

## Ensayo de fatiga en flexotracción dinámica de mezclas bituminosas

### 1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACION

1.1 Esta norma describe el procedimiento que debe seguirse para determinar la ley de fatiga en deformación, con control de desplazamiento, y su ley energética asociada, de una mezcla bituminosa.

1.2 El ensayo de fatiga consiste en someter una probeta prismática, apoyada en sus extremos y sujeta en su centro, a un desplazamiento de éste que varía en el tiempo según una función sinusoidal. Relacionando las deformaciones máximas iniciales producidas en el centro de la probeta, con el número de ciclos necesarios para reducir la rigidez total de la probeta a la mitad, se obtienen pares de valores correspondientes a varios ensayos, que permiten definir la ley de fatiga en deformación con control en desplazamiento.

1.3 Este procedimiento es aplicable a materiales tratados con ligantes hidrocarbonados, en especial a mezclas bituminosas para carreteras.

1.4 Los resultados de este ensayo se pueden utilizar tanto para el proyecto como el dimensionamiento de los firmes y la formulación de mezclas bituminosas.

### 2 APARATOS Y MATERIAL NECESARIOS

2.1 **Elementos para la fabricación de probetas.** Para la fabricación de probetas se emplearán los aparatos descritos en la norma NLT-173.

2.2 **Sierra de disco circular con borde de diamante o de otro material abrasivo análogo.** La sierra estará dotada de los dispositivos necesarios para permitir que el corte se verifique con la precisión de dimensiones requerida.

2.3 **Máquina de ensayo.** La máquina para ensayar las probetas puede ser cualquier tipo de prensa servohidráulica con capacidad para aplicar cargas cíclicas sinusoidales de la intensidad y frecuencia que requieran las condiciones particulares del ensayo (Nota 1).

**Nota 1.** Un equipo servohidráulico con capacidad de carga dinámica no menor de  $\pm 2,5$  kN y frecuencia de 10 Hz puede ser suficiente.

2.4 **Célula de carga.** La célula de carga que se vaya a utilizar en la medida de la carga dinámica tendrá una capacidad de lectura no menor de  $\pm 2,5$  kN. La precisión de lectura será menor o igual de  $\pm 0,002$  kN.

2.5 **Extensómetro y sensor de desplazamiento.** El extensómetro que se vaya a utilizar para la medida de la deformación central de la probeta tendrá una base de medida de  $50 \pm 0,5$  mm, su rango de lectura estará comprendido entre  $\pm 0,2$  mm y  $\pm 0,5$  mm, y la precisión de lectura será menor o igual de  $\pm 0,25$   $\mu$ m.

El sensor de desplazamiento del émbolo que aplica la carga dispondrá de un rango de desplazamiento no menor de  $\pm 2$  mm, con una precisión de lectura no menor de  $\pm 5$   $\mu$ m.

2.6 **Dipositivos de sujeción de la probeta.** Para elaborar el sistema de sujeción de la probeta se dispondrá de trozos de tubo cuadrado de 20 mm de lado y más de 50 mm de largo, gatos, y de un mecanismo de apoyo construido con materiales que resistan, sin deteriorarse, cargas de compresión y torsión de al menos 12 kN. Este mecanismo de apoyo (figuras 1 y 2) (Nota 2) constará de dos apoyos simples deslizantes cuyos ejes de giro estarán separados una distancia de  $270 \pm 3$  mm. El eje de giro de cada apoyo y una recta que intersecte con él y sea paralela al eje del émbolo que aplica la carga, definirán un plano de apoyo. El sistema de apoyos será tal que permita al eje de giro de cada apoyo bascular, dentro del plano de apoyo, un ángulo no menor de  $\pm 5^\circ$ , y desplazarse hacia arriba o hacia abajo, paralelamente a sí mismo, una distancia no menor de  $\pm 5$  mm. La sujeción central de la probeta permitirá que ésta quede empotrada en el extremo del émbolo de aplicación de la carga. El ángulo formado por el eje de émbolo y la generatriz de apoyo de la probeta prismática será de  $90 \pm 2^\circ$  sexagesimales.

