

Medida de módulos dinámicos de materiales para carreteras

1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACION

1.1 Esta norma describe el procedimiento que debe seguirse para la determinación del módulo dinámico y del ángulo de desfase (módulo complejo) de una probeta cilíndrica a compresión simple dinámica.

1.2 El ensayo consiste en aplicar a la probeta una carga axial que varíe en el tiempo de forma sinusoidal, y registrar a una temperatura especificada las funciones de tensión y deformación que se producen en su zona central. A partir de estas funciones se obtiene el módulo complejo.

1.3 Este procedimiento es aplicable principalmente a materiales tratados con ligantes hidrocarbonados o con conglomerantes hidráulicos. También puede ser aplicado a materiales no tratados si disponen de suficiente cohesión.

1.4 El valor del módulo dinámico se puede utilizar tanto para el proyecto como para el dimensionamiento de los firmes y la formulación de mezclas bituminosas.

2 APARATOS Y MATERIAL NECESARIOS

2.1 **Elementos para la fabricación de las probetas.** Según el tipo de material que se vaya a ensayar se dispondrá de los moldes, mezcladores y compactadores necesarios para la fabricación de las probetas cilíndricas.

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

Nota 1. Un equipo servohidráulico apto para aplicar una carga dinámica mayor o igual a ± 25 kN y una frecuencia máxima de 40 Hz puede ser suficiente.

2.3 **Célula de carga.** La célula de carga que se vaya a utilizar para la medida de la carga dinámica tendrá un campo de lectura mayor de 1,33 veces la amplitud de la carga total que se aplique en un ensayo particular. La precisión de lectura será menor del

1 % de la amplitud de la carga dinámica aplicada en cada ensayo particular (Nota 2).

Nota 2. Se entiende por amplitud de carga total a la carga comprendida entre cero y el valor máximo de la carga de compresión aplicada en el ensayo, y por amplitud de carga dinámica, la carga comprendida entre el valor mínimo y máximo de la onda de carga sinusoidal aplicado en el ensayo.

2.4 **Platos de carga.** La máquina de ensayo llevará dos platos de carga, planos, de acero y con superficies endurecidas. Su tamaño deberá ser ligeramente superior al diámetro máximo de las probetas que se vayan a ensayar y las superficies de apoyo probeta-plato deberán estar rectificadas, de forma que la desviación de un punto cualquiera de la superficie con respecto al plano teórico no sea en ningún caso mayor de 13 μ m. El plato inferior se posicionará de forma que su superficie se encuentre en el plano perpendicular al eje del émbolo de aplicación de la carga y su apoyo será fijo. El plato superior se apoyará sobre una esfera cuyo centro deberá situarse en el eje del émbolo de aplicación de carga. El plato podrá bascular en todas direcciones, debiendo cumplirse la condición de que, en todo instante, el eje perpendicular al plato que atraviese su centro geométrico pase por el centro de la esfera. El plato deberá estar firmemente sostenido en su apoyo.

2.5 **Extensómetros.** Los extensómetros empleados en la medida de la deformación central de la probeta tendrán una base de medida menor de 0,5 veces la altura de la probeta y mayor de cuatro veces el tamaño máximo del árido utilizado en la fabricación de la misma. Su rango de lectura será menor o igual de $\pm 0,5$ mm y su precisión de lectura menor o igual de $\pm 0,25$ μ m (Nota 3).

Nota 3. Pueden ser de tipo resistivo o inductivo LVDT, y su base de medida se definirá con un error menor de $\pm 0,5$ μ m.

2.6 **Equipo informático de adquisición de datos.** La toma de datos se llevará a cabo de forma automática a través de un sistema compuesto por ordenador y tarjetas de conversión analógico-digital. Estas tarjetas permitirán el registro digital de las funciones de carga y extensométricas y su resolución será tal que el error que se introduzca con 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).

2.7 Recinto termostático. Una cámara o recinto que permita alojar la probeta y que pueda mantener la temperatura que se haya establecido para el ensayo con una variación máxima de $\pm 1^\circ\text{C}$.

2.8 Equipos de refrentado y serrado. Se dispondrá de una sierra de disco circular con borde de diamante o de otro material abrasivo análogo. La sierra estará dotada de los dispositivos necesarios que posibiliten la realización del corte con la precisión requerida para las dimensiones de la probeta. Se dispondrá de los elementos necesarios para el refrentado de las probetas.

2.9 Material general. Balanzas, bandejas, termómetros, cajas, etc.

3 PROCEDIMIENTO

3.1 Preparación de las probetas

3.1.1 Dimensiones de las probetas. Las probetas serán cilíndricas con una altura mayor o igual a dos veces su diámetro; las caras serán circulares, planas y perpendiculares al eje de la probeta.

3.1.2 Preparación de las caras de apoyo. Las caras de la probeta no presentarán irregularidades, con respecto a su plano teórico, mayores de $50\ \mu\text{m}$, y formarán un ángulo con el eje de la probeta de $90 \pm 1^\circ\text{C}$. Con objeto de cumplir estos requisitos se serrarán las caras, si fuese necesario, y se refrentarán.

3.1.3 Densidad relativa de las probetas. La determinación de la densidad relativa de las probetas se realizará antes del refrentado. Se puede emplear el método descrito en la norma NLT-168 para materiales tratados con algún aglomerante, u otro procedimiento de medida directa del volumen, para materiales cohesivos no aglomerados.

3.1.4 Conservación de las probetas. Antes de la realización del ensayo, las probetas deberán estar a una temperatura homogénea e igual a la que se especifique en el ensayo. Para ello se mantendrán durante más de 4 h previas al ensayo, a la temperatura especificada.

