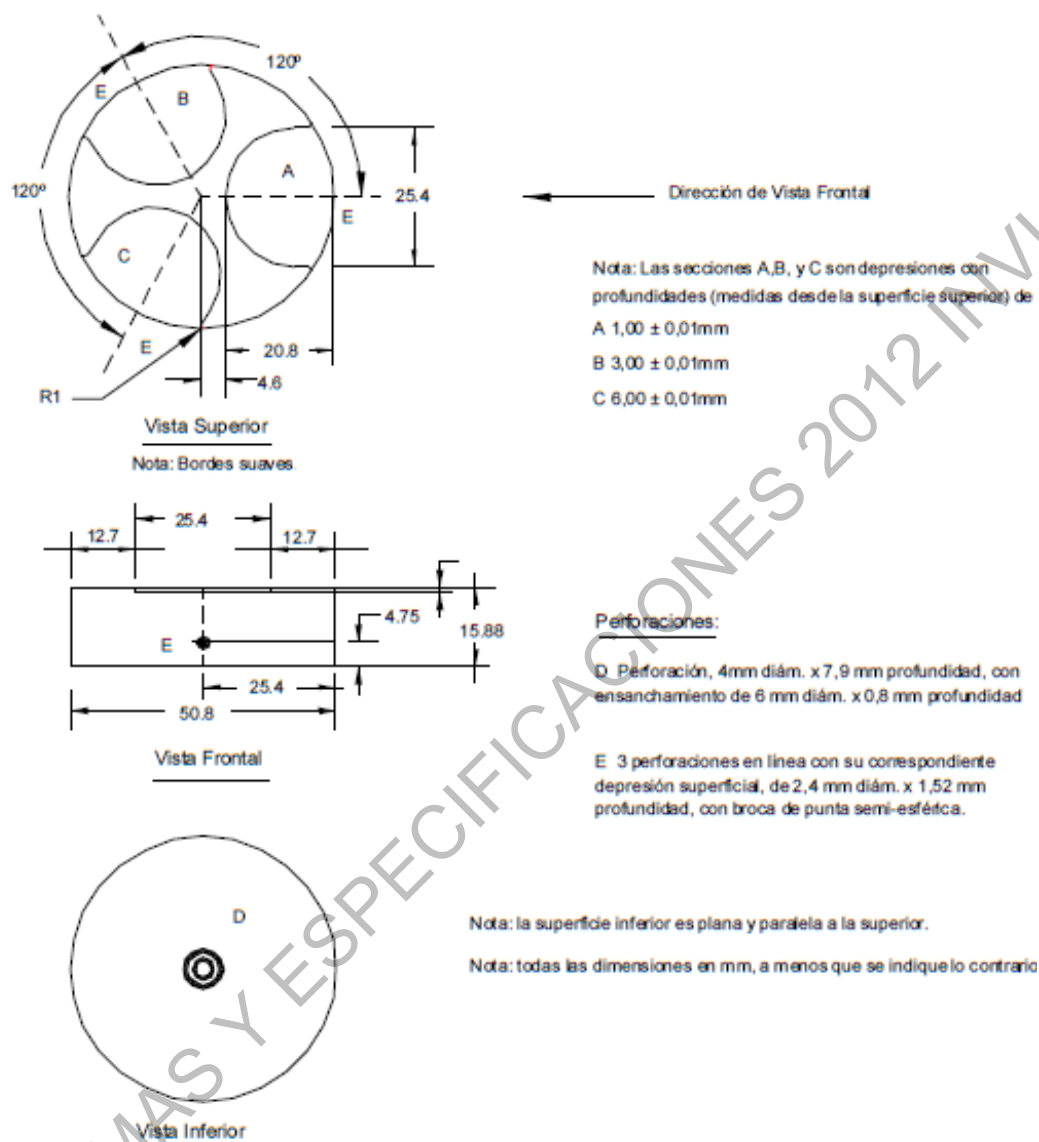


Figura 752 - 4. Medidor típico de espesores usado para calibrar el sensor de deflexión

## 9 NORMALIZACIÓN

- 9.1** Se verifica la calibración del transductor de desplazamiento, de la celda de carga y del transductor de temperatura, tal como se describe en los numerales 9.1.1 a 9.1.6. Cada uno de los pasos de verificación se debe realizar, como mínimo, con la frecuencia descrita en los diferentes numerales de esta

Sección. Se pueden realizar pasos adicionales de acuerdo con las recomendaciones del fabricante. En el Anexo A se describen los procedimientos de calibración. A opción del fabricante, se pueden combinar los pasos de verificación y de calibración.

**9.1.1** *Verificación de la libre operación del sistema de colchón de aire* – Diariamente, antes de realizar los ensayos, se debe verificar que el sistema de colchón de aire se encuentra operando libremente y está libre de fricción. Los numerales 9.1.1.1 y 9.1.1.2 se usarán para verificar que el vástago esté libre de fricción. Si los requisitos de estos numerales no son satisfechos, ello significa que hay fricción en el colchón de aire. Se debe limpiar el vástago y ajustar la luz del transductor de desplazamiento según las instrucciones del fabricante. Si esto no elimina la fricción, se debe discontinuar el uso del BBR y consultar al fabricante.

*Nota 5: La fricción puede ser causada por un ajuste deficiente del núcleo del transductor de desplazamiento que lo hace rozar contra su carcasa, por una acumulación de ligante asfáltico en el eje de carga, así como por aceite u otras partículas en el suministro de aire, y otras causas.*

**9.1.1.1** Se coloca en los apoyos de la muestra la viga delgada de acero que se usa para el cero del regulador de carga (numeral 5.4.2), y se aplica a la viga una carga de  $35 \pm 10$  mN. Se observa la lectura del TLDV como se indica en el sistema de adquisición de datos. Se agarra suavemente el eje y se alza unos 5 mm, observando la lectura del TLDV. Cuando el vástago se libera, inmediatamente sufre un leve desplazamiento hacia abajo y hace contacto con la viga.