**Nota 2.** El sistema de apoyo descrito en las figuras es sólo orientativo. Cualquier otro sistema que cumpla los requerimientos exigidos en cuanto a la libertad de movimientos y distancias especificados será igualmente utilizable.

2.7 **Equipo informático de adquisición de datos.** La toma de datos se llevará a cabo de forma automática a través de un sistema compuesto por un ordenador y tarjetas de conversión analógico-digital. Estas tarjetas permitirán el registro digital

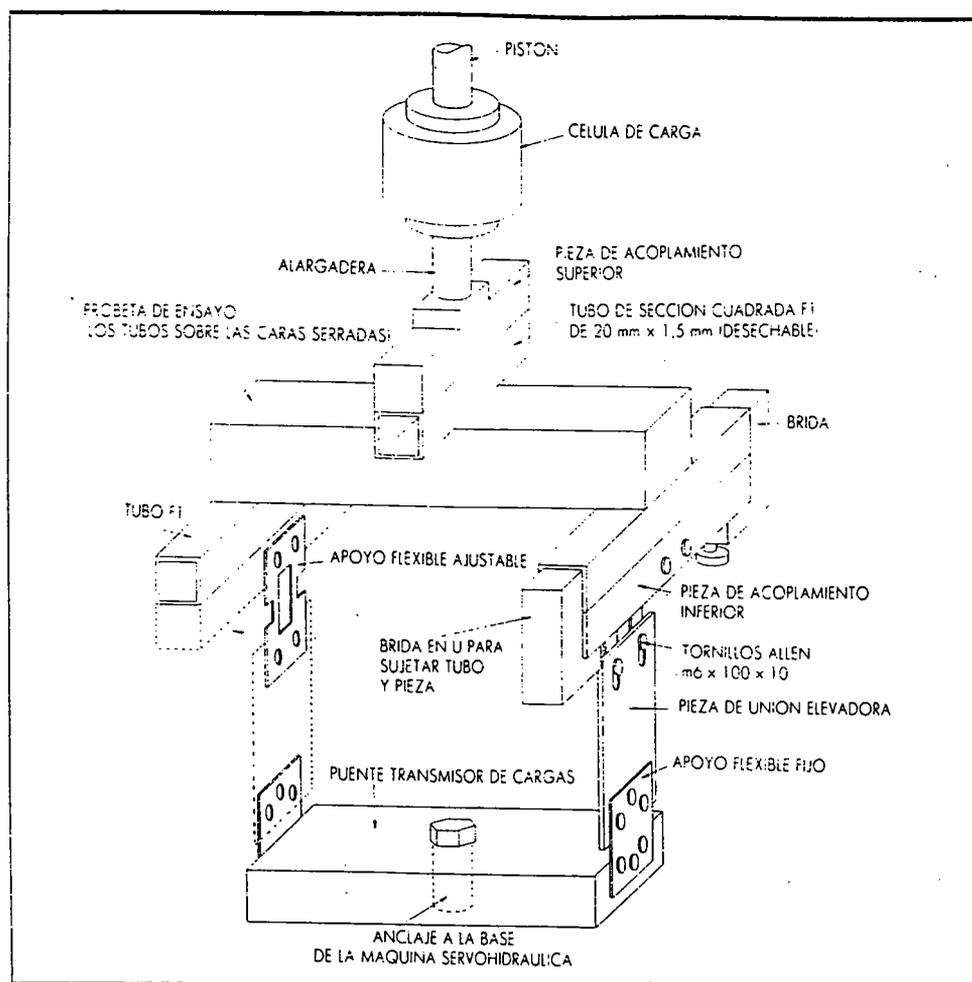


FIGURA 1. Esquema ilustrativo de los dispositivos de sujeción y anclaje de la probeta de ensayo.

de las funciones de carga y extensométricas y su resolución será tal que el error que se introduzca en la conversión sea menor o igual que la precisión de lectura de la célula de carga y de los extensómetros (apartados 2.3 y 2.5).

