

Influencia de las condiciones de ensayo en la fatiga de las mezclas bituminosas. Efectos de los períodos de reposo

MARÍA CASTRO MALPICA (*); JULIÁN GARCÍA CARRETERO (**); RAFAEL JIMÉNEZ SÁEZ (***)

RESUMEN Debido a la dificultad de reproducir en laboratorio el estado tensional del firme cuando es solicitado, los investigadores han adoptado diferentes simplificaciones que han dado lugar a una gran variedad de métodos de ensayo de fatiga, cuya influencia en los resultados, para una misma mezcla bituminosa, se ha comprobado que es muy importante.

Un intento de mejorar la simulación de la realidad consiste en introducir en el método de ensayo unos períodos de reposo, que tienen como finalidad representar el tiempo que transcurre entre el paso de dos ejes sucesivos.

En este artículo se pasa revista a la influencia de los distintos factores de ensayo en los resultados y se describe con detenimiento la de los períodos de reposo.

INFLUENCE OF THE TEST CONDITIONS ON THE FATIGUE OF BITUMINOUS MIXES. EFFECTS OF REST PERIODS

ABSTRACT *The laboratory simulation of the tensional state of a loaded road pavement has proven to be difficult. Due to this, researchers have adopted different simplifications, which have developed into a great variety of fatigue testing methods. However, the resulting fatigue characteristics for a bituminous material are strongly dependent on the method followed.*

As a better approach to reality, some rest periods have been introduced in the testing procedure, which are intended to represent the time that lapses between two successive axle loads.

In this paper, the influence of the different testing factors on the results is reviewed. The effect of the rest periods is also described in detail.

Palabras clave: Mezclas bituminosas; Ensayos de fatiga; Períodos de reposo.

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales de las carreteras están sometidos a cargas de pequeña duración cada vez que pasa un eje de un vehículo. Dichas cargas causan daños de pequeña entidad que provocan una pérdida de rigidez del material y pueden, por acumulación, producir a largo plazo su fisuración, se dice que se ha producido un fallo por fatiga.

Debido a la dificultad de reproducir en laboratorio el estado tensional del firme al ser solicitado, los investigadores han adoptado diferentes simplificaciones que han dado lugar a una gran variedad de métodos de ensayo de fatiga, cuya influencia en los resultados, para una misma mezcla bituminosa, se ha comprobado que es muy importante.

Los distintos métodos de ensayo de fatiga tienen en común que someten a una probeta de material a cargas repetidas y registran el número de ciclos que soporta hasta

que se produce el fallo. Usualmente, los ciclos de carga empleados se suceden continuamente sin que exista ningún intervalo de tiempo en el que el material no esté solicitado.

Un intento de mejorar la simulación de la realidad consiste en introducir en el método de ensayo unos períodos de reposo, que tienen como finalidad representar el tiempo que transcurre entre el paso de dos ejes sucesivos.

En este artículo se pasa revista a la influencia de los distintos factores de ensayo en los resultados y se describe con detenimiento la de los períodos de reposo, considerando la experiencia extranjera, así como la llevada a cabo en este campo, por primera vez en nuestro país, en el Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX, donde se ha desarrollado un nuevo ensayo de fatiga con períodos de reposo y se ha aplicado al estudio de diversas mezclas bituminosas.

2. ENSAYOS DE FATIGA

Los primeros estudios sobre la fatiga se llevan a cabo por Wohler en 1852. Hoy en día, son los metales los materiales de los que se dispone de un conocimiento más profundo con relación a la fatiga, pero se han realizado también numerosas investigaciones con hormigones, materiales para carreteras y gran número de materiales compuestos.

(*) Dra. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid.

(**) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Centro de Estudios de Carreteras (CEDEX). Ministerio de Fomento.

(***) Licenciado en Ciencias Químicas. Centro de Estudios de Carreteras (CEDEX). Ministerio de Fomento.

El reconocimiento del fallo por fatiga en los firmes con pavimento bituminoso no llegó hasta después de 1940, cuando Grumm y Porter ponen de manifiesto la relación existente entre la naturaleza repetitiva de las cargas del tráfico y el comportamiento de los firmes.

El fallo por fatiga en los materiales bituminosos de las carreteras se produce a largo plazo por la acumulación de daños de pequeña entidad, ocasionados por las cargas de corta duración a las que están sometidos, y que van provocando una pérdida paulatina de rigidez en el material.

Usualmente, los ensayos que se utilizan para caracterizar la fatiga consisten en someter a una probeta de material a cargas repetidas, generalmente idénticas, y registrar el número de ciclos que soporta hasta que se produce el fallo. A dicho número se le denomina duración de vida o simplemente vida en fatiga. El momento en que se produce el fallo se define mediante un criterio específico.

La curva que representa la vida en fatiga frente a la amplitud de la sollicitación aplicada (tensión σ o deformación ϵ) es exponencial y se suele denominar ley de Whöler o de fatiga. En coordenadas logarítmicas es una recta.