**9.1.1.2** Se remueve cualquier viga de los apoyos. Se usa el regulador de carga cero para ajustar el vástago de carga hasta que se esté desplazando libremente, aproximadamente en el punto medio de su recorrido vertical. Se añaden suavemente 2 g de masa a la plataforma de carga. El vástago deberá descender suavemente bajo la masa.

**9.1.2** *Verificación del transductor de desplazamiento* – Diariamente, antes de realizar los ensayos, se debe verificar la calibración del transductor de desplazamiento usando un calibrador escalonado, de dimensiones conocidas, similar al mostrado en la Figura 752 - 4. Con el marco de carga montado en el baño a la temperatura de ensayo, se remueven todas las vigas de los soportes y se coloca el calibrador en una

plataforma de referencia bajo el vástago de carga según las instrucciones del fabricante. Se aplica una masa  $100 \pm 0.2$  g en el vástago de carga y se mide con el transductor de desplazamiento la elevación de los escalones con respecto al borde superior de la superficie del medidor. Se comparan los valores de las medidas indicadas por el sistema de adquisición de datos con las dimensiones conocidas. Si las dimensiones del bloque y las indicadas por el sistema de adquisición de datos difieren en más de  $\pm 5 \mu\text{m}$  se requiere una calibración. Se realiza la calibración y se repite lo indicado en el numeral 9.1.1. Si no se pueden reunir los requisitos de este numeral después de la calibración, se discontinúa el uso del dispositivo y se consulta al fabricante.

**9.1.3 Verificación de la celda de carga** – Se verifica la calibración de la celda como sigue:

**9.1.3.1 Carga de contacto** – Diariamente, se verifica la calibración de la celda de carga en el rango de la carga de contacto. Se coloca sobre los apoyos la viga de acero de 6.4 mm de espesor (numeral 5.4.1). Se aplica una carga de  $20 \pm 10$  mN a la viga, usando el regulador de presión de carga cero. Se agrega a la plataforma de carga la masa de  $2.0 \pm 0.2$  g como está especificado en el numeral 5.5.1. El aumento en la carga desplegada por el sistema de adquisición de datos deberá ser  $20 \pm 5$  mN. Se agrega una segunda masa de  $2.0 \pm 0.2$  g en la plataforma de carga. El aumento en la carga desplegada por el sistema de adquisición de datos deberá ser  $20 \pm 5$  mN. Si los aumentos en la carga desplegada no son de  $20 \pm 5$  mN, se requiere una calibración. Si no se pueden reunir los requisitos de este numeral después de la calibración, se suspende el uso del dispositivo y se consulta al fabricante.

**9.1.3.2 Carga de ensayo** – Diariamente, antes de realizar cualquier ensayo, se debe verificar la calibración de la celda de carga en el rango de la carga de ensayo. Se coloca sobre los apoyos la viga de acero de 6.4 mm de espesor (numeral 5.4.1). Se usa el regulador de carga cero (carga de contacto) para aplicar una carga a la viga de  $20 \pm 10$  mN. Se adiciona una masa de 100 g a la plataforma de carga. El aumento de carga desplegada en el sistema de adquisición de datos debe ser de  $981 \pm 5$  mN. De lo contrario, se debe calibrar la celda de carga. Si los requisitos de este numeral no se satisfacen después de la

calibración, se debe discontinuar el uso del dispositivo y consultar al fabricante.

- 9.1.4** *Chequeo diario del sistema total* – Diariamente, antes de realizar cualquier prueba y con el marco de carga montado en el baño, se realiza un chequeo del funcionamiento total del sistema. Se coloca la viga delgada de acero de  $1.3 \pm 0.3$  mm de espesor y de módulo conocido, sobre los apoyos de la muestra como se describe en el numeral 5.4.2. Siguiendo las recomendaciones del fabricante, se coloca la viga en los soportes y se aplica una masa inicial de  $50.0$  o  $100.0 \pm 0.2$  g ( $491$  o  $981$  mN  $\pm 2$  mN) a la viga, para asegurar que quede bien asentada en contacto completo con los apoyos. Siguiendo las instrucciones del fabricante, se aplica una segunda carga adicional de  $100.0$  a  $300.0 \pm 0.2$  g a la viga. El software proporcionado por el fabricante debe usar el cambio de carga y el cambio asociado en la deflexión para calcular el módulo de la viga con tres cifras significativas. El módulo reportado por el software deberá estar dentro del 10 % del módulo informado por el fabricante de la viga; de lo contrario, el funcionamiento global del BBR será considerado dudoso y se deberá consultar al fabricante.
- 9.1.5** *Verificación del transductor de temperatura* – Diariamente, antes de realizar las pruebas, y siempre que la temperatura de ensayo se cambie, se debe verificar la calibración del detector de temperatura empleando un termómetro calibrado como se indica en el numeral 5.6. Con el marco de carga montado en el líquido del baño, se sumerge el termómetro en el baño, cerca del transductor de temperatura, y se compara la temperatura indicada por el termómetro calibrado con la que despliega el sistema de adquisición de datos. Si la temperatura indicada por el sistema no concuerda con la del termómetro de mercurio dentro de  $\pm 0.1^\circ$  C, se requiere calibración.
- 9.1.6** *Verificación de la alineación anverso/reverso del vástago de carga* – Cada seis meses, se debe verificar la alineación del vástago carga con el centro de los apoyos de la muestra, empleando un calibrador de alineación proporcionado por el fabricante o mediante la siguiente medición: Se corta una tira de papel blanco de unos 25 mm de longitud y ligeramente más estrecha que la viga de deformación. Se pega con cinta la tira de papel al centro de la viga de deformación. Se saca el marco de carga del baño, se pone la viga de deformación sobre los apoyos y se coloca un trozo pequeño de papel carbón sobre el papel blanco. Se aplica presión de aire para empujar el vástago hacia abajo

causando una impresión del papel carbón en el papel blanco. Se retira la viga y se mide la distancia desde el centro de la impresión hasta cada borde de la viga con un par de calibradores de nonio. La diferencia entre las dos medidas debe ser 1.0 mm o menor. Si este requisito no se cumple, se debe contactar con el fabricante del dispositivo.