**2.8 Recinto termostático.** Con objeto de mantener la temperatura constante durante el ensayo, se dispondrá de una cámara o recinto que permita alojar la probeta y los dispositivos de anclaje (3.1.4) y que mantenga una temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$  con una variación máxima de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

**2.9 Material general.** Bandejas, balanzas, termómetros, etc.

### 3 PROCEDIMIENTO

#### 3.1 Preparación de las probetas

**3.1.1 Fabricación de las probetas.** Las probetas para ensayo se obtienen a partir de aquellas de mez-

cla bituminosa, fabricadas con el procedimiento descrito en la norma NLT-173 antes mencionada. Las probetas tendrán unas dimensiones aproximadas de  $300 \times 300 \times 50$  mm. Por serrado de las mismas se obtendrán cinco probetas prismáticas de cada una, con unas dimensiones de  $300 \pm 10$  mm por  $50 \pm 3$  mm por  $50 \pm 3$  mm. Para la determinación de una ley de fatiga correspondiente a un material determinado, será precisa al menos la obtención de diez probetas de ensayo y, por tanto, la fabricación previa de dos probetas según NLT-173.

**3.1.2 Densidad relativa de las probetas.** La determinación de la densidad relativa de las probetas se realiza empleando el método descrito en la norma NLT-168.

**3.1.3 Conservación de las probetas.** Antes de la ejecución del ensayo las probetas deben tener una temperatura homogénea e igual a  $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ; para ello se mantienen durante más de cuatro horas previas al ensayo a la temperatura especificada.

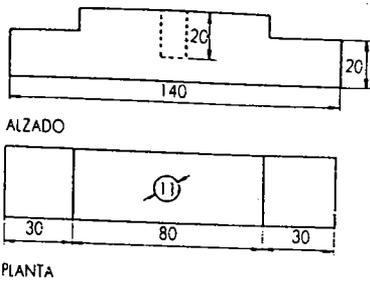


FIGURA 2a. Pieza de acoplamiento superior (una).

MEDIDAS EN mm

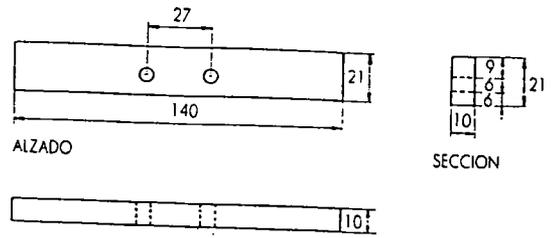


FIGURA 2b. Pieza de acoplamiento inferior (dos).

MEDIDAS EN mm

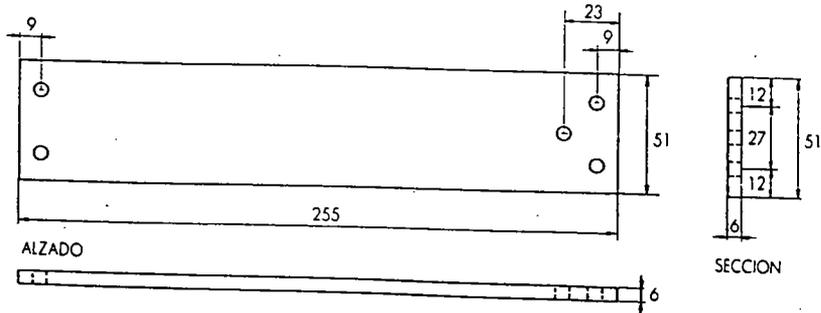


FIGURA 2c. Pieza de unión elevadora (dos).

