Nuevo procedimiento para evaluar el comportamiento a fatiga en pavimentos asfálticos a través del ensayo Fénix

New procedure to assess the fatigue behavior in asphalt pavements by Fénix test

Gonzalo A. Valdés V.[1] Félix E. Pérez-Jiménez[2] Ramón Botella N.[2]

Recibido 12 de septiembre de 2012, aceptado 23 de abril de 2013
Received: September 12, 2012 Accepted: April 23, 2013

RESUMEN

Este artículo presenta los resultados de un estudio experimental y su aplicación en una metodología que permite evaluar de una manera sencilla el comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas en estructuras de pavimentos. La metodología presentada y su aplicación se basan en la correlación obtenida de los parámetros de rigidez y deformación de un nuevo ensayo de fractura, el ensayo Fénix, y los parámetros de las leyes de fatiga entregados por el ensayo de fatiga a flexotracción en tres puntos especificados en la norma UNE-EN12697-24. Para el estudio experimental se utilizaron cuatro granulometrías especificadas en España para mezclas asfálticas: G-20, S-20, S-20R60 y S-12R40. Dos de las granulometrías contienen diferentes porcentajes de material reciclado de pavimentos (RAP) en su composición (S-20R60 y S-12R40 con 60% y 40% de RAP, respectivamente). Las mezclas G-20 y S-20 fueron fabricadas con los asfaltos de penetración B60/70 y B13/22, y las temperaturas de ensayo fueron 5 y 20 °C. Los ligantes utilizados para la fabricación de las mezclas S-20R60 y S-12R40 fueron de penetración 250 y 200 dmm, respectivamente. La temperatura de ensayo de las mezclas RAP fue de 20 °C. La principal conclusión obtenida de los resultados de esta investigación fue que la metodología propuesta basada en el ensayo Fénix permite evaluar la vida a fatiga de una estructura de pavimento por medio de un procedimiento sencillo. A su vez, entregar una solución a la problemática presentada por la complejidad y tiempo requerido de los ensayos de fatiga de las mezclas asfálticas.

Palabras clave: Mezcla asfáltica, agrietamiento, ensayo de tracción directa, fatiga, ensayo Fénix.

ABSTRACT

This article presents an experimental study and its application in a methodology to evaluate the fatigue behavior of asphalt mixtures in pavement structures. This methodology and its application are based on the correlations obtained between stiffness and deformation parameters of a simple new fracture test, named Fénix test, and those obtained by the fatigue laws determined by the three point bending beam fatigue test, which complies with the European standard UNE-EN 12697-24. Four different Spanish asphalt mixture gradations were used, named G-20, S-20, S-20R60 and S-12R40, respectively. Two were also based on standard gradations but had a different percentage of Recycled Asphalt Pavement, RAP (S-20R60 and S-12R40 with 60% and 40% of RAP, respectively). Two mixtures, G-20 and S-20, were manufactured with penetration binders B60/70 and B13/22. Test temperatures were 5 °C and 20 °C. The binders of S-20R60 and S-12R40 mixtures had penetrations of 250 and 200 dmm, respectively. Mixtures test temperature was 20 °C. The main conclusion obtained from this research was that the proposed methodology allows evaluating the fatigue life of a pavement structure through a simple procedure. At the

[1] Departamento de Ingeniería de Obras Civiles. Universidad de La Frontera. Francisco Salazar 01145. Temuco, Chile. Teléfono +56/45/325680. E-mail: gvaldes@ufro.cl
[2] Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio. Universidad Politécnica de Cataluña. B1 C. Jordi Girona, 1-3 08034. Barcelona, España. E-mail: edmundo.perez@upc.edu; ramon.botella@upc.edu

same time, this study attempts to solve the problems presented by the fatigue testing of asphalt mixtures due to their complexity and the time required.

Keywords: Asphalt mixture, cracking, direct tensile test, fatigue, Fénix test.