## 10 PREPARACIÓN DE LOS MOLDES Y ESPECÍMENES DE ENSAYO

- 10.1** Para preparar los moldes, se extiende una capa muy delgada de grasa (derivada del petróleo), sólo lo suficiente para sostener el plástico al molde, sobre las caras interiores de las tres piezas más largas del molde de aluminio. Se colocan las láminas plásticas sobre las caras de las piezas de aluminio y se frota el plástico con el dedo aplicando una presión firme. Se ensambla el molde como lo muestra la Figura 752 - 3, usando los anillos de goma, para sostener juntas las piezas del molde. Se inspecciona el molde y se presiona la película plástica contra el aluminio para expulsar cualquier burbuja de aire. Si persisten las burbujas de aire, se desarma el molde y se vuelve a aplicar grasa sobre las caras de aluminio. Se cubren las caras interiores de las dos piezas extremas con una película delgada de glicerol y talco, para prevenir que el ligante asfáltico se adhiera a las piezas extremas de aluminio. Una vez ensamblados los moldes, se almacenan a temperatura ambiente hasta verter el ligante asfáltico.

*Nota 6: El espesor del espécimen está controlado por las piezas extremas. El espesor de las piezas extremas se debe medir periódicamente para asegurar que cumplen los requerimientos del numeral 5.3. La rigidez es proporcional a la tercera potencia del espesor.*

- 10.2** Si se ensaya asfalto original, se deben obtener muestras de ensayo según la norma INV E-701.
- 10.3** Se calienta el material hasta que esté suficientemente fluido para poderlo verter. Si el ligante asfáltico no se deja verter fácilmente cuando se calienta en el horno a 165° C, se puede calentar elevando la temperatura del horno a 180° C hasta que alcance la fluidez necesaria para verterlo.

*Nota 7: Se recomiendan temperaturas mínimas de vertido que produzcan una consistencia equivalente al aceite de motor SAE 10W30 a temperatura ambiente (de fácil vertido, pero no excesivamente fluido). Se debe evitar el calentamiento de ligantes asfálticos no envejecidos, a temperaturas superiores a 135° C. Sin embargo, con algunos asfaltos modificados o ligantes muy envejecidos, se pueden requerir temperaturas de vertido sobre 135° C. El residuo obtenido del ensayo de envejecimiento acelerado en cámara de presión (norma INV E-751 PAV) debe ser puesto en bandejas de TFOT (norma INV E-721) y puede ser calentado hasta 163° C. En todos los casos, el tiempo de calentamiento debe ser el mínimo posible. Estas precauciones ayudarán a evitar el endurecimiento por oxidación y la pérdida de volátiles que endurecerán aun más la muestra asfáltica. Durante el proceso de calentamiento, la muestra deberá ser cubierta y agitada ocasionalmente para asegurar su homogeneidad.*



**10.4 Moldeo** – Se llena el molde con asfalto, vertiéndolo desde un extremo del molde hacia el otro, sobrellenando ligeramente el molde. Al verter, se debe mantener la cápsula con la muestra 20 a 100 mm por encima de la parte superior del molde, vertiendo continuamente hacia el otro extremo en un solo paso. Se deja enfriar 45 a 60 minutos a temperatura ambiente y, empleando un cuchillo o una espátula caliente, se enrasa con el borde del molde el material que rebosa en la superficie expuesta del espécimen frío. Se retira el plástico laminado (revestimiento del molde) si éste se ha distorsionado.

**10.5** Previamente al ensayo, se almacenan todas los especímenes de ensayo en sus moldes a temperatura ambiente. Se debe planificar el ensayo de manera que se realice dentro de las 4 horas siguientes al llenado de los moldes.

*Nota 8: Los incrementos tiempo-dependientes de la rigidez pueden ocurrir cuando los ligantes son almacenados a temperatura ambiente, incluso por cortos períodos de tiempo. Este incremento en la rigidez es el resultado de asociaciones moleculares y en la literatura se le denomina como endurecimiento estérico.*

**10.6** Inmediatamente antes de realizar el ensayo, se debe enfriar el molde de aluminio con asfalto en un congelador o baño de hielo a  $-5 \pm 7^{\circ}\text{C}$  durante 5 a 10 min, solo lo suficiente para rigidizar la viga de ligante asfáltico, de modo que pueda ser desmoldada con facilidad y sin distorsionarse (nota 9). Algunos grados de asfalto más blandos pueden requerir temperaturas más bajas. No se deben enfriar los moldes con las muestras en el baño de ensayo, debido a que se pueden producir fluctuaciones de temperatura en el baño que excedan de  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ .

*Nota 9: El enfriamiento excesivo puede causar un endurecimiento no deseado de la viga, lo que ocasiona un incremento en la variabilidad de los datos de ensayo.*

**10.7** Inmediatamente se retira el espécimen de molde, cuando esté lo suficientemente rígido para ser desmoldado sin que se produzcan distorsiones al desarmar el molde de aluminio (Figura 752 - 5).

*Nota 10: Se debe minimizar la distorsión de la probeta durante el desmolde. En el análisis de los datos se asume un contacto total entre la probeta y los apoyos. Una viga alabeada producirá una rigidez medida menor que la real.*



Figura 752 - 5. Viga de ligante asfáltico

## 11 PROCEDIMIENTO

- 11.1** Al ensayar una probeta para verificar el grado de desempeño, se selecciona la temperatura de ensayo adecuada usando la especificación Superpave. Después de desmoldar, se coloca inmediatamente la probeta de ensayo en el baño y se acondiciona a la temperatura de ensayo por  $60 \pm 5$  minutos.

