

# RESISTENCIA A LA FATIGA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE FLEXIÓN EN DOS PUNTOS SOBRE PROBETAS TRAPEZOIDALES

INV E – 808 – 13

## 1 OBJETO

- 1.1** Esta norma indica el procedimiento para caracterizar la fatiga de las mezclas compactadas de concreto asfáltico, mediante ensayos de flexión en dos puntos sobre probetas trapezoidales.
- 1.2** El procedimiento se emplea para clasificar las mezclas asfálticas en función de su resistencia a la fatiga, como una guía relativa a su comportamiento en el pavimento, con el fin de disponer de datos para estimar el comportamiento estructural en la carretera y para juzgar los resultados del ensayo de acuerdo con las especificaciones correspondientes a las mezclas asfálticas.

## 2 DEFINICIONES Y SÍMBOLOS

Para los fines de esta norma se aplican los siguientes:

### 2.1 Generalidades:

- 2.1.1** *Fatiga* – Reducción de la resistencia de un material bajo la aplicación repetida de una carga, cuando se compara con la resistencia bajo una aplicación única de esa carga.
- 2.1.2** *Criterio convencional de falla (desplazamiento constante)* – Número de aplicaciones de carga ( $N_{f/50}$ ) que hacen disminuir el módulo complejo de rigidez hasta la mitad de su valor inicial. Es el criterio de falla que se debe utilizar, salvo que se prescriba taxativamente otra cosa.
- 2.1.3** *Módulo complejo de rigidez inicial* – Módulo de rigidez complejo ( $S_{mix,0}$ ) después de 100 aplicaciones de la carga.
- 2.1.4** *Criterio convencional de fatiga (fuerza constante)* – Cuando el desplazamiento de una probeta bajo una fuerza constante aplicada en

su parte superior ha aumentado al doble del valor que tenía al inicio del ensayo.

**2.1.5** *Vida de una probeta hasta la fatiga* – Número de ciclos ( $N_i, j, k$ ) correspondiente al criterio de falla convencional, para el conjunto de condiciones de ensayo  $k$  (temperatura, frecuencia y modo de aplicación de la carga; por ejemplo, nivel de deflexión constante o nivel de fuerza constante y/o cualquier otra condición de aplicación de carga constante).

**2.2** *Definiciones y símbolos específicos al ensayo de flexión en dos puntos sobre probetas trapezoidales:*

**2.2.1** *Constante relativa a la deformación máxima ( $K_\epsilon$ )* – Constante que permite convertir el desplazamiento  $z$  de la parte superior de la probeta trapezoidal de dimensiones ( $B, b, e, h$ ), a la cual se aplica a un nivel de deformación por flexión  $\epsilon$ , en una deformación máxima.

*Nota 1:  $K_\epsilon$  y su relación con los parámetros mencionados es la siguiente:*

$$K_\epsilon \times z = \epsilon \quad [808.1]$$

$$K_\epsilon = \frac{B^2 \times (B - b)^2}{4h \times h^2 \times (h - B) \times (2B - h) + 2B^2 \times \ln \frac{B}{b}} \quad [808.2]$$

**2.2.2** *Ensayo de elemento* – Un ensayo de elemento consiste en:

**2.2.2.1** La imposición de un desplazamiento sinusoidal de amplitud constante en la parte superior de una probeta trapezoidal isósceles, como muestra la Figura 808 - 1.

**2.2.2.2** Durante la imposición de dicho desplazamiento, se registra el cambio que se produce en la amplitud de la fuerza aplicada en la parte superior, debido a la reacción de la probeta.