MEDIDAS EN mm

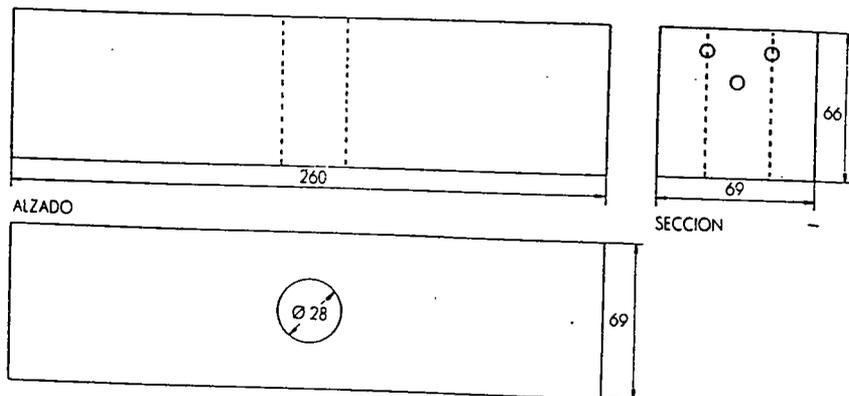


FIGURA 2d. Puente de transmisión de cargas (uno).

MEDIDAS EN mm

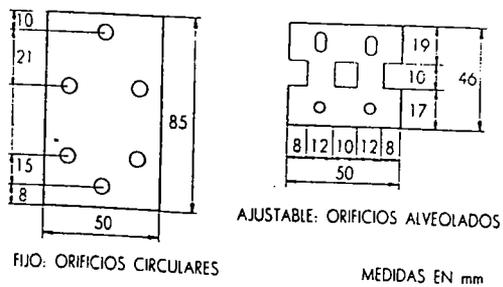


FIGURA 2e. Apoyos simples flexibles ajustables y fijos (dos de cada uno) (espesor del fleje 0,6 mm).

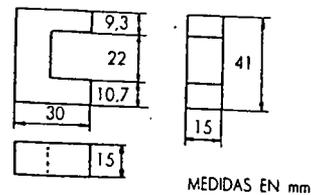


FIGURA 2f. Brida para sujetar los tubos F1 a las piezas de acoplamiento (seis).

NOTA: Todas las piezas descritas en la figura 2 son de aleación Al-Mg (excepto los apoyos simples, figura 2e).

**3.1.4 Preparación de los anclajes de las probetas.** La probetas, una vez fabricadas, presentarán dos caras opuestas serradas de dimensiones  $300 \pm 10 \times 50 \pm 3$  mm. Con el fin de fijar la probeta al aparato de apoyo descrito en el apartado 2.6, se pegarán a la probeta trozos del tubo cuadrado metálico indicado en el mismo apartado (Nota 3). Uno de estos trozos se pega en una de las caras serradas de la probeta, de forma que su centro equidiste de los extremos de la misma. En la otra cara serrada se pegan otros dos tubos, de forma que la distancia entre sus centros permita situarlos sobre los apoyos simples definidos en el apartado 2.6, y que dicho centro equidiste del centro del tubo pegado en la otra cara.

**Nota 3.** Como pegamento podrá usarse resina epoxi. El secado de la resina epoxi requiere mantener las probetas en contacto con los tubos durante al menos 72 h en un ambiente con temperaturas no menores de 15 °C. Las superficies a pegar estarán limpias y exentas de grasa o cualquier marca de identificación de la probeta.

## 3.2 Ejecución del ensayo

### 3.2.1 Montaje de la probeta y extensómetro.

La probeta se fija al aparato de apoyo por medio de los tubos metálicos pegados en una de sus caras, y al extremo del émbolo de aplicación de carga por medio del tubo pegado en la otra. La fijación de los tubos, tanto a la superficie de asiento de los apoyos, como al extremo del émbolo, se realiza utilizando gatos o bien cualquier otro procedimiento equivalente. La capacidad que presenta el aparato de apoyo de desplazar y bascular los ejes del mismo, se emplea para evitar que, en las operaciones de fijación de la probeta, ésta sea sometida a esfuerzos de flexión o torsión que puedan dañarla o modificar su estado tensional, afectando así a su comportamiento en el ensayo.