INTRODUCCIÓN

El agrietamiento por fatiga de las capas de mezcla asfáltica es uno de los mecanismos de deterioro más frecuentes en los pavimentos flexibles. Este fenómeno es producido principalmente por la repetición de las cargas producidas por el tráfico, las cuales van dando lugar a la progresiva fisuración y rotura de las capas de mezcla asfáltica de la estructura de pavimento [1-3].

El deterioro por fatiga se caracteriza porque no se generan tensiones superiores a la resistencia máxima del material a la rotura por tracción en su fibra inferior, sino más bien se produce una microfisuración inicial, y consecuente el deterioro va progresando hasta que finalmente se produce el fallo por fatiga del pavimento [4-6].

Sumado a lo anterior, actualmente se considera que el comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas, representado mediante su ley de fatiga, es un parámetro fundamental en el dimensionamiento de las estructuras de pavimentos flexibles [7-8]. El problema que se presenta es que, debido a la complejidad de los ensayos cíclicos que evalúan la respuesta a fatiga de las mezclas asfálticas, esta propiedad no es considerada habitualmente durante la etapa de diseño.

De acuerdo con lo anterior, basándose en la hipótesis que las propiedades de cohesión y tenacidad que están presentes en las mezclas asfálticas, se presenta en este estudio un procedimiento práctico que permite estimar el comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas.

Este procedimiento se basa en el estudio de los parámetros de rigidez y deformación, resultantes de un ensayo sencillo de fractura desarrollado en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, llamado ensayo Fénix [9]. Se ha establecido su correlación con los parámetros de las leyes de fatiga entregados por el ensayo de fatiga a flexión en tres puntos, especificado en la actual norma europea UNE-EN 12697-24:2006.

ESTUDIO EXPERIMENTAL REALIZADO

Ensayos experimentales

Ensayo Fénix

El procedimiento del ensayo Fénix consiste en aplicar un esfuerzo de tracción a media probeta cilíndrica de mezcla asfáltica, fabricada por el procedimiento Marshall y seccionada en su plano diametral. Como se puede observar en la Figura 1a, la probeta tiene una fisura inducida de 5 mm a lo largo de todo su plano diametral. La velocidad especificada en el ensayo es de 1 mm/min. Una vez preparada la probeta con la fisura inducida, se fijan unas placas de acero a las dos secciones de la cara plana separadas por la entalladura. Estas, a su vez, son fijadas a los soportes de la prensa, permitiendo un movimiento de rotación respecto de las fijaciones, tal cual se ilustra en la Figura 1a.

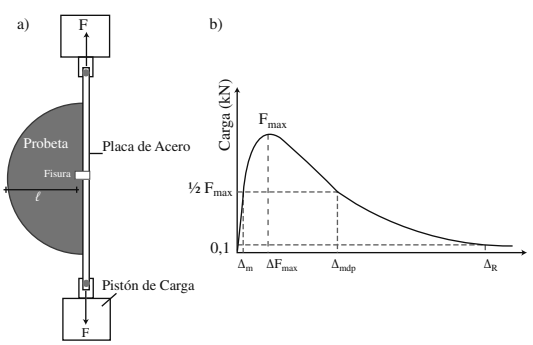

Figura 1. Ensayo Fénix. (a) Esquema montaje. (b) Curva carga desplazamiento resultante.

Este ensayo permite evaluar la tenacidad y la resistencia a la fisuración de las mezclas asfálticas a través del cálculo de la energía disipada en el proceso de fractura. Además, permite obtener una serie de parámetros que describen el comportamiento mecánico de las mezclas, entre los que destacan la carga máxima a tracción, F_{max}, el desplazamiento a

carga máxima, ΔF_{max}, el desplazamiento de rotura, ΔR, el índice de rigidez a tracción, IRT, y la energía disipada en el proceso de fisuración, GD [9].

Durante la ejecución del ensayo se van registrando las cargas generadas mediante un equipo de adquisición de datos, en función del desplazamiento, para así luego calcular los parámetros vinculados al proceso de fisuración.