**2.2.2.3** Medición de la vida de la probeta hasta la fatiga, cuando se alcance el criterio de falla.

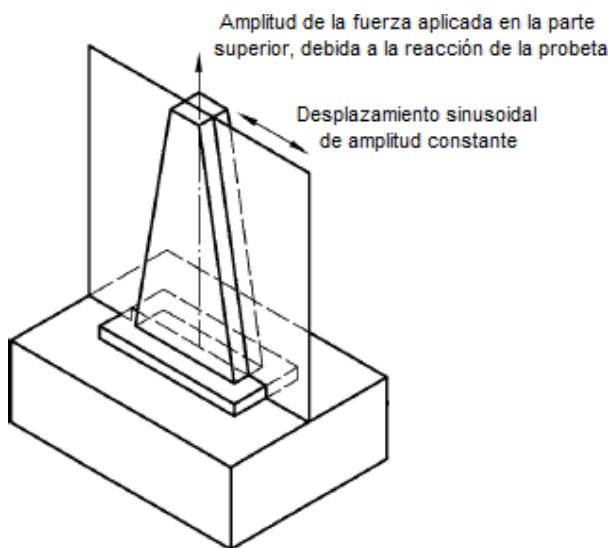


Figura 808 - 1. Desplazamiento sinusoidal en la parte superior de la probeta

### **2.2.3 Línea de fatiga:**

**2.2.3.1** Se debe representar la línea de fatiga de los ensayos de elemento de la mezcla, para los diferentes niveles de amplitud del desplazamiento.

**2.2.3.2** La línea de fatiga se debe representar en un sistema doble logarítmico como una regresión lineal de la vida hasta la fatiga frente a los niveles de amplitud. Utilizando estos resultados se deben determinar la deformación  $\varepsilon_6$  correspondiente a un promedio de  $10^6$  ciclos y la pendiente de la línea de fatiga  $1/b$ .

**2.2.3.3** Se puede calcular, también, la desviación típica de la dispersión residual de la vida hasta la fatiga  $sN$ , y el índice de calidad  $\Delta\varepsilon_6$  relativo a  $\varepsilon_6$ .

**2.2.4 Símbolos** – Los símbolos utilizados son los siguientes, aceptándose por convenio que una deformación de 1 microdeformación (1  $\mu$ deformación) sea igual a  $10^{-6}$ :

i: Índice de la probeta para un ensayo de elemento (varía de 1 a n);

$h_i$ : Altura, m;

- $B_i$ : Longitud de la base mayor, m;  $b_i$ :  
Longitud de la base menor, m;
- $e_i$ : Espesor, m;
- $v_i$ : Contenido de vacíos con aire de la probeta i, %;
- $K_{\varepsilon_i}$ : Constante relativa a la deformación máxima,  $m^{-1}$ ;
- $z_i$ : Amplitud del desplazamiento impuesto a la parte superior de la probeta i, m;
- $\varepsilon_i$ : Deformación relativa máxima de la probeta i, correspondiente al desplazamiento impuesto en la parte superior de la misma;
- $N_i$ : Vida hasta la fatiga convencional de la probeta i;
- a: Ordenada de la línea de fatiga, de acuerdo con la ecuación:  $\log(N) = a + (1/b) \log(\varepsilon)$ ;
- $r_2$ : Coeficiente de correlación lineal ( $\log(N_i), \log(\varepsilon_i)$ );
- $1/b$ : Pendiente de la línea de fatiga;
- $\log(\varepsilon)$ : Valor medio de  $\log(\varepsilon_i)$ ;
- $S_{\log(\varepsilon)}$ : Desviación estándar de  $\log(\varepsilon_i)$ ;
- $S_{\log(N)}$ : Desviación estándar de  $\log(N_i)$ ;
- $\varepsilon_6$ : Deformación correspondiente a  $10^6$  ciclos;
- $S_N$ : Estimación de la desviación estándar residual de los logaritmos decimales de las vidas hasta la fatiga;
- $\Delta\varepsilon_6$ : Índice de calidad del ensayo;
- n: Número de probetas.

### 3 RESUMEN DEL MÉTODO

- 3.1** Este método caracteriza el comportamiento de mezclas asfálticas sometidas a carga de fatiga, con desplazamiento controlado por flexión en dos puntos, utilizando probetas trapezoidales. El método se puede utilizar para mezclas asfálticas con agregados cuyo tamaño máximo nominal sea hasta 19.5 mm ( $\frac{3}{4}$ "), sobre probetas preparadas en el laboratorio u obtenidas de capas de pavimento cuyo espesor sea de 40 mm (1.6") como mínimo. Para mezclas con agregados de tamaño máximo nominal comprendido entre 20 mm (0.8") y 40 mm (1.6"), el ensayo se puede realizar utilizando el mismo principio, pero adaptando los tamaños de las probetas.
- 3.2** Para una frecuencia de desplazamiento sinusoidal dada, el método se debe realizar sobre varios elementos ensayados en una atmósfera ventilada y a una temperatura controlada.