*Nota 11: Los ligantes asfálticos pueden endurecer rápidamente cuando se mantienen a bajas temperaturas. Este efecto, llamado endurecimiento físico, es reversible cuando el ligante asfáltico es calentado a temperatura ambiente o ligeramente superior. Por ello, el tiempo de acondicionamiento debe ser cuidadosamente controlado si se desean obtener resultados repetibles.*

- 11.2** *Chequeo de la carga de contacto y de la carga de prueba* – Se debe chequear el ajuste de la carga de contacto y de la carga de prueba, con anterioridad al ensayo de cada juego de probetas. Se debe usar la viga de acero inoxidable de 6.35 mm de espesor para el chequeo de las cargas de contacto y de ensayo.

*Nota 12: No se deben realizar estos chequeos con la viga delgada de acero o con la probeta de ensayo de ligante asfáltico.*

- 11.2.1** Se coloca la viga de acero sobre los apoyos. Se incrementa suavemente la fuerza en la viga a  $980 \pm 50$  mN, usando la válvula reguladora de la carga de ensayo.

- 11.2.2** Se cambia de la carga de prueba a la carga de contacto y se ajusta la fuerza sobre la viga a  $35 \pm 10$  mN. Se deben cambiar la carga de ensayo y la de contacto cuatro veces.

- 11.2.3** Cuando se esté cambiando entre la carga de prueba y la carga de contacto, se deben mirar el vástago y la plataforma de carga para ver el

movimiento vertical. El vástago de carga deberá mantener el contacto con la viga de acero cuando se esté cambiando entre la carga de contacto y la de prueba, mientras se mantienen estas cargas a  $35 \pm 10$  mN y  $980 \pm 50$  mN, respectivamente.

**11.2.4 Acción correctiva** – Si los requisitos de los numerales 11.2.1 a 11.2.3 no se satisfacen, el dispositivo puede requerir calibración según las instrucciones del fabricante, o el vástago de carga puede estar sucio o requerir alineación (ver numeral 9.1.2). Si los requisitos de los numerales 11.2.1 a 11.2.3 no pueden ser cumplidos después de la calibración, de la limpieza, o de otra acción correctiva, se debe descartar el uso del dispositivo y consultar al fabricante.

**11.3** Se introduce en el computador que controla el sistema de ensayo la información referente a la identificación del espécimen, la carga de ensayo, la temperatura de ensayo, el tiempo en que el espécimen está dentro del baño a la temperatura de ensayo y cualquier otra información que sea de utilidad.

**11.4** Tras el acondicionamiento, se coloca la viga de ensayo sobre los apoyos y se inicia la secuencia de carga del ensayo. Durante el ensayo se debe mantener el baño a la temperatura de prueba  $\pm 0.1^\circ \text{C}$ ; de lo contrario, el ensayo se deberá rechazar.

**11.5** Se aplica manualmente a la viga una carga de contacto de  $35 \pm 10$  mN para asegurar el contacto entre ella y la cabeza de carga, durante un período no mayor de 10 s.

*Nota 13: La carga de contacto especificada se requiere para asegurar un contacto continuo entre el vástago de carga, el soporte y el espécimen. Si este contacto continuo no se establece dentro del rango de carga requerido, se obtendrán resultados erróneos. La carga de contacto se deberá aplicar incrementando suavemente la carga hasta  $35 \pm 10$  mN. Mientras ella se esté aplicando, la carga sobre la viga no deberá exceder de 45 mN y el tiempo para aplicar y ajustar la carga de contacto no deberá exceder de 10 s.*

**11.6** Se activa el sistema de prueba automático, el cual está programado para proceder como sigue:

**11.6.1** Inmediatamente después de la aplicación de la carga de contacto de 35 mN, se incrementa la carga desde  $35 \pm 10$  mN hasta la carga de asentamiento de  $980 \pm 50$  mN por  $1.0 \pm 0.1$  segundo.

*Nota 14: Las cargas de asentamiento descritas en los numerales 11.6.1 y 11.6.2 son aplicadas y retiradas automáticamente por el sistema de carga controlado por el computador y son transparentes al operador. Los datos no se registran durante la carga inicial.*

**11.6.2** Se reduce la carga a  $35 \pm 10$  mN y se permite a la viga su recuperación durante  $20.0 \pm 0.1$  segundos.

**11.6.3** Se aplica la carga de prueba, en el rango especificado en el numeral 5.1.1.2.

*Nota 15: La carga real en la viga, medida por la celda de carga, se usa para el cálculo de la tensión en la viga. La carga inicial de asentamiento de  $980 \pm 50$  mN y la carga de la prueba incluyen los  $35 \pm 10$  mN de precarga o de contacto.*

**11.6.4** Se retira la carga de la prueba y se termina el ensayo.

**11.6.5** Al final de la carga de asentamiento inicial y al final de la prueba, se debe revisar la pantalla del computador para verificar que la carga sobre la viga en cada caso retorna a  $35 \pm 10$  mN. Si la viga no retorna a  $35 \pm 10$  mN, la prueba no es válida y se debe calibrar el reómetro.

**11.7** Se remueve la probeta de los soportes y se procede con el siguiente ensayo.

## 12 CÁLCULOS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

---

**12.1** Ver Anexo A.

## 13 INFORME

---

**13.1** Se debe reportar la información de un ensayo individual, tal como se muestra en la Figura 752 - 6, incluyendo:

**13.1.1** Temperaturas máxima y mínima del baño líquido, medidas durante los 240 s del ensayo, a intervalos de 1.0 s y con aproximación a  $0.1^\circ$  C.

**13.1.2** Fecha y hora en que se aplica la carga de ensayo.

**13.1.3** Nombre del archivo con los datos del ensayo.

**13.1.4** Nombre del operador.

**13.1.5** Número de identificación de la muestra.

**13.1.6** Hora en que la viga se introduce en el baño.

**13.1.7** Hora de inicio del ensayo.

**13.1.8** Cualquier mensaje mostrado por el software durante el ensayo.

**13.1.9** Coeficiente de correlación,  $R^2$ , para el logaritmo de la rigidez versus logaritmo del tiempo, aproximado a 0.000001.