El extensómetro se fija en la cara de la probeta que tiene pegados los dos tubos metálicos y se sitúa en el centro geométrico de esta cara. El montaje se realiza en el interior del recinto termostático. Terminado el montaje se espera el tiempo necesario para que todos los elementos de apoyo, extensómetro y probeta, recuperen la temperatura de ensayo de  $20 \pm 1$  °C.

### 3.2.2 Aplicación de la sollicitación de ensayo.

Una vez realizado el montaje de la probeta y del extensómetro, y conseguida la temperatura de ensayo especificada, se aplica al émbolo un desplazamiento que varíe en el tiempo siguiendo una función sinusoidal con la siguiente expresión:

$$D = D_0 \text{ sen } (2\pi Ft)$$

siendo:

D = Desplazamiento en el instante t ( $\mu\text{m}$ ).

$2D_0$  = Amplitud total de la función desplazamiento ( $\mu\text{m}$ ).

F = Frecuencia de la onda (Hz).

t = Tiempo (segundos).

La frecuencia F de la onda será de 10 Hz y el valor de la amplitud total  $2D_0$  será distinto en cada ensayo (los valores usuales varían desde 80  $\mu\text{m}$  a 350  $\mu\text{m}$  según el tipo de mezcla bituminosa). Esta sollicitación se mantiene hasta que se cumpla la condición de fin de ensayo que se indica en el apartado 3.2.4.

**3.2.3 Registro de las funciones de carga, extensométrica y desplazamiento.** El registro de estas funciones se realiza a través del equipo de adquisición de datos cada 500 ciclos, a partir del ciclo 200. Así, en los ciclos 200, 700, 1.200, 1.700... se registran los valores de las funciones a lo largo de un ciclo completo. Las funciones de carga, extensométrica y de desplazamiento, vendrán dadas, en cada ciclo considerado, por los valores obtenidos en la lectura de más de 50 puntos equidistantes en el tiempo. Por tanto, si F es la frecuencia de la función sinusoidal de desplazamiento aplicada, la frecuencia de lectura de cada función habrá de ser mayor de 50 F.

**3.2.4 Determinación del instante de fin de ensayo.** Una vez realizado el registro de las funciones anteriores en cada ciclo, y antes de proceder al siguiente registro, se calcula la amplitud cíclica de carga dinámica, definiendo ésta como el valor absoluto de la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo de la función de carga registrada en dicho ciclo. Se considera finalizado el ensayo en el ciclo N, si el valor de la amplitud cíclica de carga calculada para el ciclo N, es menor o igual a la mitad del valor de la amplitud cíclica de carga calculada para el ciclo 200. Por tanto, la condición de fin de ensayo vendrá dada por la siguiente expresión:

$$AC(N) < 1/2 AC(200)$$

siendo:

AC(N) = Amplitud cíclica de carga dinámica en el ciclo N.

AC(200) = Amplitud cíclica de carga dinámica en el ciclo 200.

El ensayo se considera válido si el N obtenido está comprendido entre 6.200 y 600.200 ciclos.

## 4 RESULTADOS

**4.1 Cálculo de las funciones tensión y deformación en un ciclo.** El estado tensional de la mezcla

bituminosa se caracteriza por la tensión que se produce en un punto situado en el centro geométrico de la cara en que se encuentran los dos apoyos. Esta tensión actúa normalmente a un plano perpendicular al plano de la cara de apoyo.