Los principales problemas que se plantean en el estudio de la fatiga son la representatividad de los métodos de ensayo, la gran dependencia de los resultados frente al método de ensayo utilizado y las características de la mezcla, así como la dispersión de éstos.

La dependencia de los resultados frente al tipo de ensayo dificulta su comparación y su repercusión se ve aumentada si se tiene en cuenta que actualmente existe una gran variedad de ensayos de fatiga.

La dispersión de resultados está muy relacionada con el carácter local de los fenómenos que se producen a lo largo del ensayo y se ve favorecida por la heterogeneidad de las mezclas bituminosas.

Hay que tener en cuenta que las mezclas bituminosas presentan un comportamiento muy complejo. Su respuesta depende, entre otros factores, de la temperatura, grado de humedad, velocidad de aplicación de la carga y nivel tensional. Por ello, los investigadores tratan al máximo de reproducir en laboratorio las condiciones que se dan en la carretera. Sin embargo, dada la gran dificultad de simular el complejo sistema existente en el firme de las carreteras, aquellas condiciones que son imposibles o difíciles de reproducir, se simplifican.

Debido a las simplificaciones que es usual efectuar en los procedimientos de ensayo frente a la realidad, las leyes de fatiga obtenidas mediante ensayos en laboratorio pueden emplearse para clasificar los materiales, pero no para predecir la vida de servicio de los firmes. Necesitan un coeficiente de corrección que tenga en cuenta los siguientes factores:

- En realidad, las cargas no se aplican siempre sobre el mismo punto, sino que se distribuyen en la sección transversal.
- Las mezclas bituminosas en la carretera se ven afectadas por períodos de reposo, sin cargas, que tienden a aumentar su vida de fatiga.
- La manifestación del daño no es inmediata ya que desde que se inicia la grieta hasta que aparece en superficie transcurre un cierto tiempo.
- La unión de todos estos factores puede suponer multiplicar la vida de fatiga por un coeficiente comprendido entre 10 y 100.

3. INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE ENSAYO EN LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE FATIGA

En una primera aproximación, las variables de ensayo que afectarían al comportamiento en fatiga se podrían clasificar en:

- Asociadas a la sollicitación.
- Asociadas a las condiciones ambientales.
- Asociadas a las características de la mezcla.

Entre las relacionadas con las condiciones ambientales se encuentran la temperatura, la humedad y la alteración de las propiedades del material durante la vida de servicio.

La absorción de humedad podría llevar a una disminución de la rigidez y a una menor vida en fatiga, pero es éste un factor no suficientemente estudiado todavía y que no se suele reproducir en laboratorio. La alteración de las propiedades del material durante la vida de servicio del firme afecta fundamentalmente a los huecos en mezcla y a las propiedades del ligante, por lo que en definitiva, se englobaría dentro de las asociadas a las características de la mezcla.

Por tanto, desde un enfoque más sintetizador, los factores que fundamentalmente influyen en los resultados de los ensayos de fatiga realizados en laboratorio se podrían agrupar en aquellos relacionados con las condiciones de ensayo (que incluirían a los asociados con la sollicitación y la temperatura) y los relativos a las características de la mezcla bituminosa. Entre los primeros cabe destacar:

- Método de ensayo.
- Forma de la onda.
- Modo de sollicitación.
- Frecuencia.
- Temperatura.

MÉTODO DE ENSAYO

Al igual que existen numerosas formas de sollicitar un material, existen otras tantas de fatigarlo. Sin embargo, hoy en día los métodos de ensayo más utilizados son los que emplean la flexión en sus diversas variantes, que a su vez llevan asociadas distintas formas de probetas, y en menor medida, los ensayos de tracción-compresión (fundamentalmente tracción indirecta) (Fig. 1).

Convencionalmente se acepta que mediante los ensayos de flexión se intenta reproducir las repetidas flexiones que aparecen en el firme debido al paso de los vehículos, mientras que los de tracción-compresión representarían las tracciones inducidas en la base del pavimento por dichas flexiones.

Son escasas las investigaciones realizadas para comparar los resultados de diferentes tipos de ensayos, pero éstas parecen indicar un aumento de la vida en fatiga con ensayos de tracción-compresión frente a los de flexión para el mismo nivel de deformación.

