

DETERMINACIÓN DE LAS LEYES DE FATIGA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS EN CALIENTE SOMETIDAS A FLEXIÓN DINÁMICA

INV E – 784 – 13

1 OBJETO

- 1.1 Esta norma entrega los procedimientos para la determinación de las leyes de fatiga y energía de muestras de mezclas asfálticas en caliente, compactadas en laboratorio o tomadas directamente del terreno, sometidas a flexión dinámica hasta llevarlas a la falla.
- 1.2 Los especímenes para el ensayo deben tener una longitud de 380 mm, un ancho de 63 mm y una altura de 50 mm.
- 1.3 Esta norma reemplaza la norma INV E-784-07.

2 DEFINICIONES

- 2.1 *Punto de falla* – Ciclo de carga para el cual el espécimen muestra un 50 % de reducción, en relación con su rigidez inicial (Ver numeral 6.7).

3 IMPORTANCIA Y USO

- 3.1 Las leyes de fatiga y energía determinadas por esta norma se pueden usar para determinar las leyes de fatigas de capas de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente, bajo la acción de las cargas repetidas del tránsito. El comportamiento en servicio de las mezclas asfálticas se puede predecir con mayor exactitud cuando se conocen estas leyes.

4 EQUIPO

- 4.1 *Sistema de ensayo* – El sistema debe contener un mecanismo de carga axial, una cámara ambiental (opcional) y un sistema de control y de adquisición de datos (Figura 784 - 1). El sistema de ensayo debe reunir los requerimientos mínimos especificados en la Tabla 784 - 1.

- 4.1.1** *Dispositivo de aplicación de carga* – El sistema de ensayo debe incluir un componente de carga de cadena cerrada controlado por computador, el cual ajusta y aplica una carga tal, que el espécimen experimenta un nivel constante de deformación durante cada ciclo de carga, en respuesta a los comandos del componente de control y medición. Este dispositivo debe ser capaz de (1) producir cargas repetidas de forma sinusoidal en un rango de frecuencia de 5 a 10 Hz, (2) asegurar el espécimen en cuatro puntos de forma que se permita en ellos libertad de rotación y de desplazamiento horizontal, tanto para los puntos de aplicación de las cargas como en los puntos de apoyo o reacción, y (3) forzar el regreso del espécimen a su posición original (deflexión cero) al finalizar el pulso de carga (la Figura 784 - 2 ilustra las condiciones de carga).



Figura 784 - 1. Sistema de ensayo

Tabla 784 - 1. Requerimientos mínimos del sistema de ensayo

SISTEMA DE MEDIDA Y CONTROL DE CARGA	Rango: 0 a 5 kN Resolución: 2 N Precisión: 5 N
SISTEMA DE MEDIDA Y CONTROL DE DESPLAZAMIENTO	Rango: 0 a 5 mm Resolución: 2 μm Precisión: 5 μm
SISTEMA DE MEDIDA Y CONTROL DE FRECUENCIA	Rango: 5 a 10 Hz Resolución: 0.005 Hz Precisión: 0.01 Hz
SISTEMA DE MEDIDA Y CONTROL DE TEMPERATURA	Rango: -10 a 25°C Resolución: 0.25°C Precisión: $\pm 0.5^\circ\text{C}$

- 4.1.2** *Cámara ambiental (Opcional)* – La cámara ambiental debe guardar completamente el espécimen y mantenerlo a una temperatura de $20 \pm 0.5^\circ \text{C}$ durante el ensayo. La cámara no se requerirá cuando la temperatura ambiente pueda ser mantenida dentro de los límites antes indicados.
- 4.1.3** *Sistema de control y medición* – Durante cada ciclo de carga, el sistema debe ser capaz de medir la deflexión del espécimen, computar sus deformaciones y ajustar la carga de manera que el espécimen experimente un nivel constante de deformación en cada ciclo de carga. Adicionalmente, debe ser capaz de grabar los ciclos de carga, las cargas aplicadas y las deflexiones, y calcular y grabar el máximo esfuerzo a la tensión, la máxima deformación a la tensión, el ángulo de fase, la rigidez, la energía disipada y la energía disipada acumulada para los diferentes intervalos de ciclos de carga especificados por el usuario.
- 4.2** *Aparatos y materiales misceláneos* – Se requieren sierras para cortar los especímenes y un mecanismo guía para ajustar el espacio entre los dispositivos de sujeción del espécimen (mordazas). Para los dispositivos de carga que requieran una tuerca pegada para la medida de la deformación, se necesitan un tornillo, una tuerca (se sugiere de tamaño M 8×1) y un dispositivo para el montaje de transformadores lineales de voltaje diferencial (TLDV) en el eje neutro del espécimen y resina epóxica para asegurar la tuerca al espécimen.