**13.1.10** Otros comentarios (máximo 256 caracteres).

**13.1.11** Constantes A, B y C, con 3 cifras significativas.

**13.1.12** Diferencia entre la rigidez medida y estimada, calculada como:

$$(\text{Estimada} - \text{Medida}) \times 100 \% / \text{Medida}$$

[752.1]

Información del ensayo					
Proyecto:	Ensayo	Temp. Objetivo:	23.0° C	Conf. Ensayo	2.199e + 008
Operador:	MCB	Temp. real:	14.8° C	Fecha	09/17/93
Espécimen:	Viga plástica B	Tiempo inmersión:	0.0 s	Const. Carga	0.24
Hora:	11:47:03	Ancho de la viga:	12.70 mm	Const. Flexión	0.0024
Fecha:	09/18/93	Espesor:	6.35 mm	Fecha	09/17/93
Archivo:	0818934.DAT				

Resultados						
t Tiempo (s)	P Fuerza (N)	d Deflexión (mm)	Rigidez Medida kPa	Rigidez Estimada kPa	Diferencia %	Valor-m
8	0.9859	0.9126	87030	87060	0.03532	0.176
15	0.9894	1.022	77990	77930	-0.08120	0.175
30	0.9913	1.158	68690	68990	0.04809	0.175
60	0.9910	1.308	61110	61110	0.004487	0.174
120	0.9908	1.475	54150	54150	-0.001551	0.174
240	0.9906	1.664	48010	48000	-0.005077	0.174

Coefficientes de regresión:  $a = 5.100$   $b = -0.1784$   $c = 0.001020$   $R^2 = 0.999996$   
 Reómetro de viga de flexión Cannon

Figura 752 - 6. Informe de un ensayo típico

**13.2** Se deben reportar la carga y la deflexión a los 0.0 y 0.5 s.

**13.3** Se presenta la información que se indica en la Figura 752 - 6 para los intervalos de tiempo de 8, 15.0, 30.0, 60.0, 120.0, y 240.0 s, incluyendo:

- 13.3.1 Tiempo de carga, aproximando a 0.1 s.
- 13.3.2 Carga, aproximada a 1.0 mN.
- 13.3.3 Deflexión de la viga, aproximada a 1  $\mu$ m.
- 13.3.4 Módulo de rigidez medido, en MPa, con 3 cifras significativas.
- 13.3.5 Módulo de rigidez estimado, en MPa, con 3 cifras significativas.
- 13.3.6 Diferencia entre el módulo de rigidez medido y el estimado, %.
- 13.3.7 “Valor m” estimado, redondeado a 0.001.
- 13.3.8 Coeficientes de regresión y ajuste de mínimos cuadrados, valor  $R^2$ .

## 14 PRECISIÓN Y SESGO

---

**14.1** *Precisión* – Los criterios para juzgar la aceptabilidad de la rigidez y de la pendiente de rigidez en flujo plástico, obtenidos con este método se muestran en la Tabla 752 - 1.

**14.1.1** *Precisión de un solo operador (Repetibilidad)* – Los valores de la columna 2 de la Tabla 752 - 1 son los coeficientes de variación que se consideran apropiados para las condiciones descritas en la columna 1. Resultados duplicados obtenidos por el mismo operador, usando el mismo equipo y en el mismo laboratorio, y durante un lapso que resulte lo más corto posible, no serán considerados dudosos a menos que la diferencia en los resultados duplicados, expresada como porcentaje del promedio, exceda los valores dados en la columna 3 de la Tabla 752 - 1.

**14.1.2** *Precisión multilaboratorio (Reproducibilidad)* – Los valores de la columna 2 de la Tabla 752 - 1 son los coeficientes de variación que se consideran apropiados para las condiciones descritas en la columna 1. Dos resultados presentados por 2 operadores diferentes, ensayando el mismo material en diferentes laboratorios, no serán considerados dudosos a menos que la diferencia de los resultados, expresada como porcentaje de su promedio, exceda los valores dados en la columna 3 de la Tabla 752 - 1.

Tabla 752 - 1. Estimativos de precisión

CONDICIÓN	COEFICIENTE DE VARIACIÓN (1s %)	RANGO ACEPTABLE ENTRE DOS RESULTADOS DE ENSAYO (d2s %)
<i>Precisión de un solo operador:</i>		
Rigidez en flujo lento, MPa	2.5	7.2
Pendiente (valor m)	1.0	2.9
<i>Precisión multilaboratorio:</i>		
Rigidez en flujo lento, Ma	6.3	17.8
Pendiente (valor m)	2.4	6.8

*Nota 16: Los valores estimados de precisión presentados en la Tabla 752 - 1, se basan en el análisis de una serie limitada de resultados de pruebas realizadas a ocho pares de muestras por diversos laboratorios habilitados de AMRL. El análisis incluyó resultados de 174 a 196 laboratorios sobre cinco grados asfálticos: PG 52 –34, PG 64 –16, PG 64 –22, PG 70–22 y PG 76–22 (SBS modificado). Los resultados promedio de rigidez a la fluencia plástica variaron de 125.4 MPa a 236.8 MPa, mientras que las pendientes oscilaron entre 0.308 y 0.374.*

*Nota 17: A manera de ejemplo, dos ensayos realizados sobre el mismo material dieron resultados de rigidez de 190.3 y 200.7 MPa, respectivamente. El promedio de estas dos medidas es 195.5 MPa. Por lo tanto, el rango aceptable de resultados es el 7.2 % de 195.5 MPa, es decir, 14.1 MPa. Como la diferencia entre 190.3 y 200.7 MPa es menor de 14.1 MPa se considera que los resultados se encuentran en el rango aceptable.*