FORMA DE LA ONDA

En la práctica los firmes están sometidos a una sucesión de pulsaciones de carga de distintas amplitudes y longitudes de onda, y con intervalos entre pulsaciones también variables. Dada la dificultad para reproducir en laboratorio el espectro de cargas al que estaría sometido el firme, los investigadores han adoptado diferentes simplificaciones (Fig. 2). La

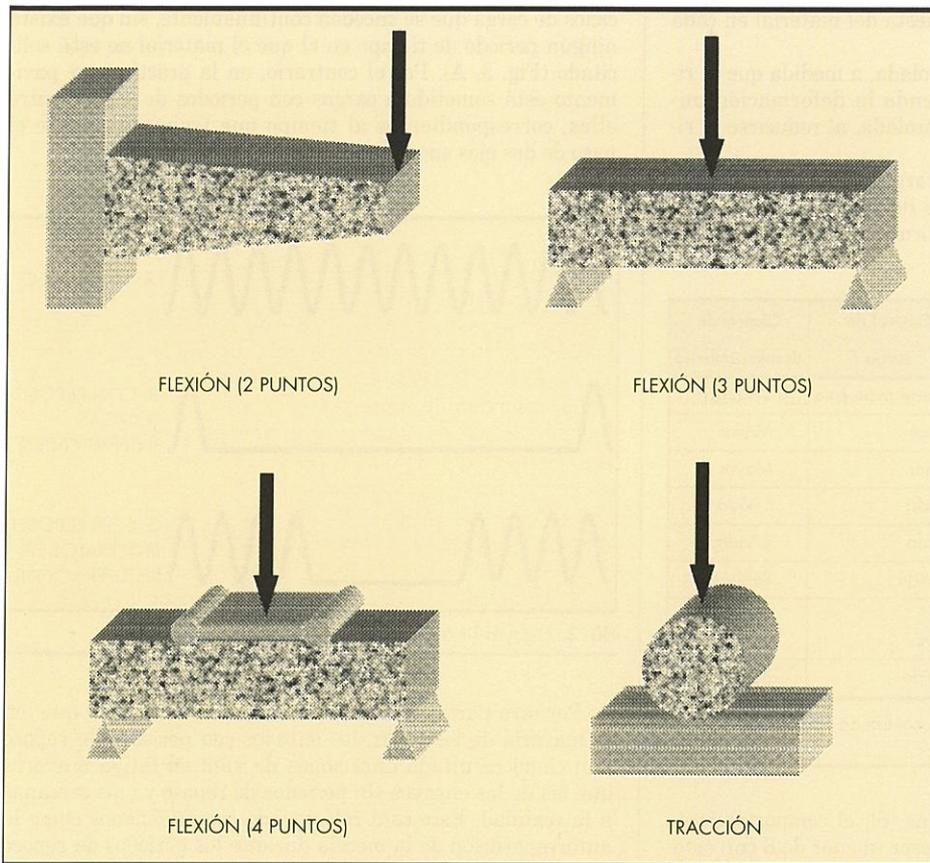


FIG. 1. Métodos de ensayo de fatiga más utilizados hoy en día.

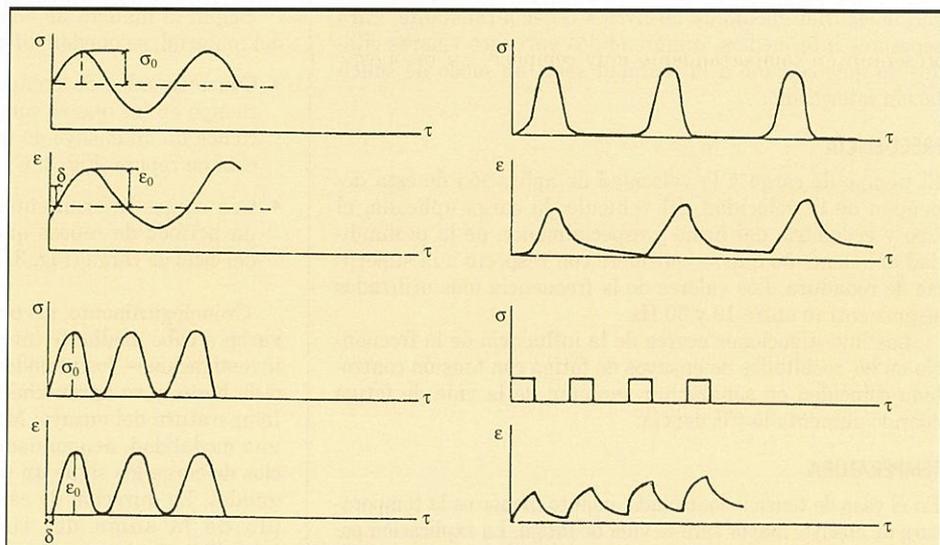


FIG. 2. Formas de onda más utilizadas [7].

forma de ciclo de carga más utilizada es la sinusoidal, por ser la que más se aproxima a la realidad.

Por otra parte, independientemente de la forma del ciclo de carga elegido, se pueden utilizar solicitaciones constituidas por ciclos de carga que se suceden continuamente sin que exista ningún intervalo de tiempo en el que el material no esté solicitado o, por el contrario, incluir períodos de reposo entre ellos, que tratarían de simular el tiempo transcurrido entre el paso de dos ejes sucesivos.

Como más adelante se expone, la inclusión de períodos de reposo en la sollicitación suele producir duraciones de vida en fatiga mayores que las de los ensayos sin períodos de reposo y más cercanas a la realidad.