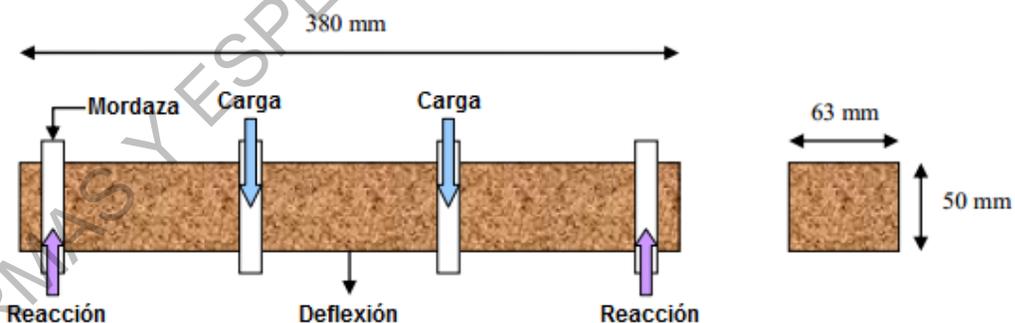


Figura 784 - 2. Características de carga en el aparato de ensayo de fatiga

5 PREPARACIÓN DE ESPECÍMENES DE ENSAYO

- 5.1** *Mezclas elaboradas y compactadas en el laboratorio* – El agregado pétreo se debe muestrear de acuerdo con la norma INV E-201 y el cemento asfáltico

según la norma INV E-701. Se deberán preparar tres especímenes en forma de viga, tomados de losas o vigas compactadas de acuerdo con algún procedimiento que resulte apropiado para el usuario.

Nota 1: El tipo de equipo de compactación puede afectar los resultados del ensayo. Se recomienda cortar las vigas de ensayo de losas mayores compactadas con un rodillo vibratorio.

Nota 2: Normalmente, los especímenes de ensayo se compactan empleando una energía de compactación normalizada. Sin embargo, esta energía pudiera no reproducir los vacíos con aire de especímenes medidos en la carretera, según la norma INV E-736. Si los especímenes se van a compactar buscando un determinado contenido de vacíos con aire, la energía correspondiente se deberá determinar experimentalmente.

- 5.2 Mezclas fabricadas en planta y compactadas en el laboratorio** – Las muestras de concreto asfáltico se deberán obtener de acuerdo con el procedimiento de la norma INV E-731. A partir de ellas, se preparan tres especímenes en forma de viga, tomados de losas o vigas compactadas de acuerdo con algún procedimiento que resulte apropiado para el usuario (Ver notas 1 y 2).
- 5.3 Especímenes extraídos del pavimento** – Su extracción se realizará acuerdo con la norma INV E-758.
- 5.4 Tamaño del espécimen de ensayo** – Se deben cortar al menos 6 mm en ambas caras del espécimen con el propósito de eliminar áreas con vacíos superficiales. Para los dispositivos de carga que requieran una tuerca pegada para la medida de la deformación, estas superficies cortadas deberán ser suaves y paralelas para permitir el montaje correcto de los deformímetros. Las dimensiones finales requeridas para los especímenes, después de cortados, son: 380 ± 6 mm de longitud, 63 ± 6 mm de base y 50 ± 6 mm de altura (Figura 784 - 3).



Figura 784 - 3. Especimen de ensayo

6 PROCEDIMIENTO

- 6.1** *Mediciones del espécimen* – La medida de la altura y del ancho del espécimen se debe dar con una aproximación de 0.01 mm en tres diferentes puntos a lo largo de los 100 mm centrales de la longitud del espécimen. Se determina el promedio de las tres mediciones para cada dimensión y se registran dichos valores con una aproximación de 0.1 mm.
- 6.2** *Colocación de la tuerca en el eje neutro del espécimen* – Se localiza el centro de una cara lateral del espécimen. Se aplica una resina epóxica alrededor de este punto central y se pega la tuerca de forma tal, que el centro de la tuerca coincida con el punto central de la cara del espécimen. Se debe evitar la aplicación de resina epóxica de manera que ocupe el orificio de la tuerca. Se permite el curado del epoxi antes de mover el espécimen. La Figura 784 - 4 ilustra la tuerca adherida en el eje neutro del espécimen.