### 4 EQUIPO

- 4.1** *Máquina de ensayo* – Debe consistir en un sistema que permita aplicar un desplazamiento sinusoidal a la parte superior de la probeta con una frecuencia fija. Durante el ensayo, el desplazamiento debe variar menos de  $0.1\mu\text{m}/\text{N}$ . La máquina de ensayo debe poder aplicar la carga a las probetas con una frecuencia de  $25 \pm 1\text{Hz}$ , y a otras frecuencias, con una tolerancia de  $\pm 4\%$  si se necesita con un propósito especial.

*Nota 2: Si se utiliza una frecuencia diferente de 25 Hz, esta circunstancia se deberá expresar en el informe de ensayo. Es posible que los resultados obtenidos en ensayos realizados a frecuencias diferentes no sean directamente comparables.*

- 4.2** *Cámara termostática* – Ventilada y capaz de mantener la temperatura de la base metálica de las probetas y de fijar la temperatura media de la corriente de aire a decenas de milímetros de las probetas, con una precisión de  $\pm 1^\circ\text{C}$  durante todo el ensayo.

- 4.3** *Equipo de medición:*

- 4.3.1** *Fuerza* – El equipo para medir la fuerza en la parte superior de las probetas debe tener una precisión de  $\pm 2\%$  para valores iguales o mayores a 200 N (45 lbf), y una precisión de  $\pm 2\text{N}$  para valores de fuerza menores de 200 N (45 lbf).

**4.3.2 Desplazamiento** – El equipo para medir los desplazamientos en la parte superior de las probetas, utilizando sensores, debe ser capaz de medir por un método estático, con una precisión mínima de  $\pm 1,5 \times 10^{-6}$  m. Si la calibración se realiza mediante un método estático, la indicación del desplazamiento en el procedimiento dinámico debe ser igual que en el procedimiento estático menos 2 %.

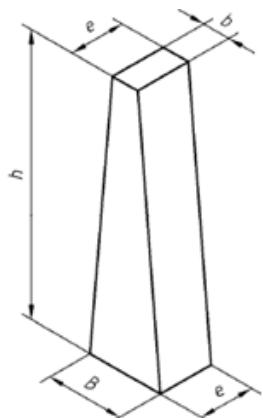
**4.4 Sierra para el corte de las probetas.**

**4.5 Elementos accesorios.**

## 5 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

**5.1 Aserrado y almacenamiento:**

**5.1.1** Las probetas deben tener forma trapezoidal isósceles, de espesor constante, como se muestra en la Figura 808 - 2, con las dimensiones indicadas en la misma figura, las cuales dependen del tamaño máximo nominal (D) del agregado pétreo.



Dimensiones de las probetas

| Dimensiones de las probetas | Tipo de mezcla         |                             |                             |
|-----------------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                             | $D \leq 14 \text{ mm}$ | $14 < D \leq 20 \text{ mm}$ | $20 < D \leq 40 \text{ mm}$ |
| $B$                         | $56 \pm 1 \text{ mm}$  | $70 \pm 1 \text{ mm}$       | $70 \pm 1 \text{ mm}$       |
| $b$                         | $25 \pm 1 \text{ mm}$  | $25 \pm 1 \text{ mm}$       | $25 \pm 1 \text{ mm}$       |
| $e$                         | $25 \pm 1 \text{ mm}$  | $25 \pm 1 \text{ mm}$       | $50 \pm 1 \text{ mm}$       |
| $h$                         | $250 \pm 1 \text{ mm}$ | $250 \pm 1 \text{ mm}$      | $250 \pm 1 \text{ mm}$      |

Figura 808 - 2. Geometría de las probetas

**5.1.2** Las probetas que se sometan a ensayo se deben obtener mediante aserrado, de placas preparadas en el laboratorio, de placas tomadas de capas del pavimento o de núcleos con un diámetro mínimo de 200 mm (0.80") tomados del pavimento. Las placas deben tener dimensiones adecuadas (Ver tabla de la Figura 808 - 2) y su espesor no debe ser menor de 40 mm (1.58").