**14.2 Sesgo** – Debido a que no hay un valor de referencia aceptable, el sesgo no se ha determinado.

## 15 NORMAS DE REFERENCIA

AASHTO T 313 – 08

### ANEXO A (Aplicación obligatoria)

#### APLICACIONES Y CÁLCULOS

**A.1 Calibración del transductor de desplazamiento** – Se debe calibrar el transductor de desplazamiento usando un calibrador de bloque escalonado de dimensiones conocidas, similar al mostrado en la Figura 752 - 4. Con el marco

de carga montado en el baño a la temperatura de ensayo, se quitan todas las vigas de los apoyos y se coloca el calibrador de bloque escalonado en la plataforma de referencia debajo del vástago de carga, según las instrucciones proporcionadas por el fabricante del dispositivo. Se aplica una masa de 100 g en el vástago de carga y se siguen las instrucciones del fabricante para obtener lecturas en el transductor de desplazamiento en cada escalón del calibrador. El software proporcionado por el fabricante convertirá las medidas a constantes de calibración en términos de  $\mu\text{m/bit}$  con tres cifras significativas y deberá incorporar automáticamente las nuevas constantes en el software. La constante de calibración debe ser repetible dentro del 10 % de una calibración a otra; de lo contrario, la operación del sistema puede ser dudosa.

- A.2** *Calibración de la celda de carga* – Se calibra la celda de carga de acuerdo con las instrucciones del fabricante, usando un mínimo de cuatro masas uniformemente distribuidas en el rango de la celda de carga. El software proporcionado por el fabricante convertirá las medidas a una constante de calibración en términos de  $\text{mN/bit}$  con tres cifras significativas y deberá incorporar automáticamente la nueva constante en el software. Las constantes de la calibración deben ser repetibles dentro del 10 % de una calibración a otra; de lo contrario, la operación del sistema puede ser dudosa. Se repite este proceso para cada temperatura de ensayo.
- A.3** *Calibración del transductor de temperatura* – Se calibra el detector de temperatura usando un termómetro calibrado de rango conveniente que reúna los requisitos del numeral 9.1.5. Se sumerge el termómetro en el baño líquido cerca del detector térmico y se compara la temperatura indicada por el termómetro calibrado con la desplegada por el detector térmico. Si la temperatura indicada por el detector térmico no coincide con la del termómetro dentro de  $\pm 0.1^\circ \text{C}$ , se deben seguir las instrucciones del fabricante para corregir la temperatura desplegada, de manera que coincida con la del termómetro calibrado.
- A.4** *Determinación de la deformación del sistema* – Se determina la deformación del sistema de acuerdo con las instrucciones del fabricante, usando un mínimo de cuatro masas uniformemente distribuidas en el rango de la celda de carga. El software de adquisición de datos debe medir la posición del desplazamiento del transductor en cada carga. La deformación se debe calcular como la deflexión medida por unidad de carga. El software proporcionado por el fabricante convertirá las medidas a deformación en términos de  $\mu\text{m/N}$  con tres cifras significativas y deberá incorporar automáticamente la deformación en el software. La medida de deformación se puede realizar como parte de la calibración de la celda de carga o como una operación separada. La medida de



deformación se deberá realizar cada vez que se calibre la celda de carga. El valor de deformación debe ser repetible dentro del 10 % de una determinación a otra; de lo contrario, el funcionamiento del sistema puede ser dudoso. Se debe repetir el proceso para cada temperatura de ensayo.

**A.5** *Resultado de un ensayo típico* – La Figura 752 - 6 presenta una tabla que muestra el resultado de un ensayo típico mediante el reómetro de viga de flexión. Se deben despreciar las medidas obtenidas y las curvas proyectadas en la pantalla del computador durante los 8 segundos iniciales de la aplicación de la carga de ensayo. Los datos obtenidos inmediatamente después de la aplicación de la carga de ensayo pueden no ser válidos debido a los efectos de carga dinámica y un aumento finito de tiempo. Se deben usar sólo los datos obtenidos entre 8 y 240 s después de aplicada la carga de ensayo, para calcular  $S(t)$  y el “valor  $m$ ”.

**A.6** *Deflexión de una viga elástica* – Utilizando la teoría elemental de flexión, la deflexión en el medio de la luz de una viga elástica prismática de sección constante, en un ensayo de flexión de tres puntos, se puede obtener aplicando las siguientes dos ecuaciones:

$$\delta = \frac{PL^3}{48EI} \quad [752.2]$$

Donde:  $\delta$ : Deflexión de la viga en el punto medio de la luz, mm;

P: Carga aplicada, N;

L: Longitud de luz, mm;

E: Módulo de elasticidad, MPa;

I: Momento de inercia, mm<sup>4</sup>.

Siendo I:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad [752.3]$$

Donde: I: Momento de inercia de la sección transversal de la viga de ensayo, mm<sup>4</sup>;

b: Ancho de la viga, mm;

h: Espesor de la viga, mm.

*Nota A.1: La probeta de prueba tiene una proporción entre el largo y la altura de 16:1 y, por lo tanto, la contribución al esfuerzo de corte puede ser despreciada.*

**A.7 Módulo elástico de flexión** – De acuerdo con la teoría elástica, el módulo de flexión de una viga prismática de sección transversal constante cargada en su punto medio, se calcula con la siguiente ecuación:

$$E = \frac{PL^3}{4bh^3\delta} \quad [752.4]$$

Donde: E: Rigidez flexural de *creep* dependiente del tiempo, MPa;

P: Carga constante, N;

L: Longitud de la luz (distancia entre apoyos), mm;

b: Ancho de la viga, mm;

h: Espesor de la viga, mm;

$\delta$ : Deflexión de la viga, mm.

**A.8 Tensión máxima de flexión** – La tensión máxima de flexión en la viga ocurre en el punto medio, en los extremos superior e inferior de la sección. La tensión máxima se calcula con la siguiente fórmula:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad [752.5]$$

Donde:  $\sigma$ : Tensión de flexión máxima en la viga, MPa;

P: Carga constante, N;

L: Longitud de la luz (distancia entre apoyos), mm;

b: Ancho de la viga, mm;

h: Espesor de la viga, mm.