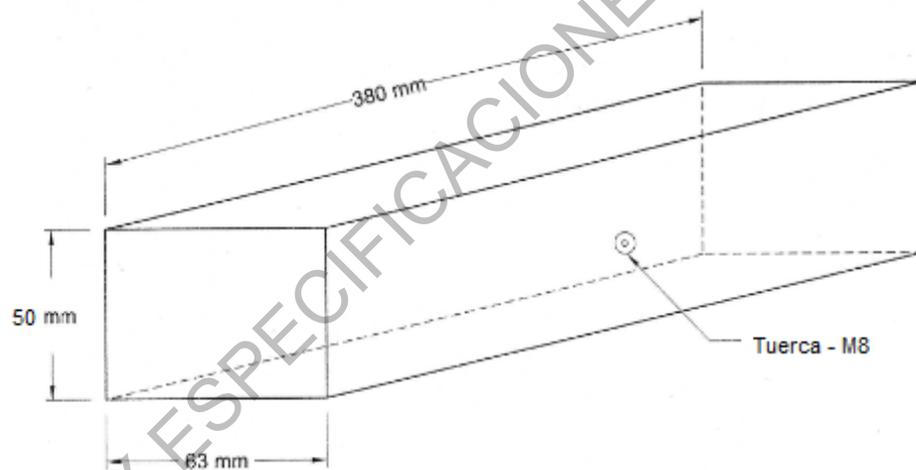


Figura 784 - 4. Tuerca adherida en el eje neutro del espécimen

- 6.3** *Temperatura de ensayo* – Se coloca el espécimen en un ambiente cuya temperatura sea $20 \pm 0.5^\circ \text{C}$, durante un período de tiempo de dos horas antes de dar comienzo al ensayo.
- 6.4** *Colocación de las mordazas* – Se abren las mordazas y se desliza el espécimen hasta que alcance la posición de ensayo (Figuras 784 - 5, 784 - 6, 784 - 7 y 784 - 8). Se debe asegurar un apropiado espaciamiento entre las mordazas, de forma que la distancia entre ellas, medida centro a centro, sea de 119 mm. Cuando el espécimen y las mordazas se encuentren en posición, se cierran las mordazas aplicando en ellas suficiente presión para permitir que el espécimen quede en su lugar.

- 6.5** *Instalación de los transformadores lineales de voltaje diferencial variable (TLDV)* – Se coloca al espécimen el sistema de medición de deformaciones (TLDV), el cual es conectado a un tornillo que penetra la muestra a través de la tuerca previamente pegada con resina epóxica sobre la cara del espécimen (la Figura 784 - 7 muestra la conexión tornillo/tuerca/sistema de medición, de manera que se midan las deformaciones de la viga en su eje neutro). Se asegura el TLDV en su posición de manera que su probador descance sobre la parte superior del sistema de medición y su lectura sea cercana a cero.