- 5.1.3** Las probetas se deben almacenar sobre una superficie plana, protegidas del sol y a una temperatura menor de 30° C (86° F), en condiciones que eviten su distorsión.

**5.2** *Características de las probetas:*

- 5.2.1** Las probetas se deben medir con una precisión de 0.1 mm. La desviación estándar sobre  $v_i\%$  no debe ser mayor de 0.7 %.

**5.3** *Verificación del empotramiento:*

- 5.3.1** Las probetas se deben empotrar de manera que se cumpla con el procedimiento de verificación del empotramiento. Este procedimiento se debe realizar utilizando una probeta fabricada con aleación de aluminio del tipo EN AW 2017T4, con una sección rectangular de  $13.5 \pm 1$  mm ( $0.53 \pm 0.04"$ ) por  $30 \pm 1$  mm ( $1.18 \pm 0.04"$ ), y una longitud mínima de 220 mm (8.66") (la Figura 808 - 3 muestra un ejemplo).

- 5.3.2** Se fija la probeta metálica sobre la máquina de ensayo.

- 5.3.3** Se aplica una fuerza de, aproximadamente, 200 N (45 lbf) sobre la parte superior de la probeta y se registran el desplazamiento y la deformación.

- 5.3.4** La probeta metálica se debe fijar sobre un bastidor de acero en forma de L, de más de 80 mm (3.15") × 80 mm (3.15") de sección. Sobre la parte superior de la probeta se aplica una fuerza, de manera que la deformación medida sea igual a la deformación registrada en la máquina de ensayo, con una tolerancia de  $\pm 1$  %. El desplazamiento no debe diferir en más de 5 % (Ver ejemplo del equipo a utilizar en la Figura 808 - 4).

*Nota 3: Se pueden emplear otros procedimientos, siempre que proporcionen los mismos resultados.*