MODO DE SOLICITACIÓN

Los ensayos de fatiga pueden llevarse a cabo aplicando una carga de amplitud constante (tensión controlada) o un desplazamiento de amplitud constante (deformación contro-

lada), siendo muy distinta la respuesta del material en cada caso.

En los ensayos de tensión controlada, a medida que la rigidez de la mezcla se va reduciendo la deformación aumenta. En los de deformación controlada, al reducirse la rigidez disminuye la tensión.

En los ensayos con control de carga se obtienen duraciones de fatiga menores que en los de control de desplazamiento para un mismo nivel de deformación inicial (Tabla 1).

	Control de carga	Control de desplazamiento
Evolución durante el ensayo	↑ Desplazamiento	↓ Carga
Vida	Menor	Mayor
Dispersión	Menor	Mayor
↑ Temperatura (> 0°C)	↓ Vida	↑ Vida
↑ Módulo	↑ Vida	↓ Vida
Efecto del reposo	Grande	Pequeño
Duración de la propagación de las fisuras	Breve	Larga
Crecimiento del daño	Rápido	Moderado

TABLA 1. Comparación entre ensayos con control de carga y de desplazamiento.

Según investigaciones realizadas [6], el comportamiento de los pavimentos de pequeño espesor (menor de 6 cm) estaría mejor representado a través de ensayos a deformación constante, mientras que los de gran espesor (mayor de 15 cm) lo estarían mediante ensayos a tensión constante. Para espesores intermedios, comprendidos entre los valores citados, lo más cercano a la realidad sería un modo de sollicitación intermedio.

FRECUENCIA

El tiempo de carga y la velocidad de aplicación de ésta dependen de la velocidad del vehículo, la carga aplicada, el tipo y geometría del firme y especialmente, de la profundidad del elemento que se considere con respecto a la superficie de rodadura. Los valores de la frecuencia más utilizados se encuentran entre 10 y 30 Hz.

Las investigaciones acerca de la influencia de la frecuencia en los resultados de ensayos de fatiga con tensión controlada coinciden en señalar un aumento de la vida de fatiga cuando aumenta la frecuencia.

TEMPERATURA

En el caso de tensión controlada, cuanto menor es la temperatura de ensayo, mayor será la vida de fatiga. La explicación podría ser que, como al disminuir la temperatura aumenta la rigidez del material, para el nivel de tensión prefijado la deformación sería menor y aumentarían los ciclos hasta fatiga.

En el caso de deformación controlada, un aumento de temperatura trae consigo un aumento de vida en fatiga, pues la propagación de las fisuras es menor con mayores temperaturas.

4. EFECTOS DE LOS PERÍODOS DE REPOSO

El estudio empírico de la fatiga de las mezclas bituminosas se realiza habitualmente mediante ensayos dinámicos con

ciclos de carga que se suceden continuamente, sin que exista ningún período de tiempo en el que el material no esté sollicitado (Fig. 3, A). Por el contrario, en la práctica, un pavimento está sometido a cargas con períodos de reposo entre ellas, correspondientes al tiempo que transcurre entre el paso de dos ejes sucesivos.

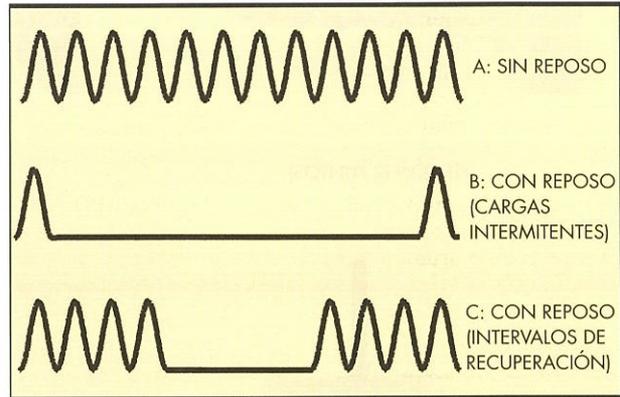


FIG. 3. Ensayos sin/con reposo.

Por otra parte, se ha comprobado empíricamente que, en la mayoría de los casos, los ensayos con períodos de reposo dan como resultado duraciones de vida en fatiga mayores que las de los ensayos sin períodos de reposo y más cercanas a la realidad. Esto está relacionado con fenómenos como la autorreparación de la mezcla durante los períodos de reposo y la disipación de energía en forma de calor durante el ensayo.

Según la manera de efectuar el reposo en la sollicitación del material, se pueden diferenciar dos tipos de ensayos:

- Con intervalos de recuperación: se alternan períodos de tiempo en los que se somete a la probeta a la sollicitación cíclica de un ensayo de fatiga clásico con otros en los que está en reposo (Fig. 3, C).
- Con cargas intermitentes: a cada ciclo de carga le sigue un período de reposo que es un múltiplo de la duración del ciclo de carga (Fig. 3, B).