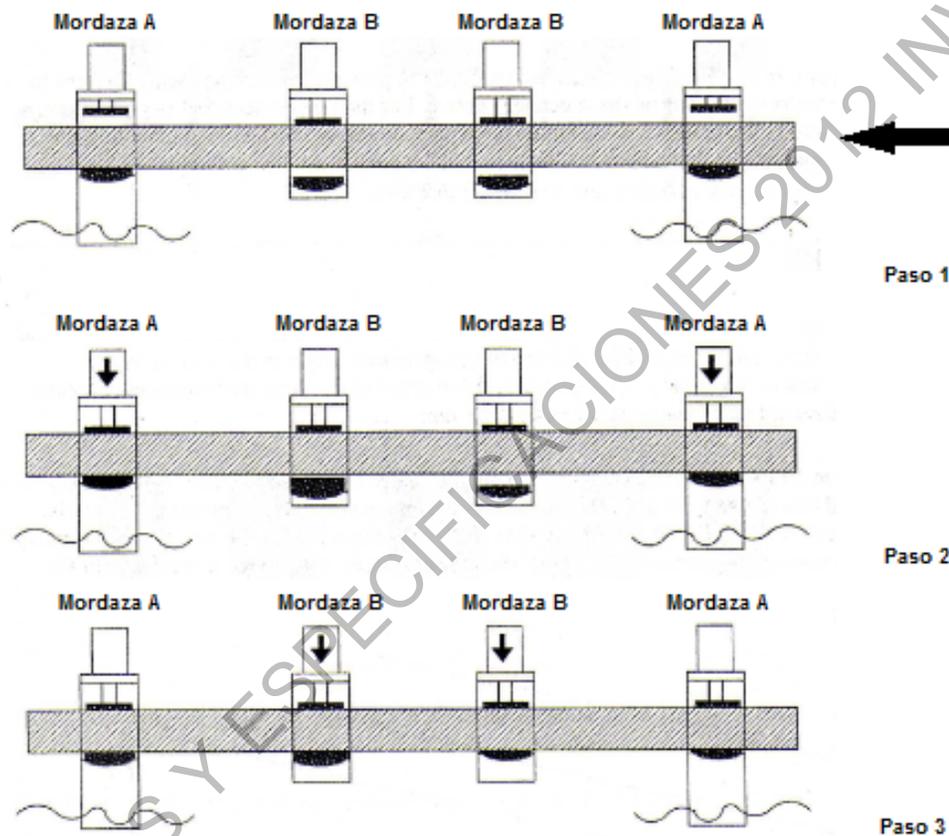


Figura 784 - 5. Procedimiento de sujeción del espécimen

- 6.6** *Condiciones iniciales de ensayo* – Se seleccionan las condiciones iniciales deseadas en cuanto a deformación (250 a 750 microdeformaciones) y frecuencia de carga, así como los intervalos de los ciclos de carga, los cuales se deberán grabar, calcular e ingresar los resultados del ensayo en el componente de control y medición del programa de ensayo. La frecuencia de carga se fija en un rango de 5 a 10 Hz.

Nota 3: La selección de los intervalos de los ciclos de carga los cuales se deberán grabar, calcular e ingresar los resultados del ensayo, puede encontrarse limitada por la memoria disponible para el almacenamiento de los datos.

- 6.7** *Ciclos de carga* – Se aplican 50 ciclos de carga con una deformación constante entre 250 y 750 microdeformaciones. Se determina la rigidez del espécimen en el ciclo de carga número 50. Esta rigidez es un estimativo de la rigidez inicial, la cual es usada como un referente para determinar la falla del espécimen.
- 6.8** *Niveles de deformación* – Se selecciona un rango de deformación tal, que el espécimen experimente, como mínimo, 10 000 ciclos de carga antes de que su rigidez se reduzca a 50 % o menos de su rigidez inicial. Una reducción de rigidez del 50 % o más, representa la falla del espécimen. Un mínimo de 10 000 ciclos de carga asegura que la rigidez del espécimen no se reducirá muy rápidamente.
- 6.9** *Ejecución del ensayo* – Una vez seleccionados los parámetros apropiados del ensayo, se da inicio al mismo. Se activan los componentes de medida y control, de manera que los resultados del ensayo, en unos intervalos de ciclos de carga seleccionados, sean monitoreados y grabados, asegurando con ello que el sistema de ensayo opera apropiadamente. Cuando el espécimen experimente una reducción de más del 50% de su rigidez, el ensayo se da por concluido.



Figura 784 - 6. Colocando el espécimen en la posición de ensayo

7 CÁLCULOS

- 7.1** Se deben realizar los siguientes cálculos para los intervalos del ciclo de carga especificados por el operador:

7.1.1 Esfuerzo máximo de tensión (Pa):

$$\sigma_t = \frac{0.375 P}{bh^2} \quad [784.1]$$

- Donde: P: Carga aplicada, N;
b: Ancho del espécimen, m;
h: Altura del espécimen, m.