- A.9 Deformación unitaria máxima de flexión** – La deformación unitaria máxima de flexión en una viga ocurre en el punto medio, en los extremos superior e inferior de la sección. La máxima deformación unitaria,  $\epsilon$ , se calcula usando la siguiente ecuación:

$$\epsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \quad [752.6]$$

Donde:  $\epsilon$ : Deformación unitaria máxima de flexión en la viga, mm/mm;

$\delta$ : Deflexión de la viga, mm;

$h$ : Espesor de la viga, mm;

$L$ : Longitud de la luz (distancia entre apoyos), mm.

- A.10 Módulo de rigidez viscoelástico lineal** – De acuerdo al principio de correspondencia elástico - viscoelástico, se puede suponer que si una viga lineal y viscoelástica es sometida a carga constante aplicada en  $t = 0$ , la distribución de la tensión es la misma que en una viga elástica bajo la misma carga. Como las deformaciones y los desplazamientos son dependientes del tiempo, éstos se pueden relacionar a partir de los casos elásticos, reemplazando  $E$  por  $1/D(t)$ . Puesto que  $1/D(t)$  es equivalente a  $S(t)$ , recomponiendo el resultado de la solución elástica se obtiene la siguiente relación para la rigidez:

$$S(t) = \frac{PL^3}{4bh^3\delta(t)} \quad [752.7]$$

Donde:  $S(t)$ : Rigidez flexural al flujo plástico (*creep*), dependiente del tiempo, MPa;

$P$ : Carga constante, N;

$L$ : Longitud de la luz (distancia entre apoyos), mm;

$b$ : Ancho de la viga, mm;

$h$ : Espesor de la viga, mm;

$\delta(t)$ : Deflexión de la viga , mm;

$\delta(t)$  y  $S(t)$ : Indican que la deflexión y la rigidez, respectivamente, son funciones del tiempo.

#### A.11 Presentación de la información:

**A.11.1** Se grafica la respuesta de la viga de ensayo a carga constante (*creep*) como el logaritmo de la rigidez con respecto al logaritmo del tiempo de carga. La Figura 752 - 6 muestra una representación típica de los datos del ensayo. Sobre el rango de tiempo de ensayo de 8 a 240 s, el gráfico de datos mostrado en la Figura 752A - 1 se puede representar por un polinomio de segundo orden como sigue:

$$\log S'(t) = A + B[\log(t)] + C[\log(t)]^2 \quad [752.8]$$

Y la pendiente,  $m$ , de la curva del logaritmo de la rigidez versus logaritmo del tiempo, en valor absoluto es igual, a:

$$|m(t)| = \frac{d[\log S'(t)]}{d[\log(t)]} = B + 2C [\log(t)] \quad [752.9]$$

Donde:  $S'(t)$ : Rigidez flexural al flujo plástico (*creep*), dependiente de  $t$ , estimada mediante la ecuación 752.8, MPa;

$t$ : Tiempo, s;

A, B y C: Coeficientes de regresión.

**A.11.2** Puede ser necesario ajustar los datos para obtener curvas suavizadas que permitan el análisis de regresión requerido para determinar el "valor  $m$ ". Este procedimiento se puede realizar promediando 5 lecturas tomadas al tiempo de lectura  $\pm 0.1$  y  $\pm 0.2$  s.

**A.11.3** Se deben obtener las constantes A, B y C a partir de ajuste por mínimos cuadrados de la ecuación 752.8. Se deben usar datos igualmente espaciados con respecto al logaritmo del tiempo para determinar los coeficientes de regresión de las dos ecuaciones del numeral A.11.1. Se deben determinar experimentalmente los valores de rigidez usados en

la regresión para derivar los coeficientes A, B y C y, a su vez, calcular los “valores  $m$ ” después de los tiempos de carga de 8, 15, 30, 60, 120 y 240 s.