3.2 Ejecución del ensayo

3.2.1 Montaje de la probeta y extensómetros. La probeta se coloca centrada sobre el plato inferior. Cada extensómetro se fija a una generatriz de la probeta y se sitúa en el centro de su altura. Si se emplean dos extensómetros, éstos se colocan en dos generatrices opuestas; si se emplean tres se sitúan en tres generatrices cuyos puntos de intersección

con un plano perpendicular formen un triángulo equilátero (Nota 4).

Nota 4. Con objeto de reducir los rozamientos existentes entre el plato de carga y las caras, refrentadas o no, de la probeta, se puede interponer un fieltro o tejido homogéneo impregnado en un producto aceitoso. Se debe comprobar que esta interposición no modifica apreciablemente ($\pm 1^\circ$) el ángulo de desfase. Además, la presión introducida por la carga estática (apartado 3.2.2) entre el plato de carga y las caras de la probeta será mayor de $0.15\ \text{MPa}$ ($1.5\ \text{kg/cm}^2$).

3.2.2 Aplicación de la carga de ensayo. Una vez realizado el montaje de la probeta y de los extensómetros, se aplica una carga estática de compresión suficiente para asegurar un buen asiento entre los platos de carga y las caras refrentadas de la probeta. A continuación se superpone una carga cíclica sinusoidal de frecuencia y amplitud determinadas, y se mantiene esta carga durante el tiempo necesario para completar 1.000 ciclos. Posteriormente se retira la carga cíclica y la estática y se desmontan los extensómetros y la probeta.

3.2.3 Registro de funciones de carga y extensométricas. Durante los ciclos números 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 y 1.000 se registran la función de carga y las funciones extensométricas de cada extensómetro empleado. Para ello se utiliza el equipo de adquisición de datos. Las funciones de carga y extensométricas, para cada ciclo considerado, se representan 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 carga aplicada, la frecuencia de lectura de cada función habrá de ser mayor de $50 F$.

4 RESULTADOS

4.1 Cálculo de las funciones tensión y deformación de un ciclo. La función tensión se determina a partir de la función de carga, dividiendo su valor, en cada uno de los más de 50 puntos leídos, por la superficie de la sección de la probeta ensayada, igual a $\pi d^2/4$, siendo d el diámetro de la probeta. La función tensión, por tanto, se define por más de 50 puntos. La función deformación de cada extensómetro se determina a partir de su función extensométrica, dividiendo su valor en cada uno de los más de 50 puntos leídos, por la base de medida del extensómetro. Tanto la función como la base de medida del extensómetro se expresarán en las mismas unidades de longitud. La función de deformación general se determina calculando el valor medio de las funciones de deformación correspondientes a todos los extensómetros que se hayan empleado en el ensayo.

4.2 Cálculo del módulo dinámico y ángulo de desfase de un ciclo. El módulo dinámico en un de-

terminado ciclo se define como el cociente entre la amplitud cíclica de la función tensión y la amplitud cíclica de la función deformación general. La amplitud cíclica de una función es el valor absoluto de la diferencia entre su valor máximo y su valor mínimo en un ciclo.

$$MD = \frac{T_c}{\epsilon_c}$$

siendo

MD = Módulo dinámico.

T_c = Amplitud cíclica de la función tensión en MPa.

ϵ_c = Amplitud cíclica de la función deformación general adimensional.

El ángulo de desfase entre la función de tensión y la función de deformación general se obtiene aproximando por el método de mínimos cuadrados cada una de estas dos funciones (definidas por más de 50 puntos equidistantes) a una función del tipo $A \cdot \sin(2\pi Ft + B) + K$ (Nota 5). Se obtienen, por tanto, las siguientes funciones aproximadas:

$$T_a = A_T \sin(2\pi Ft + B_T) + K_T$$

$$\epsilon_a = A_\epsilon \sin(2\pi Ft + B_\epsilon) + K_\epsilon$$

siendo T_a y ϵ_a valor de las funciones tensión y deformación general aproximadas (en pascals y adimensional, respectivamente).

F = Frecuencia de la función de carga (Hz).

t = Tiempo (segundos).

$2A_T, 2A_\epsilon$ = Amplitud de las funciones de tensión y deformación general aproximada (pascals y adimensional).

B_T, B_ϵ = Angulos de fase de la función tensión y la función deformación general aproximadas (radianes).

K_T, K_ϵ = constantes.

El ángulo de desfase se define como el desfase existente entre las funciones tensión y deformación general. Vendrá dado, por tanto, por $B_\epsilon - B_T$.

$$\varnothing = (B_\epsilon - B_T) \cdot \frac{180}{\pi}$$

siendo

\varnothing = Angulo de desfase en grados.

Nota 5. 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.

Se pueden emplear otros métodos para el cálculo del ángulo de desfase si sus resultados son más exactos que los determinados por el método descrito.

4.3 Expresión de los resultados. Los resultados deben incluir los siguientes datos para cada probeta:

- Altura y diámetro nominales, en cm.
- Densidades relativas.
- Carga estática aplicada en kN o kgf.
- Amplitud de carga dinámica aplicada en kN o kgf.
- Frecuencia de la carga dinámica aplicada en Hz.
- Temperatura de ensayo en °C.
- Módulo dinámico (en MPa o kgf/cm²) y ángulo de desfase (en grados) correspondientes a los ciclos 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 y 1.000.

Como resultado final para el módulo dinámico y el ángulo de desfase se tomará la media de las diez determinaciones realizadas.

5 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 del CEDEX.

6 NORMA PARA CONSULTA

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