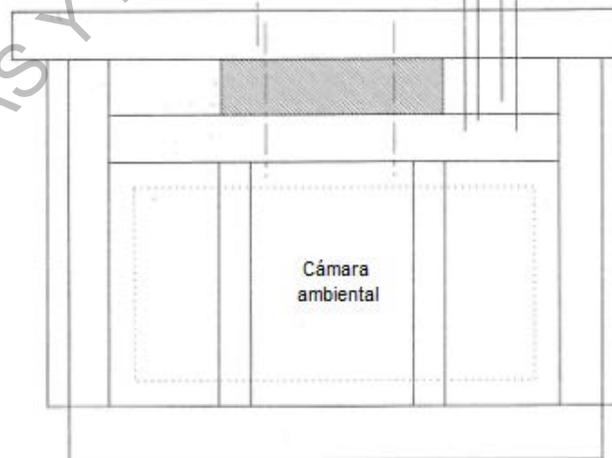
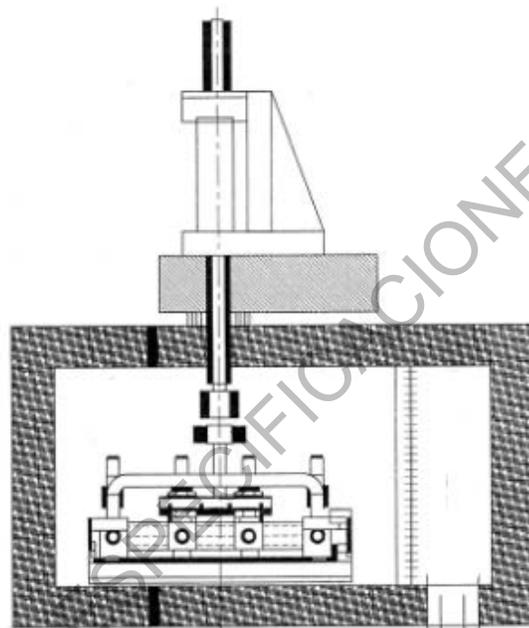


Figura 784 - 7. Esquema (vista lateral) del equipo para el ensayo de fatiga de vigas por flexión

7.1.2 Deformación máxima de tensión (m/m):

$$\epsilon_t = \frac{12 \delta h}{(3L^2 - 4a^2)} \quad [784.2]$$

- Donde: δ : Deflexión en el centro de la viga, m;
- a: Espacio entre las mordazas interiores ($0.357/3 = 0.119$ m);
- L: Longitud del espécimen entre las mordazas extremas, 0.357 m.