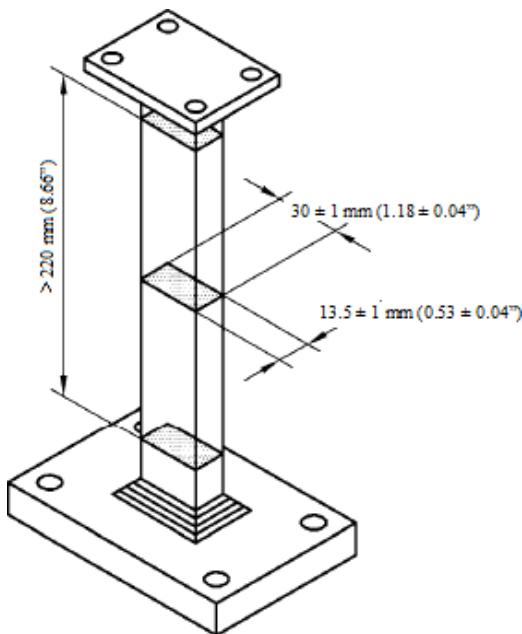


Figura 808 - 3. Probeta de aleación de aluminio

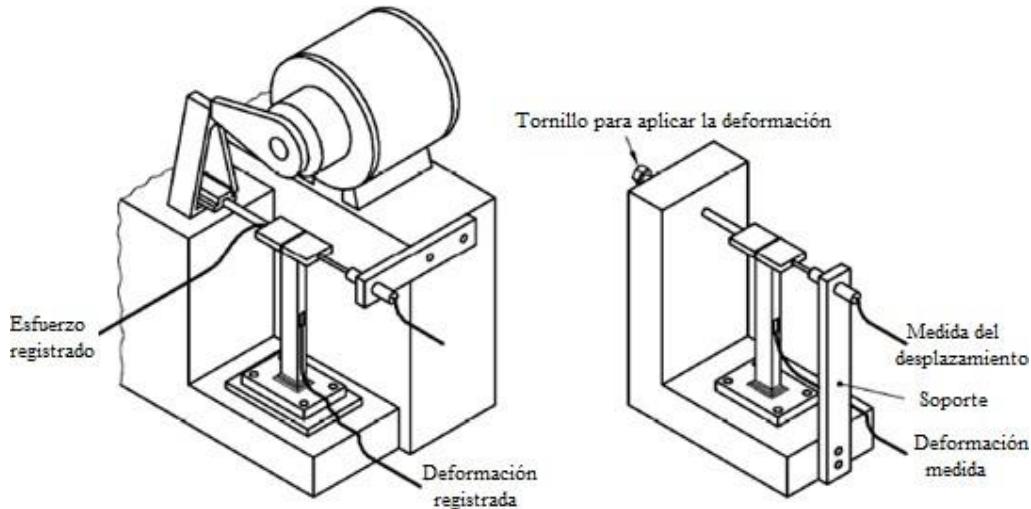


Figura 808 - 4. Equipo para verificar el procedimiento de empotramiento

**5.4 Estabilización de las probetas** – Las probetas se deben ensayar cuando hayan transcurrido entre 2 y 8 semanas desde la fecha de corte.

#### **5.5 Encolado de los extremos:**

**5.5.1** Antes de instalarla en la máquina de ensayo, cada probeta se debe encolar por su base más grande en la acanaladura de profundidad

aproximada de 2 mm (0.08") de una base metálica que tenga un espesor mínimo de 20 mm (0.80") (Figura 808 - 5). Esta operación se debe realizar sobre una base de enculado que permita el posicionamiento de la probeta sobre la base en la que se va a asegurar. La película de cola debe ser tan fina como sea posible. Se pueden utilizar procedimientos de instalación alternativos, con la condición de que se demuestre que no se producen movimientos en la base de la probeta.

*Nota 4: Una tapa encolada en la parte superior de la probeta permite que se aplique el desplazamiento.*

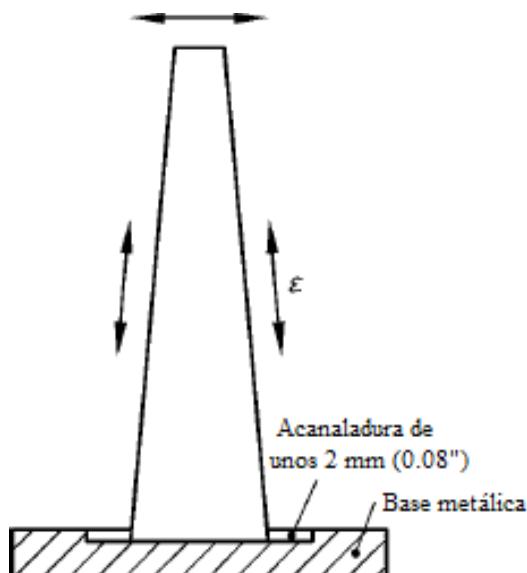


Figura 808 - 5. Fijación de la probeta

## 6 PROCEDIMIENTO

### 6.1 Preparación del equipo de ensayo:

- 6.1.1** La cámara termostática y el equipo de aplicación de la carga se deben calentar hasta que alcancen la temperatura de ensayo. Para cada probeta  $i$ , se debe calcular el desplazamiento deseado de su parte superior, aplicando la ecuación

$$z_i = \frac{\varepsilon_i}{K_i}$$

[808.3]

- 6.1.2** La probeta a ensayar se instala en la máquina de ensayo. El ajuste del desplazamiento debe ser de  $\pm 5\mu\text{m}$ . Si se utiliza una probeta metálica para ajustar el desplazamiento, ésta debe ser del mismo tipo que la probeta metálica descrita en el numeral 5.3.1. El ensayo de fatiga no debe comenzar hasta que se haya verificado que la probeta ha alcanzado la temperatura de ensayo (si fuese necesario, se utiliza una probeta patrón).