La energía disipada en el proceso de fisuración del material, GD, se determina mediante la ecuación (1).

$$G_D = \frac{\int_0^{\Delta R} F \cdot du}{h \cdot l} \quad (1)$$

Donde, G_D = Energía disipada en el ensayo, J/m^2; F = carga kN, u= desplazamiento, mm; h= espesor de la probeta, m; l = longitud de ligamento, m.

El parámetro índice de rigidez a tracción, IRT, por medio de la ecuación (2). Otro parámetro calculado es el desplazamiento al 50% de la carga pospico, Δmdp, indicador que evalúa la capacidad de admitir deformación por parte de la mezcla (Figura 1).

$$I_{RT} = \frac{\frac{1}{2} F_{max}}{\Delta_m} \quad (2)$$

Donde, I_{RT} = Índice de rigidez a tracción, KN/mm; F_{max} = carga máxima, KN; Δ_m = desplazamiento pospico para ½ Fmax, mm.

Ensayo de fatiga a flexión en tres puntos

El procedimiento para determinar el comportamiento a fatiga de las mezclas evaluadas en la fase experimental de este estudio fue el que se encuentra recogido en la actual normativa europea UNE-EN 12697-24 en el anexo C. Este método caracteriza el comportamiento de las mezclas asfálticas sometidas a una carga cíclica, en un ensayo de fatiga por flexión en tres puntos, utilizando probetas prismáticas. El procedimiento consiste básicamente en aplicar a una probeta prismática, apoyada en sus extremos y sujeta en su centro, un desplazamiento que varía con el tiempo según una función sinusoidal, hasta el fallo de la probeta, Figura 2.

El módulo dinámico determinado por este procedimiento, 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, ecuación (3).

$$MD = \sigma_c / \varepsilon_c \quad (3)$$

Donde, MD = Módulo dinámico, MPa. σ_c= Amplitud cíclica del esfuerzo, MPa; ε_c= Amplitud cíclica de la deformación.

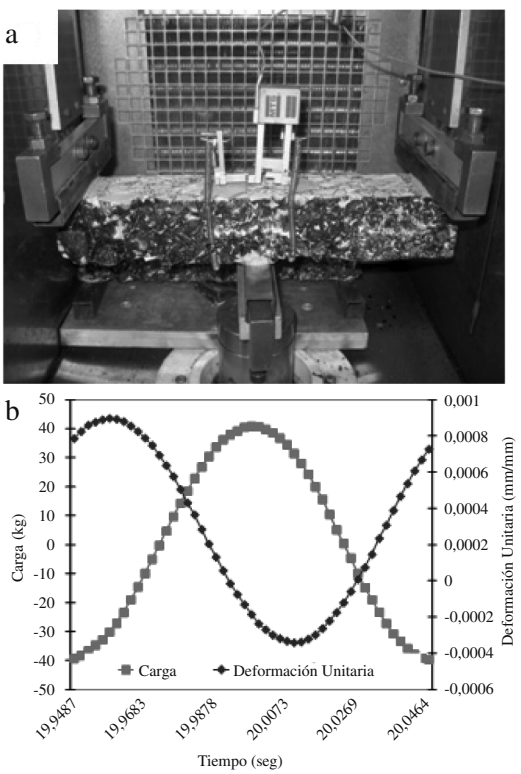

Figura 2. Ensayo de fatiga de viga a flexión en tres puntos. (a) Montaje del ensayo. (b) Ciclo carga-deformación unitaria.

Para la obtención de la ley de fatiga se consideran los pares de valores: mitad de la amplitud cíclica de la función de deformación en el ciclo número 200 y el número total de ciclos aplicados, N, determinados cuando el valor del MD se reduce a la mitad de su valor inicial (el MD inicial se determina como el cociente entre la amplitud cíclica de la función tensión y la amplitud cíclica de la función deformación en el ciclo 200 del ensayo). Luego, mediante una aproximación por mínimos cuadrados se obtiene la ley de fatiga, ecuación (4).

$$\varepsilon = a \cdot N^{-b} \quad (4)$$

Donde, ε = Deformación unitaria inicial; N = Número de aplicaciones de carga hasta el fallo por fatiga; a, b = Parámetros de la ley de fatiga dados por la regresión lineal realizada.