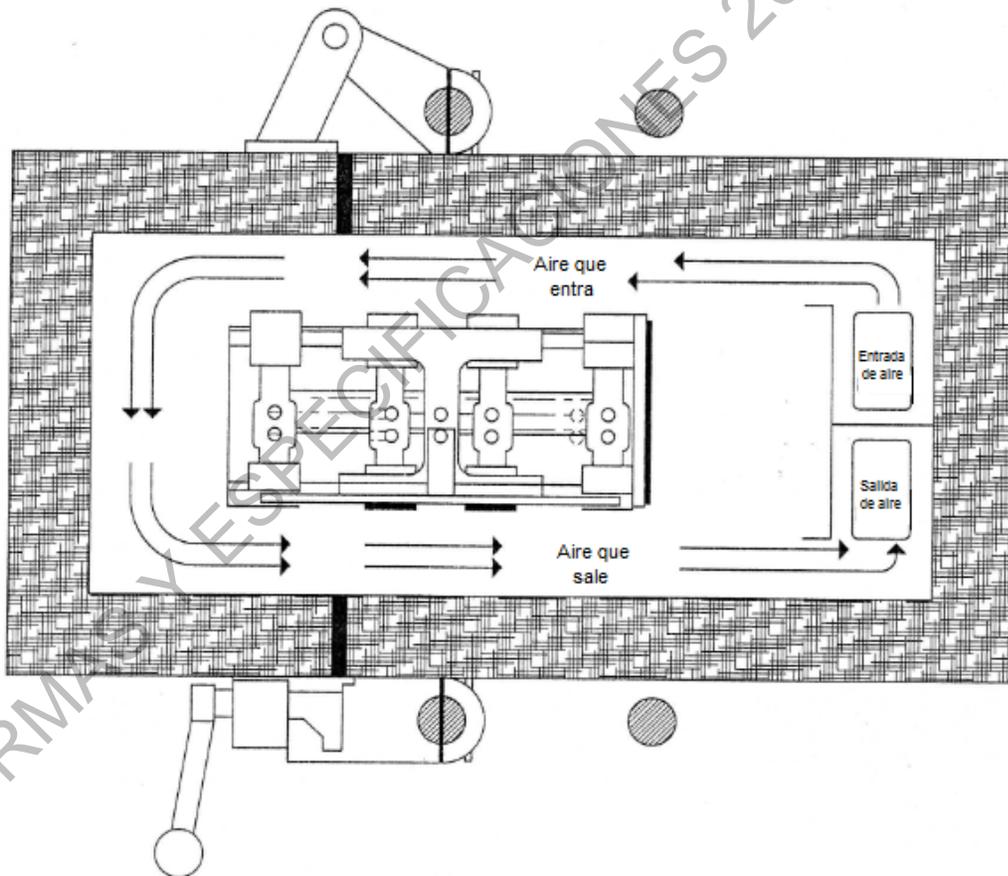


Figura 784 - 8. Esquema (vista de techo) del equipo para el ensayo de fatiga de vigas por flexión

7.1.3 Rigidez a la Flexión (Pa):

$$S = \frac{\sigma_t}{\epsilon_t} \quad [784.3]$$

7.1.4 Angulo de fase (grados):

$$\phi = 360 \times f \times s \quad [784.4]$$

Donde: f: Frecuencia de carga, Hz;

s: El tiempo referenciado entre P_{max} y δ_{max} , s.

Nota 4: Si se usa un software automático para el componente de medición y control del sistema de ensayo, ϕ es aproximado por un algoritmo contenido en el software.

7.1.5 Energía disipada por ciclo (J/m^3):

$$D = \pi \times \sigma_t \times \epsilon_t \times \text{sen}(\phi) \quad [784.5]$$

7.1.6 Energía disipada acumulada (J/m^3):

$$\sum_{i=1}^{i=n} D_i \quad [784.6]$$

Donde: D_j : D para el ciclo de carga "i".

Nota 5: Puede no ser posible determinar la energía disipada D para cada ciclo de carga, debido a limitaciones en el sistema de control y medición. Por lo tanto, la energía disipada acumulada se puede dibujar contra los ciclos de carga en el rango de ciclos en que se recolectaron los datos, hasta el ciclo de interés. El área bajo la curva representa la energía disipada acumulada. En la Figura 784 - 9 se presentan unas relaciones típicas entre la energía disipada y el número de ciclos de carga.

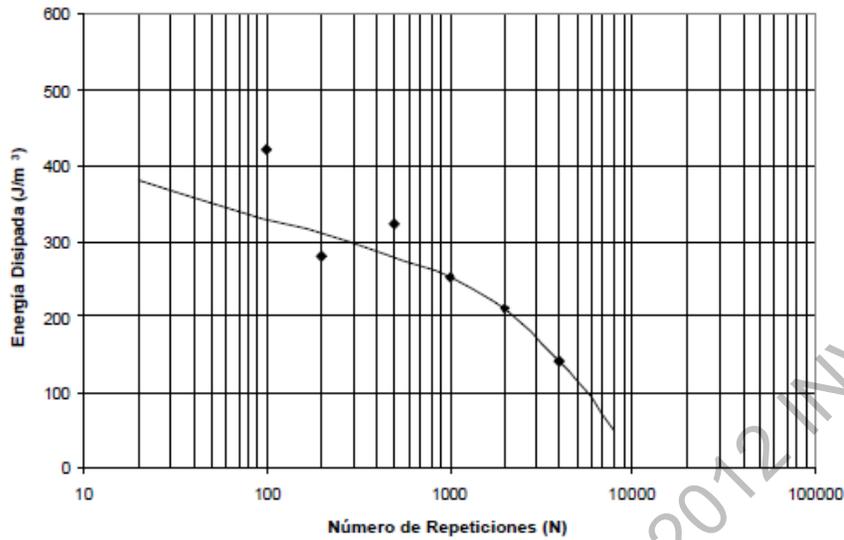


Figura 784 - 9. Energía disipada contra ciclos de carga (repeticiones)

7.1.7 Rigidez inicial (Pa): La rigidez inicial se determina graficando la rigidez (S) contra los ciclos de carga (n) y se ajusta la curva a una función exponencial de la forma mostrada en la Figura 784 - 10.

$$S = A \times e^{bn} \quad [784.7]$$

Donde: e : Base del logaritmo natural;

A, b : Constantes.