Cronológicamente, los primeros ensayos con reposo se llevaron a cabo mediante intervalos de recuperación. En estas investigaciones, los períodos de reposo solían ser de minutos o de horas y se aprovechaban, en ocasiones, para variar la temperatura del ensayo. Más recientemente, se ha utilizado una modalidad, denominada de salvas, en la que a varios ciclos de carga les sigue un período de reposo del orden de segundos. La duración de este período de reposo es un múltiplo de la suma del tiempo de los ciclos de carga inmediatamente precedentes.

Los ensayos con cargas intermitentes son más modernos y reflejan mejor la secuencia de carga provocada por el tráfico sobre el firme que los de intervalos de recuperación.

4.1. DISIPACIÓN DE ENERGÍA Y AUTORREPARACIÓN

Debido a su naturaleza viscosa, las mezclas bituminosas disipan energía en forma de calor durante cada ciclo del ensayo de fatiga. Como consecuencia de lo cual, aumenta la temperatura de la probeta. Este aumento no es uniforme en la probeta sino que es más acusado en las zonas de mayor velocidad de deformación (que en las probetas ensayadas

coincide con la zona de mayor concentración de tensiones y deformaciones).

El calentamiento de la probeta lleva consigo una modificación local de las características mecánicas del material. Se produce una reducción localizada del módulo que puede falsear los resultados del ensayo (si se ha adoptado un criterio de fin de ensayo ligado a la rigidez de la probeta).

Una forma de tratar de evitar las consecuencias negativas del calentamiento es incluir períodos de reposo. En un ensayo de fatiga con períodos de reposo, si éstos tienen suficiente duración, la energía disipada en forma de calor se evacua durante los períodos de reposo y el calentamiento de la probeta es mucho menor que en un ensayo sin períodos de reposo.

Por otra parte, a lo largo de un ensayo de fatiga el valor del módulo va disminuyendo conforme a la curva ABD de la figura 4. Si en el ensayo se intercala un período de reposo, durante éste se produce una recuperación del valor del módulo ($\Delta M = C-B$). Después del reposo el ensayo seguiría la curva CE.

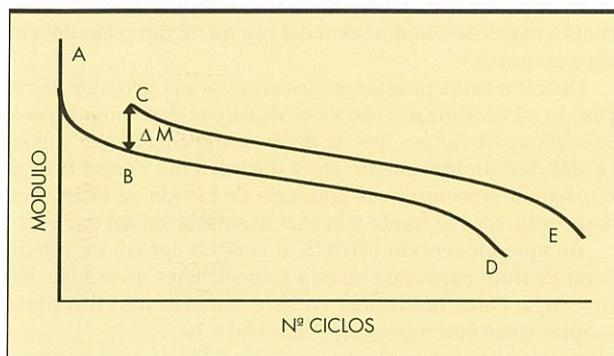


FIG. 4. Efecto de un período de reposo en el módulo (fuera de escala).

Como consecuencia de este aumento del módulo en ausencia de sollicitación, la vida de una mezcla bituminosa en un ensayo de fatiga suele ser superior si éste se realiza con períodos de reposo. Se dice que se ha producido una autorreparación de la mezcla durante los períodos de reposo.

El fenómeno de la autorreparación es poco conocido hasta la fecha. Lo único que parece estar ampliamente asumido es que, de hecho, está asociado a la reducción de temperatura que se produce durante el período de reposo que induce una recuperación del módulo. Algunos autores afirman que se debe a que el betún "pega" las microfisuras durante el reposo [5].

Los resultados de los ensayos de fatiga llevados a cabo por De la Roche en 1996, así como por varios laboratorios en el marco del RILEM, parecen confirmar la existencia de dos mecanismos distintos de fatiga, que ya fueron expuestos por Verstraeten en 1991 [9] [4] [7]:

- Efecto tixotrópico: a temperaturas relativamente altas (superiores a 15° C) la fatiga se debería al comportamiento tixotrópico del betún. Bajo cargas repetidas el betún pasa progresivamente de una estructura gel a una estructura sol.
- Daño estructural: a temperaturas relativamente bajas (inferiores a 5° C) la fatiga se debería a la aparición de daños estructurales en el seno de las mezclas.

Según los mencionados investigadores, estos mecanismos de fatiga permitirían explicar la autorreparación de la mez-

cla durante los períodos de reposo. A altas temperaturas, la autorreparación se produciría por una vuelta de la estructura sol del betún a la estructura gel y, si el tiempo de reposo es suficiente, sería casi total. A bajas temperaturas los períodos de reposo no permitirían la autorreparación de los daños estructurales creados por los ciclos de carga y la recuperación sólo sería parcial.