La función tensión se determina, para cada ciclo, a partir de la función de carga registrada y de las dimensiones de la probeta y distancias entre apoyos según la siguiente expresión:

$$T = 3 \cdot P \cdot \left( \frac{L}{2} - 10 \right) \cdot (C \cdot D^2)^{-1}$$

siendo:

- T = Tensión en un instante en N/mm<sup>2</sup> o MPa.  
 P = Carga registrada en el mismo instante en N.  
 L = Separación entre apoyos en mm.  
 C = Ancho de la probeta en mm.  
 D = Canto de la probeta en mm.

El estado de deformaciones de la probeta se caracteriza por la deformación que se produce en el mismo punto en que se define la tensión y según la normal al mismo plano mencionado.

La función deformación se determina, para cada ciclo, a partir de la función extensométrica registrada y de la distancia entre apoyos y base de medida del extensómetro a través de la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \text{EXT} \cdot \left[ 20 + \frac{B - 20}{2} \left( 1 + \frac{L/2 - B/2}{L/2 - 10} \right) \right]^{-1}$$

siendo:

- $\varepsilon$  = Deformación en un instante.  
 EXT = Señal del extensómetro en el mismo instante (en mm).  
 B = Base de medida del extensómetro (en mm).  
 L = Separación entre apoyos (en mm).

Como las funciones de carga y extensométricas se determinan por la lectura de más de 50 puntos por ciclo, las funciones tensión y deformación vendrán asimismo definidas por más de 50 puntos por ciclo.

**4.2 Cálculo del módulo dinámico, ángulo de desfase y densidad de energía disipada en un ciclo.** El módulo dinámico en un determinado ciclo se define como el cociente entre la amplitud cíclica de la función tensión y la amplitud cíclica de la función deformación. La amplitud cíclica de una función en un ciclo es el valor absoluto de la diferencia entre su valor máximo y su valor mínimo en ese ciclo.

$$\text{MD} = \frac{T_c}{\varepsilon_c}$$

siendo

- MD = Módulo dinámico en N/mm<sup>2</sup> o MPa.  
 $T_c$  = Amplitud cíclica de la función tensión en MPa.  
 $\varepsilon_c$  = Amplitud cíclica de la función deformación (adimensional).

El ángulo de desfase entre la función de tensión y la función deformación se obtiene aproximando, por el método de mínimos cuadrados, cada una de las dos funciones tensión y deformación (definidas por más de 50 puntos equidistantes en el tiempo) a una función del tipo  $\text{Asen}(2\pi Ft + B) + K$ . Se obtienen, por tanto, las siguientes funciones aproximadas:

$$T_a = A_t \text{sen}(2\pi \cdot F \cdot t + B_t) + K_t$$

$$\varepsilon_a = A_e \text{sen}(2\pi \cdot F \cdot t + B_e) + K_e$$

siendo:

- $T_a$  y  $\varepsilon_a$  = Valor de las funciones tensión y deformación aproximadas, en MPa y adimensional, respectivamente.  
 $2A_t$  y  $2A_e$  = Amplitud de las funciones tensión y deformación aproximadas, en MPa y adimensional.  
 F = Frecuencia de la función de carga, 10 Hz.  
 t = Tiempo en segundos.  
 $B_t$  y  $B_e$  = Ángulo de fase de las funciones tensión y deformación aproximadas, en radianes.  
 $K_t$  y  $K_e$  = constantes.

El ángulo de desfase se define como el desfase existente entre las funciones de tensión y deformación. Su expresión será la siguiente:

$$\varnothing = (B_e - B_t) \frac{180}{\pi}$$

siendo

- $\varnothing$  = Ángulo de desfase en grados sexagesimales.

La densidad de energía disipada se obtiene con los valores ya calculados de la amplitud cíclica de las funciones tensión y deformación y el ángulo de desfase, utilizando la siguiente expresión:

$$\text{DED} = T_c \cdot \varepsilon_c \text{sen}(\varnothing) \cdot 0,25$$

siendo:

- DED = Densidad de energía disipada en un ciclo en MPa o MJ/m<sup>3</sup>.