7.1.8 Ciclos de falla: La falla se define como el punto en el cual la rigidez del espécimen se reduce al 50 % de la rigidez inicial. El ciclo de carga para el cual ocurre la falla se calcula despejando n de la ecuación del numeral 7.1.7 o, simplemente:

$$n_{f,50} = \frac{\left[\ln \frac{S_{f,50}}{A} \right]}{b} \quad [784.8]$$

Donde: $S_{f,50}$: 50 % de la rigidez inicial, Pa;

$S_{f,50}/A$: 0.50 por definición.

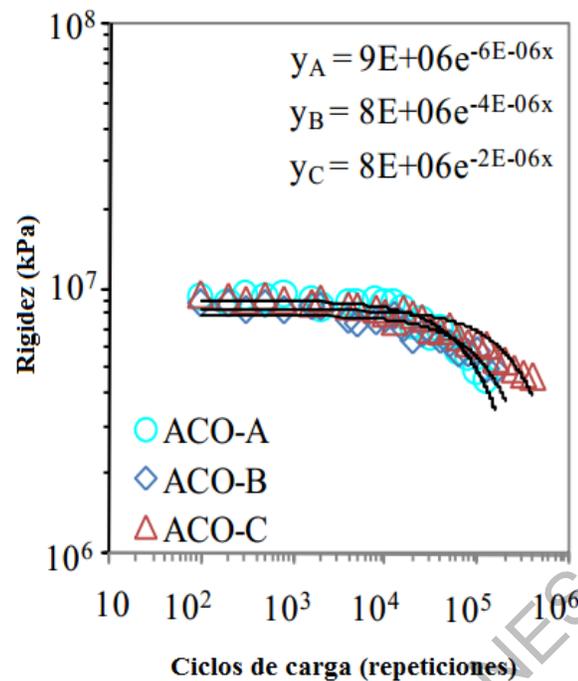


Figura 784 - 10. Ejemplo de curvas rigidez versus ciclos de carga

7.1.9 Energía acumulada disipada a la falla (J/m^3):

$$\sum_{i=1}^{i=n_{f,50}} D_i$$

[784.9]

Nota 6: No es necesario medir la energía disipada en cada ciclo; sin embargo, el software usado para controlar el ensayo de fatiga determina sistemáticamente la energía disipada en los ciclos de carga especificados durante el ensayo. La energía total disipada en el instante de la falla es resumida como parte de los datos de salida.

8 INFORME

8.1 Se debe presentar la siguiente información:

- 8.1.1** *Descripción de la mezcla asfáltica* – Tipo y contenido de ligante, gradación de los agregados y el porcentaje de vacíos con aire.
- 8.1.2** *Dimensiones del espécimen* – La longitud y los valores promedios del ancho y la altura, en metros, con cuatro dígitos significativos.
- 8.1.3** Temperatura del ensayo, con una aproximación de 0.2 ° C.

8.1.4 Se anotan los siguientes resultados del ensayo para cada intervalo de ciclos de carga seleccionados por el operador, con tres dígitos significativos:

Tabla 784 - 2. Resultados del ensayo

CICLO DE CARGA	CARGA APLICADA	DEFLEXIÓN DE LA VIGA	ESFUERZO DE TENSIÓN	DEFORMACIÓN DE TENSIÓN	RIGIDEZ FLEXURAL	ÁNGULO DE FASE	ENERGÍA DISIPADA	ENERGÍA DISIPADA ACUMULADA
	N	m	Pa	m/m	Pa	grados	J/m ³	J/m ³

8.1.5 Se informa la rigidez inicial a la flexión en Pa.

8.1.6 Se reportan los ciclos de falla.

8.1.7 Se grafica la rigidez versus los ciclos de carga como se muestra en la Figura 784 - 10.

8.1.8 Se grafica la energía disipada versus los ciclos de carga como se muestra en la Figura 784 - 9.

9 PRECISIÓN Y SESGO

9.1 Aún no se han conducido los ensayos para determinarlos.

10 NORMAS DE REFERENCIA

AASHTO T 321 – 07