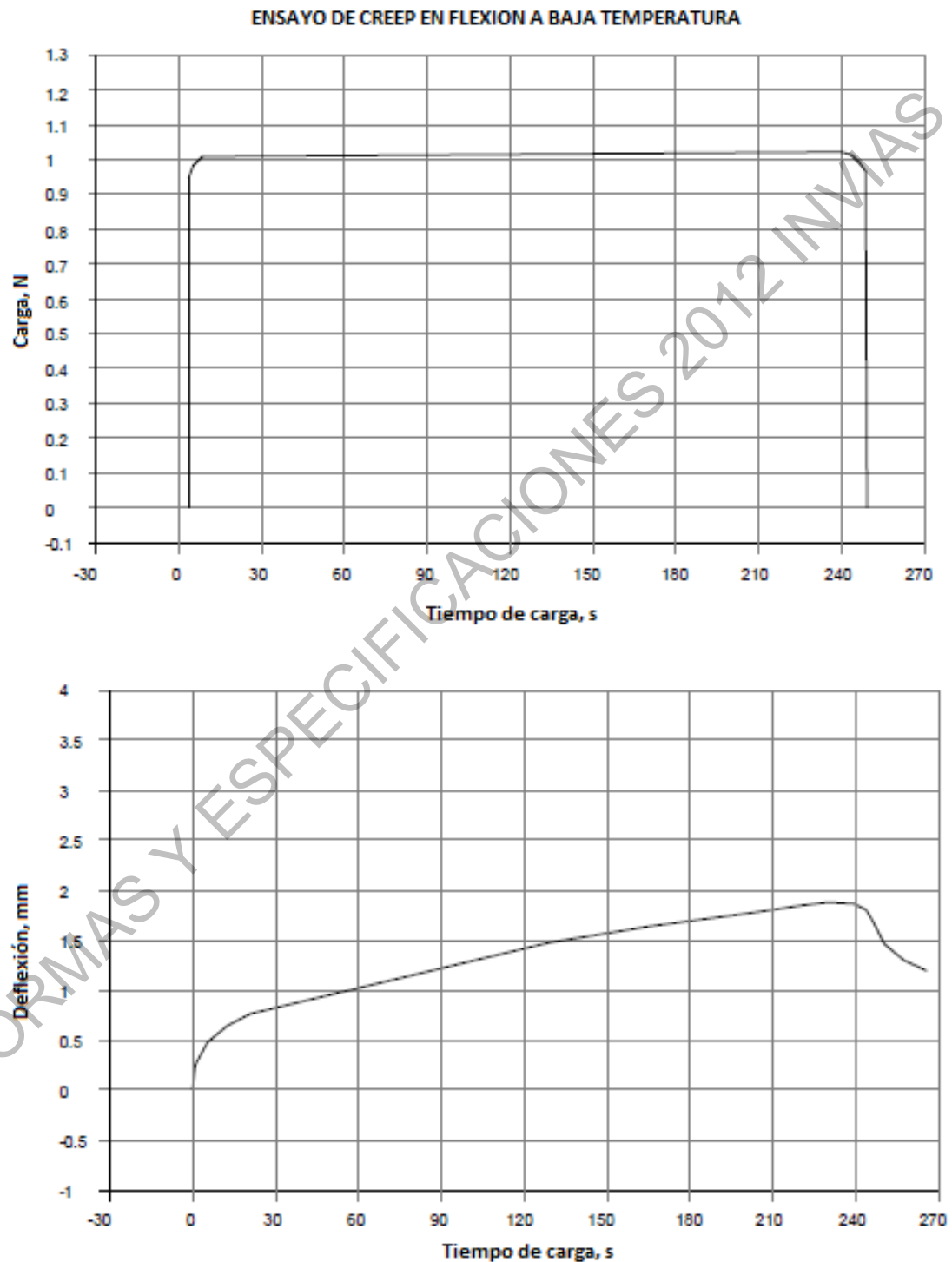


Figura 752A - 1. Dibujos típicos de carga y deflexión

**A.12** Se calculan los coeficientes de regresión y los valores estimados de rigidez y el "valor  $m$ ".

**A.12.1** Se calculan los coeficientes de regresión A, B y C de las dos ecuaciones del numeral A.11.1, y el denominador D, como sigue:

$$A = [S_y (S_{x2}S_{x4n} - S_{x3}^2) - S_{xy} (S_{x1}S_{x4} - S_{x2}S_{x3}) + S_{xxy} (S_{x1}S_{x3} - S_{x2}^2)] / D \quad [752.10]$$

$$B = [6 (S_{xy}S_{x4} - S_{xxy}S_{x3}) - S_{x1}(S_yS_{x4} - S_{xxy}S_{x2}) + S_{x2}(S_yS_{x3} - S_{xxy}S_{x2})] / D \quad [752.11]$$

$$C = [6(S_{x2}S_{xxy} - S_{x3}S_{xy}) - S_{x1}(S_{x1}S_{xxy} - S_{x3}S_y) + S_{x2}(S_{x1}S_{xy} - S_{x2}S_y)] / D \quad [752.12]$$

$$D = 6(S_{x2}S_{x4} - S_{x3}^2) - S_{x1}(S_{x1}S_{x4} - S_{x2}S_{x3}) + S_{x2}(S_{x1}S_{x3} - S_{x2}^2) \quad [752.13]$$

Donde, para tiempos de carga de 8, 15, 30, 60, 120 y 240 s:

$$S_{x1} = \log 8 + \log 15 + \dots \log 240 = S \log t_i \quad [752.14]$$

$$S_{x2} = (\log 8)^2 + (\log 15)^2 + \dots (\log 240)^2 = S (\log t_i)^2 \quad [752.15]$$

$$S_{x3} = (\log 8)^3 + (\log 15)^3 + \dots (\log 240)^3 = S (\log t_i)^3 \quad [752.16]$$

$$S_{x4} = (\log 8)^4 + (\log 15)^4 + \dots (\log 240)^4 = S (\log t_i)^4 \quad [752.17]$$

$$S_y = \log S(8) + \log S(15) + \dots \log S(240) = S \log(S(t_i)) \quad [752.18]$$

$$S_{xy} = \log S(8) \log(8) + \log S(15) \log(15) + \dots \log S(240) \log(240) = S (\log S(t_i) \log t_i) \quad [752.19]$$

$$S_{xxy} = (\log 8)^2 \log S(8) + (\log 15)^2 \log S(15) + \dots (\log(240))^2 \log S(240) = S [(\log t_i)^2 \log S(t_i)] \quad [752.20]$$

**A.12.2** Se calcula la rigidez estimada a los 8, 15, 30, 60, 120 y 240 s, como sigue:

$$\log S'(t) = A + B[\log(t)] + C[\log(t)]^2 \quad [752.21]$$

**A.12.3** Se calcula el “valor  $m$ ” estimado a los 8, 15, 30, 60, 120 y 240 s, como el valor absoluto de:

$$|m| = B + 2C[\log(t)] \quad [752.22]$$

**A.12.4** Se calcula  $S_m$  como el promedio de los valores de rigidez en 8, 15, 30, 60 120 y 240 s, como sigue:

$$\log S_m = [\log S(8) + \dots \log S(240)] / 6 = (\sum \log S(t_i)) / n \quad [752.23]$$

**A.12.5** Se calcula la fracción de variación en la rigidez, explicada por el modelo cuadrático como:

$$R^2 = 1.00 - \left[ \frac{[\log S(8) - \log S'(8)] + \dots [\log S(240) - \log S'(240)]}{[\log S(8) - \log (S_m)]^2 + \dots [\log S(240) - \log (S_m)]^2} \right] \quad [752.24]$$

**A.12.6** Se deben usar los valores estimados de rigidez y de  $m$  a 60 s para propósitos de especificación. Los valores medidos y estimados de rigidez deben concordar dentro de un 2%. De lo contrario, el ensayo se considera dudoso.