*Nota 5: Las probetas no se deben haber sometido a esfuerzos previos, ya que se podrían modificar los resultados.*

### **6.2 Realización del ensayo de fatiga:**

- 6.2.1** Se somete la probeta  $i$  a un movimiento sinusoidal en su parte superior con una amplitud de desplazamiento impuesto de  $\pm 5\mu\text{m}$ , hasta que se haya alcanzado el criterio de falla. Entre 100 y 500 ciclos, se deben registrar las fuerzas de reacción con una tolerancia de  $\pm 2\%$  y se debe calcular el valor medio de la fuerza de reacción. Para este ensayo de elemento, se debe medir el desplazamiento  $z_i$  y se debe calcular  $\varepsilon_i$ .
- 6.2.2** El número de ciclos  $N_i$  hasta alcanzar el criterio de falla, se debe medir con una precisión de 300 ciclos.

*Nota 6: El valor medio de la fuerza de reacción entre 100 y 500 ciclos, se define como el valor inicial de la fuerza de reacción.*

*Nota 7: Las cargas y las frecuencias de ensayo se deben seleccionar de manera que los resultados se calculen por interpolación y no por extrapolación.*

### **6.3 Elección de la deformación:**

- 6.3.1** Las deformaciones  $\varepsilon_i$  se deben seleccionar de manera que:
- Los valores estén espaciados de forma aproximadamente regular sobre una escala logarítmica, o que;
  - Hayan al menos tres niveles de deformación con un número homogéneo de probetas (1 o 2 probetas) en cada nivel. Los valores medios deben estar espaciados de forma aproximadamente regular sobre una escala logarítmica.
- 6.3.2** Las deformaciones deben ser tales que, al menos, un tercio de los ensayos de elemento proporcione resultados con  $N \leq 10^6$  y, al menos, otro tercio de los ensayos de elemento proporcione resultados con  $N \geq$

$10^6$ . Si ello no ocurre, se deben realizar ensayos de elemento adicionales.

#### 6.4 Número de ensayos de elemento:

- 6.4.1** Para determinar la línea de fatiga se deben realizar, al menos, 18 ensayos de elemento.

### 7 CÁLCULOS

- 7.1** Sobre la base de que los resultados representan la vida útil  $N_i$  para las deformaciones  $\varepsilon_i$  elegidas, se debe representar gráficamente la línea de fatiga efectuando una regresión lineal entre los logaritmos decimales de  $N_i$  y los logaritmos decimales de  $\varepsilon_i$ , de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\log(N) = a + \frac{1}{b} \times \log(\varepsilon) \quad [808.4]$$

- 7.1.1** La Figura 808 - 6 muestra un ejemplo de una línea de fatiga, donde los ejes están colocados de manera inversa a como a menudo se muestran, para que la pendiente sea consistente con lo definido por el ensayo.