4.2. INFLUENCIA DEL AUMENTO DEL PERÍODO DE REPOSO

Como ya se ha referido, la inclusión de períodos de reposo en la onda de carga suele producir, a igualdad de amplitud de sollicitación, aumentos del número de ciclos que resiste hasta fatiga una probeta. Además, se ha comprobado que un aumento en la duración del período de reposo produce un mayor incremento de la vida a fatiga. Sin embargo, para valores altos del tiempo de reposo, el aumento de éste lleva consigo aumentos cada vez más pequeños de la vida de la mezcla. Este comportamiento se ha reflejado en las figuras 5 y 6, donde se denomina i al cociente entre la duración del período de reposo y la duración del ciclo de carga, N_i al número de ciclos hasta fatiga cuando el ensayo se realiza con cargas intermitentes y N_c cuando se efectúa con carga cíclica continua (sin reposo).

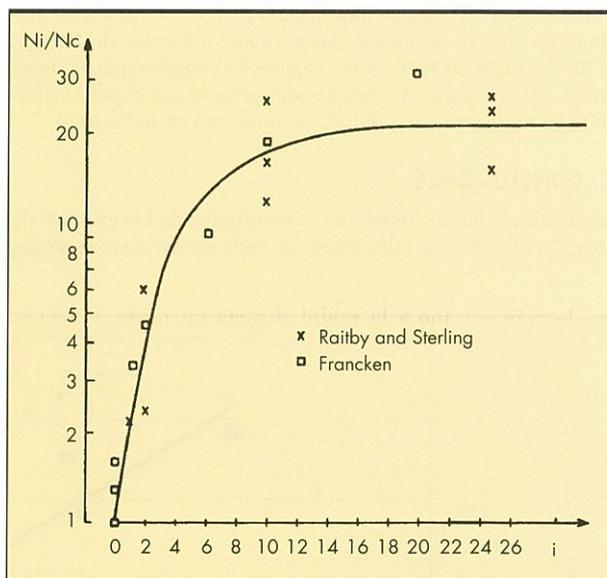


FIG. 5. Vida a fatiga en función del período de reposo (Verstraeten et al. [8])

Por otra parte, a igualdad de número de ciclos, cuanto mayor sea la duración del reposo, la duración del ensayo es mayor. Se define como *período óptimo de reposo* al valor a partir del cual, un incremento en la duración del reposo traería consigo un aumento en la ganancia de la vida en fatiga que sería despreciable frente a la excesiva duración del ensayo.

Aunque en sentido estricto el período óptimo de reposo sería distinto para cada mezcla y condiciones de ensayo, las investigaciones realizadas en esta materia han llevado a aceptar como óptimos valores en torno a $i = 10$ [6].

Según la experiencia existente, los aumentos en la vida en fatiga debidos al reposo son muy distintos según el tipo de mezcla y las condiciones del ensayo: desde no conseguirse incrementos significativos hasta alcanzar vidas 25 veces superiores si el ensayo se realiza con reposo.

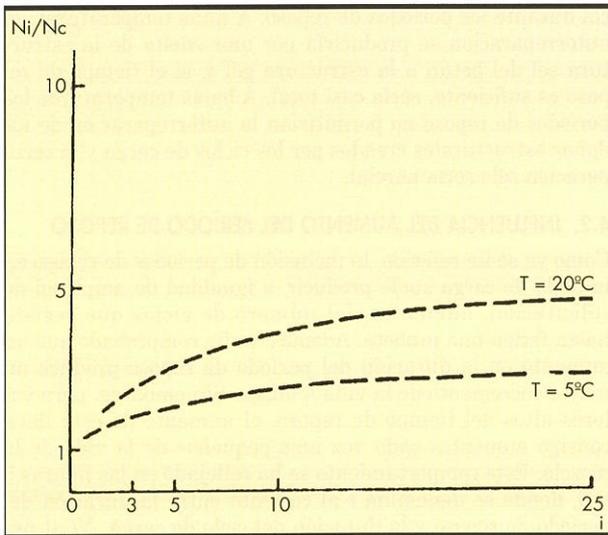


FIG. 6. Vida en fatiga en función del período de reposo y de la temperatura (Bonnaure [2]).

En investigaciones realizadas en el Centro de Estudios de Carreteras (CEDEX), se han llegado a obtener aumentos máximos de vida en fatiga debidos al reposo del orden de 10 (Fig. 7) [3]. Las características principales del ensayo que se desarrolló, en comparación con las del ensayo sin reposo (NLT-350), ya anteriormente en uso, se muestran en la figura 8.

5. CONCLUSIONES

Los factores que influyen en los resultados de los ensayos de fatiga realizados en laboratorio se podrían agrupar en aque-

llos relacionados con las condiciones de ensayo y los relativos a las características de la mezcla bituminosa. Entre los primeros cabe destacar el método de ensayo, la forma de la onda, el modo de sollicitación, la frecuencia y la temperatura.

La utilización de procedimientos de ensayo con sollicitaciones que incluyan períodos de reposo, en los que el material no esté sometido a cargas, supone un mayor acercamiento a la realidad, puesto que se trataría de simular con ellos el tiempo que transcurre entre el paso de dos ejes sucesivos.