Mezclas asfálticas evaluadas

Las mezclas utilizadas se diseñaron y fabricaron de acuerdo con las especificaciones españolas, una mezcla tipo gruesa (G 20) y tres diferentes mezclas tipo semidensa (S 20, S 20R60 y S 12R40), con tamaños máximos de árido de 20 y 12 mm. Estas fueron fabricadas para ser ensayadas mediante los ensayos Fénix y fatiga a flexión en tres puntos. Dos de ellas, de tipo semidensa, se fabricaron con material reciclado con tasas de 40 y 60% de RAP, respectivamente. Los ligantes empleados en las mezclas convencionales sin RAP fueron de penetración de 60/70 y 13/22 dmm, mientras que para las mezclas con RAP (S 20R60 y S 12R40) se emplearon dos ligantes de penetraciones de 250 y 200 dmm, respectivamente. Las granulometrías utilizadas en las mezclas se observan en la Tabla 1.

Tabla 1. Granulometrías de mezclas utilizadas.

Tamaño tamiz UNE	S 20	G 20	S 12 R40	S 20 R60
	Pasa (%)	Pasa (%)	Pasa (%)	Pasa (%)
25	100	100	100	100
20	87,5	75	99	88
12,5	71,5	55	85	66
8	58	40	67	53
4	42,5	25	41	37
2	31	19	29	26
0,5	16	10	15	14
0,25	11	7	10	9
0,125	7,5	6	7,4	7
0,063	5	5	4,8	4,5

Todas las mezclas señaladas en la Tabla 1 se evaluaron por ambos procedimientos. En relación con las temperaturas de ensayo, las cuatro mezclas convencionales se evaluaron a las temperaturas de 5 °C y 20 °C, mientras que las mezclas recicladas se evaluaron solamente a 20 °C.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Comportamiento a fatiga

El comportamiento a fatiga de las mezclas evaluadas se puede observar en las leyes de fatiga obtenidas que se muestran en las Figuras 3 a 5. Estas fueron determinadas relacionando la deformación máxima inicial producida en el centro de la probeta con el número de ciclos necesario para reducir la rigidez o módulo a la mitad de su valor inicial. Con esto se obtuvieron pares de valores correspondientes a diferentes amplitudes de desplazamiento aplicados a cada una de las probetas, permitiendo así, una vez trazada la línea de tendencia para los diferentes pares de valores, obtener la ley de fatiga con control de desplazamiento en cada mezcla.

La influencia de la temperatura de ensayo, evaluada en las mezclas G-20 y S-20, muestra una respuesta muy similar en ambos tipos de mezcla, Figuras 3 y 4. Cuando estas fueron fabricadas con el ligante de mayor penetración, B60/70, se observa una clara pérdida de capacidad de deformación, entre las temperaturas de 20 °C y 5 °C, puesto que para igual número de ciclos es la mezcla ensayada a 20 °C la que admite una mayor deformación. Sin embargo, las mezclas fabricadas con el ligante de menor penetración, B13/22, debido a su alta rigidez, presentan una menor diferencia entre los valores de deformación a igual número de ciclos, para las dos temperaturas evaluadas.

Adicionalmente, se observa que aquellas mezclas que obtuvieron un mayor módulo dinámico, S-20 B13/22 y G-20 B13/22 a 5 °C, fueron las que obtuvieron una menor pendiente de la ley de fatiga, parámetro "b" de la ley de fatiga. De manera opuesta, las mezclas que obtuvieron los menores valores de módulo dinámico, S-20 B60/70 y G-20 B60/70, fueron las que obtuvieron una mayor pendiente en la ley de fatiga. Por otra parte, las mezclas fabricadas con el ligante de mayor penetración B60/70 y ensayadas a 20 °C obtuvieron un mayor valor en el parámetro "a" de la ley de fatiga o deformación en el ciclo 1, respecto de las mezclas fabricadas con el ligante más duro, B13/22, ensayadas a la misma temperatura, y también mayor que aquellas ensayadas a 5 °C, que presentaron un comportamiento más frágil, con un bajo valor del parámetro "a" de la ley de fatiga.