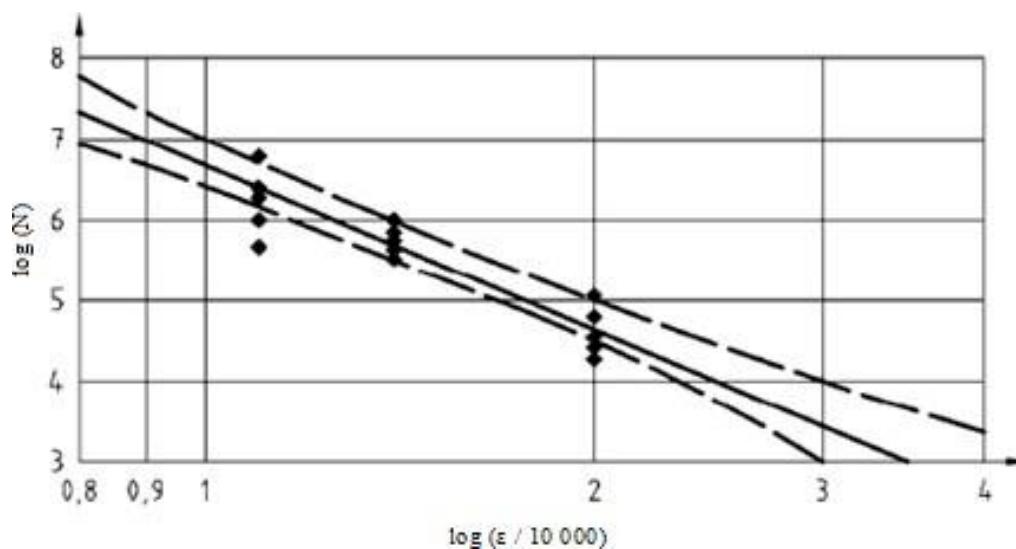


Figura 808 - 6. Ejemplo de una línea de fatiga

## 7.2 Cálculos para $n$ resultados:

### 7.2.1 Estimación de la deformación para $10^6$ ciclos:

$$\varepsilon_6 = 10^{b \times (6 - a)} \quad [808.5]$$

### 7.2.2 Estimación de la desviación residual típica $S_N$ :

$$S_N = S_{\log(N)} \times \sqrt{\frac{(1 - r_2^2) \times (n - 1)}{(n - 2)}} \quad [808.6]$$

### 7.2.3 Índice de calidad $\Delta\varepsilon_6$ :

$$\Delta\varepsilon_6 = 0.5 \varepsilon_6 \times \sqrt{10^{-2b \times S_0} - 10^{2b \times S_0}} \quad [808.7]$$

Donde:

$$\Delta\varepsilon_6 = \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\log(\frac{\varepsilon_6^6}{n-1}) - \log(\varepsilon_6)}{S_{\log(\varepsilon)}^2}} \quad [808.8]$$

## 8 INFORME

### 8.1 El informe de ensayo deberá incluir:

#### 8.1.1 Identificación de la mezcla.

#### 8.1.2 Fecha de ejecución del ensayo.

#### 8.1.3 Contenido promedio de vacíos con aire en la probeta (norma INV E-736).

#### 8.1.4 Método de fabricación o de toma de la muestra.

#### 8.1.5 Condiciones del ensayo de fatiga (temperatura, frecuencia, etc.).

#### 8.1.6 Criterio de falla elegido (en caso de que no sea el criterio de falla convencional).

**8.1.7** Número medio de ciclos y la desviación estándar obtenida para cada nivel de deformación o de esfuerzo.

**8.1.8** Representación de la línea de fatiga.

**8.1.9** Detalles no proporcionados por esta norma.

**8.1.10** Incidencias que hayan podido afectar los resultados.

**8.1.11**  $\varepsilon_6$ .

**8.1.12**  $\Delta\varepsilon_6$ .

**8.1.13** La pendiente  $I/b$ .

**8.1.14** La estimación de la desviación estándar residual  $S_N$ .

**8.1.15** El coeficiente de correlación de la línea de fatiga  $r^2$ .

## 9 PRECISIÓN

---

**9.1** La reproducibilidad y la repetibilidad para el método de ensayo en dos puntos sobre probetas isósceles, fueron determinadas de acuerdo con la Norma Internacional ISO 5725–2 en 11 laboratorios distintos de 3 países europeos, utilizando equipos diferentes. El experimento se realizó en el año 2001, sobre un concreto asfáltico AC 14 a 10° C y a una frecuencia de 25 Hz.

**9.1.1** Resultados relativos a  $\varepsilon_6$ :

- Repetibilidad, desviación estándar  $\sigma_r = 1.43 \mu\text{m}$ ;
- Repetibilidad, límite del 95%,  $r = 4.2 \mu\text{m}$ ;
- Reproducibilidad, desviación estándar  $\sigma_r = 1.43 \mu\text{m}$ ;
- Reproducibilidad, límite del 95%,  $R = 8.3 \mu\text{m}$ .

**9.1.2** Resultados relativos a  $I/b$ :

- Repetibilidad, desviación estándar  $\sigma_r = 0.0213$ ;
- Repetibilidad, límite del 95%,  $r = 0.0602$ ;

- Reproducibilidad, desviación típica  $\sigma_r = 0.0227$ ;
- Reproducibilidad, límite del 95%,  $R = 0.0642$ .

## 10 NORMAS DE REFERENCIA

---

UNE-EN 12697-24:2006+A1