Se ha comprobado que, en la mayoría de los casos, los ensayos con períodos de reposo dan como resultado duraciones de vida en fatiga mayores que las de los ensayos sin períodos de reposo y más cercanas a la realidad. Esto está relacionado con fenómenos como la autorreparación de la mezcla durante los períodos de reposo y la disipación de energía en forma de calor durante el ensayo.

Un aumento en la duración del período de reposo produce un mayor incremento de la vida en fatiga. Sin embargo, para valores altos del tiempo de reposo, el aumento de éste lleva consigo aumentos cada vez más pequeños de la vida de la mezcla. Por otra parte, a igualdad de número de ciclos, cuanto mayor sea la duración del reposo, la duración del ensayo es mayor.

Debido a estas razones, en los ensayos con períodos de reposo se suele utilizar como valor de éste el denominado *período óptimo de reposo*, que se define como aquel valor a partir del cual un incremento en la duración del reposo traería consigo un aumento en la ganancia de la vida en fatiga que sería despreciable frente a la excesiva duración del ensayo.

Aunque en sentido estricto el *período óptimo de reposo* sería distinto para cada mezcla y condiciones de ensayo, las investigaciones realizadas en esta materia han llevado a aceptar como óptimos valores en torno a 10.

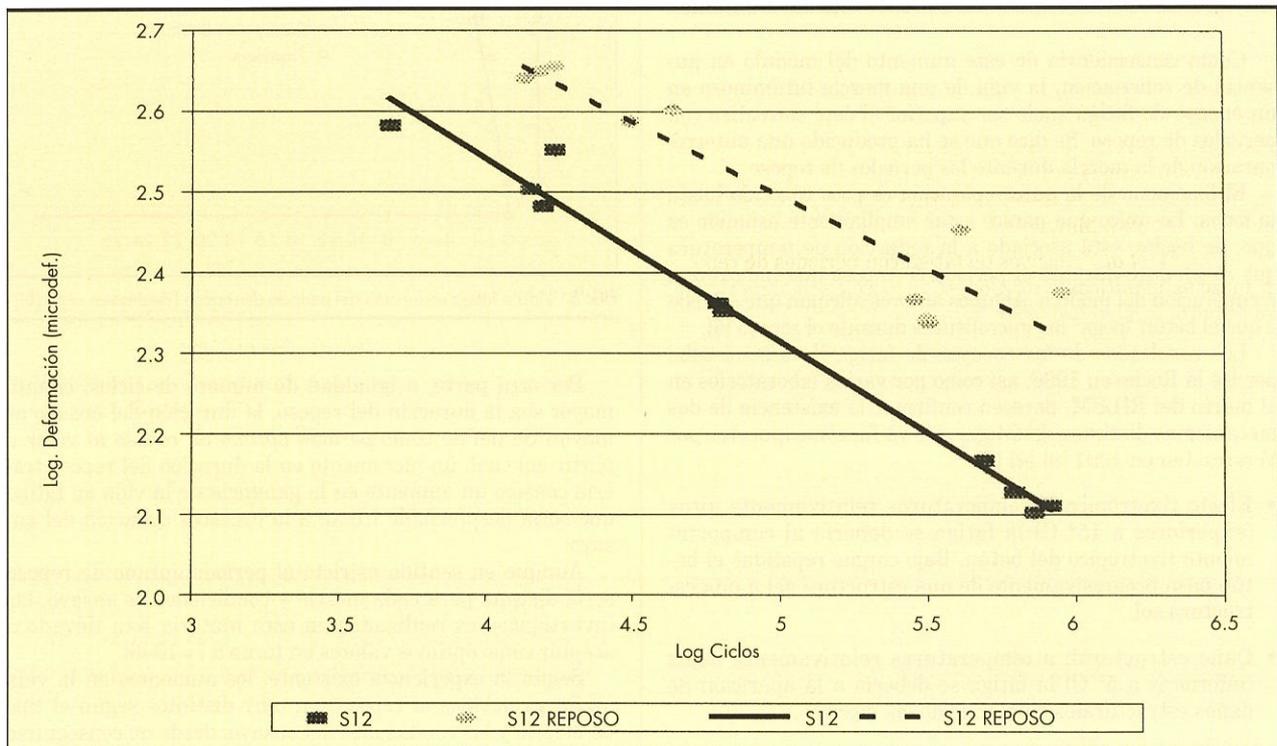


FIG. 7. Leyes de fatiga en deformación. Efecto del reposo. Mezcla S12 (CEDEX).