En la Figura 5 se observa que las mezclas fabricadas con un alto contenido de RAP, S-20 R60 y S-12 R40, ensayadas a 20 °C, presentaron un comportamiento rígido, bastante similar a las mezclas fabricadas con el ligante de menor penetración B13/22 ensayadas a la misma temperatura, obteniendo módulos dinámicos muy similares.

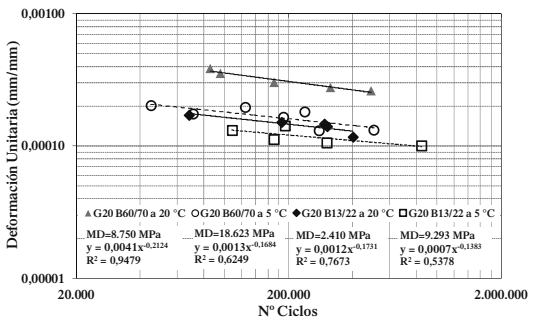

Figura 3. Leyes de fatiga de mezcla G-20, ligantes B13/22 y B60/70, a 5 y 20 °C.

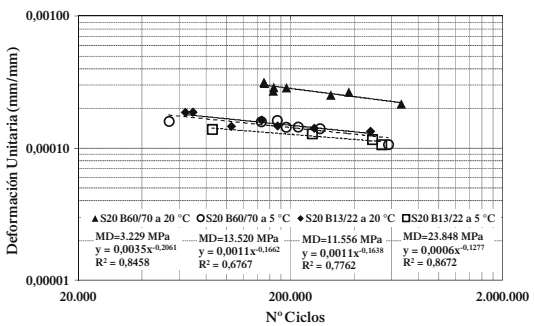

Figura 4. Leyes de fatiga de mezcla S-20, ligantes B13/22 y B60/70, a 5 y 20 °C.

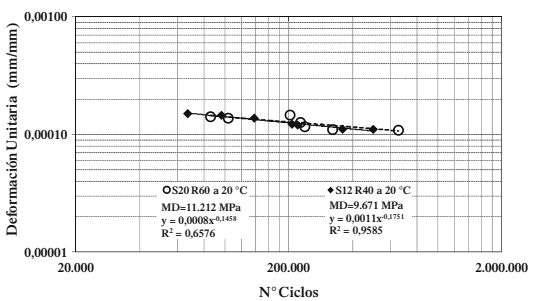

Figura 5. Leyes de fatiga de mezclas con altas tasas de RAP, S-20 R60 y S-12 R40, a 20 °C.

Igual que en los ensayos de fatiga, la respuesta de las mezclas G-20 y S-20, frente a la variación de la temperatura, fue muy similar, Figuras 6 y 7.

Ambos tipos de mezclas, cuando se fabricaron con el ligante de mayor penetración, B60/70, mostraron una pérdida de capacidad de deformación representada por el parámetro de desplazamiento al 50% de la carga máxima pospico, Δmdp, entre las dos temperaturas evaluadas. Lo mismo se observó en las mezclas confeccionadas con el ligante de menor penetración, B13/22, pero con una menor diferencia entre los desplazamientos a las temperaturas evaluadas.

Por otra parte, aquellas mezclas que obtuvieron un módulo dinámico elevado en los ensayos de fatiga presentaron altos valores de rigidez representados por el IRT calculado mediante el ensayo Fénix. Esto se puede observar en las mezclas ensayadas a la temperatura de 5 °C y en aquellas ensayadas a 20 °C fabricadas con el ligante de menor penetración o con altas tasas de RAP, Figuras 6 a 8.