Esta densidad de energía disipada corresponde a la porción de la mezcla bituminosa situada en el punto en que fueron determinadas las funciones de tensión y deformación.

La amplitud cíclica del desplazamiento se determina de modo análogo al descrito para las funciones tensión y deformación. Su valor debe mantenerse constante durante todo el ensayo.

La densidad de energía disipada durante todo el ensayo se calcula a partir de los valores de densidad de energía disipada, calculados en cada uno de los ciclos registrados, mediante la siguiente expresión aproximada:

$$\text{DEDtotal} = 200 \cdot \text{DED}(200) + \\ + 500 \sum_{I=1}^m \text{DED}(200 + 500 I)$$

siendo:

$\text{DEDtotal}$  = Densidad de energía disipada en todo el ensayo en  $\text{MJ/m}^3$ .

$\text{DED}(x)$  = Densidad de energía disipada en el ciclo  $x$  en  $\text{MJ/m}^3$ .

$N$  = Número de ciclo de fin de ensayo.

$m$  =  $(N - 200)/500$ .

**Nota 4.** El procedimiento descrito para calcular el ángulo de desfase es equivalente a desarrollar cada función en serie de Fourier y adoptar como valor de la función aproximada el primer armónico correspondiente a la frecuencia de la sollicitación.

**4.3 Expresión de resultados de un ensayo.** Los resultados de un ensayo deben incluir los siguientes datos:

- Dimensiones de la probeta (ancho y canto en su centro y longitud) en mm.
- Densidades relativas.
- Base de medida del extensómetro.
- Para cada ciclo registrado se indicará:
  - Amplitud cíclica del desplazamiento central en  $\mu\text{m}$ .
  - Amplitud cíclica de la carga en N o kgf.
  - Amplitud cíclica de la función tensión en MPa o kgf/cm<sup>2</sup>.
  - Amplitud cíclica de la función deformación (adimensional).
  - Módulo dinámico en MPa o kgf/cm<sup>2</sup>.
  - Ángulo de desfase en grados.
  - Densidad de energía disipada en  $\text{J/m}^3$ .

Finalmente se indicará la densidad de energía disipada en todo el ensayo en  $\text{MJ/m}^3$  y el número total de ciclos aplicados.

## 5 OBTENCIÓN DE LAS LEYES DE FATIGA Y ENERGÉTICA

La ley de fatiga con control en desplazamiento y la ley energética se obtienen empleando los resultados de no menos de diez ensayos. Para la primera ley se consideran los pares de valores: mitad de la amplitud cíclica de la función de deformación en el ciclo número 200,  $1/2[\epsilon_c(200)]$ , número total de ciclos aplicados ( $N$ ). Para la segunda ley se consideran los pares de valores: densidad de energía disipada en todo el ensayo,  $\text{DEDtotal}$ , número total de ciclos aplicados ( $N$ ). Con estos pares de valores se aproximan por mínimos cuadrados las siguientes leyes:

$\epsilon = a N^b$ . Ley de fatiga en deformación.

$W = c N^d$ . Ley de fatiga energética.

siendo:

$\epsilon$  = La mitad de la amplitud cíclica de la función de deformación en el ciclo número 200 (adimensional).

$W$  = Densidad de energía disipada en todo el ensayo (en  $\text{MJ/m}^3$ ).

$N$  = Número total de ciclos aplicados.

$a, b$  = Coeficientes de la ley de fatiga en deformación (adimensionales).

$c, d$  = Coeficientes de la ley de fatiga energética,  $c$  en  $\text{MJ/m}^3$  y  $d$  adimensional.

## 6 CORRESPONDENCIA CON OTRAS NORMAS

Esta norma de ensayo ha sido redactada conforme a los ensayos ideados y desarrollados en el Centro de Estudios de Carreteras.

## 7 NORMAS PARA CONSULTA

NLT-173 «Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante la pista de ensayo de laboratorio».

NLT-168 «Densidad y huecos de las mezclas bituminosas compactadas».