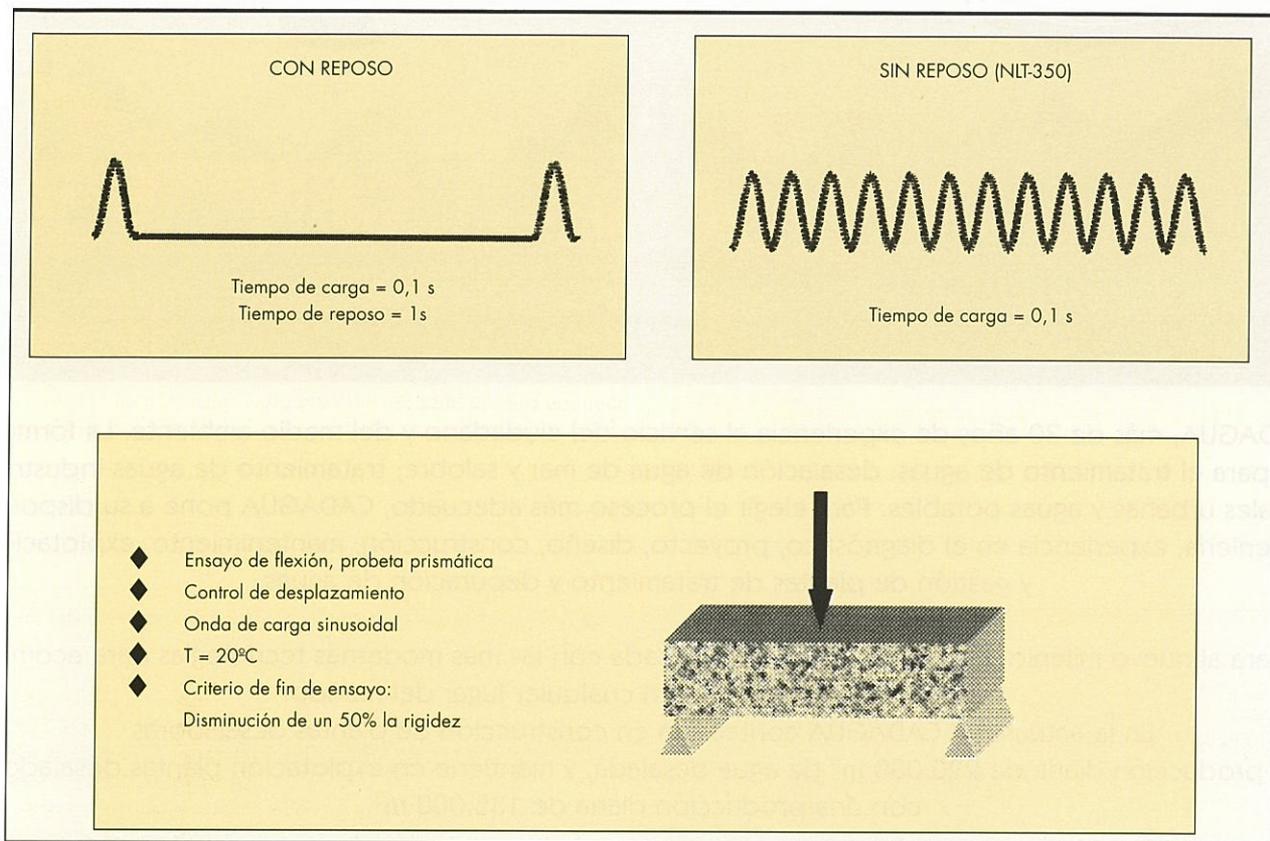


FIG. 8. Características de los ensayos con y sin reposo (CEDEX).

6. BIBLIOGRAFÍA

BARTOLOMÉ, C. "Ensayos de fatiga de mezclas bituminosas". Trabajo presentado en la asignatura de Doctorado *Caracterización dinámica de materiales para firmes de carreteras*. Departamento de Transportes. Universidad Politécnica de Madrid. Abril 1999.

BONNAURE, F. et al. "Etude en laboratoire de l'influence des temps de repos sur les caractéristiques de fatigue des enrobés bitumineux". *Revue Générale des Routes et des Aérodrômes*, N° 595. Marzo 1983.

CASTRO, M. et al. "Ensayos de fatiga con períodos de reposo en mezclas asfálticas". 10º Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Noviembre 1999.

DE LA ROCHE, C. "Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux". Tesis doctoral. Ecole Central de Paris, Paris 1996.

DE LA ROCHE, C. y MARSAC, P. "Caractérisation expérimentale de la dissipation thermique dans un enrobé bitumi-

neux sollicité en fatigue". *Eurasphalt & Eurobitume Congress*. Mayo 1996.

DI BENEDETTO H. et al. "Fatigue of bituminous mixtures: different approaches and RILEM interlaboratory tests". *Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium*, Lyon, mayo 1997.

FRANCKEN L. y VERSTRAETEN J. "Interlaboratory test program on complex modulus and fatigue". "Bituminous binders and mixes" editado por L. Francken y publicado por E & FN Spon, Londres, 1998.

VERSTRAETEN, J. et al. "Rational and practical design of asphalt pavements to avoid cracking and rutting". *Proceedings of 5th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Ann Arbor 1982.

VERSTRAETEN, J. "Fatigue of bituminous mixes and bitumen thixotropy". *Proceedings of XIXth World Road Congress, Session TC 8: Flexible Roads*. AIPCR, Marrakech, 1991.