Correlación de parámetros entre ensayo Fénix y ensayo de fatiga a flexotracción en tres puntos

Los resultados obtenidos de los ensayos Fénix y de fatiga a flexión en tres puntos, realizados en

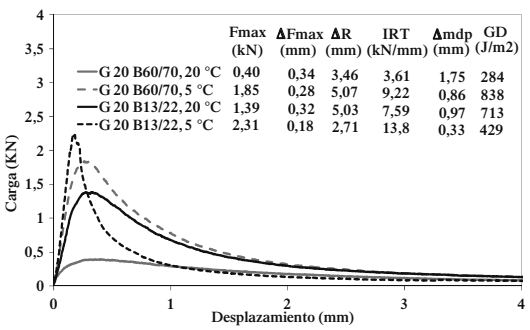

Figura 6. Curvas carga-desplazamiento Mezcla G-20.

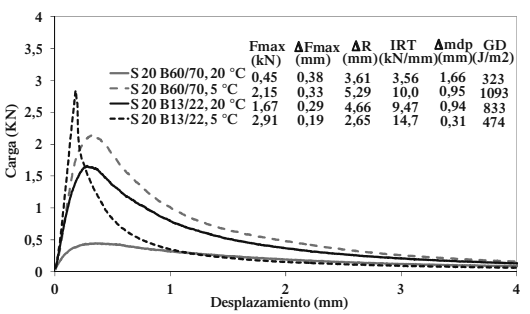

Figura 7. Curvas carga-desplazamiento, Mezcla S-20.

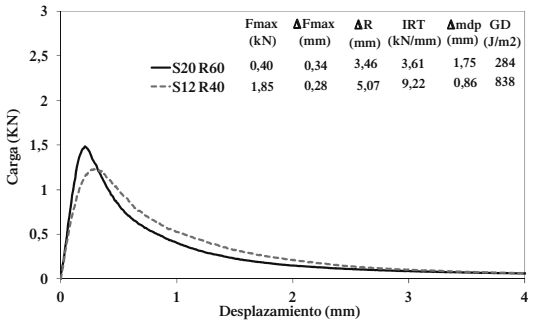

Figura 8. Curvas carga-desplazamiento, Mezclas con alto contenido de RAP.

la etapa experimental de este estudio, han puesto en evidencia que existen correlaciones entre los parámetros de deformación y rigidez obtenidos mediante ambos ensayos. Las correlaciones obtenidas entre los parámetros de ambos ensayos se ajustan a tendencias lineales en dos casos y exponencial en otro, Figuras 9 a 11.

Las relaciones obtenidas entre ambos procedimientos permiten obtener una idea o predicción de la respuesta a fatiga de las mezclas. Así, se podría tener en cuenta esta propiedad en el momento de diseñar las mezclas, pero por medio de un procedimiento más sencillo y de menor tiempo de ejecución.

Los valores de los parámetros obtenidos por ambos procedimientos, que se van a relacionar, se observan en la Tabla 2.

El grado de correlación entre los parámetros Fénix y los parámetros de las leyes de fatiga obtenidos para cada una de las mezclas ensayadas ha sido bastante satisfactorio, obteniendo valores del coeficiente de correlación R^2 superiores al 94% en las tendencias lineales obtenidas y de 96% en la tendencia exponencial determinada, así como se presentan en las Figuras 9 y 10.

Las correlaciones entre los parámetros de ambos ensayos se efectuaron para determinar el grado de relación entre parámetros que midieran propiedades similares en estos procedimientos. En ensayo Fénix el parámetro de rigidez está representado por el IRT, mientras que en la ley de fatiga, el MD y su pendiente. A su vez, el parámetro de deformación del ensayo Fénix está representado por Δmdp, mientras que en la ley de fatiga es la deformación en el ciclo 1.

La primera relación obtenida, que se presenta en la Figura 9, se establece entre los valores del índice de rigidez, IRT, obtenidos del ensayo Fénix y los valores de módulo dinámico, MD, obtenidos del ensayo de fatiga. En este caso, las mezclas con menores rigideces (IRT) o módulos dinámicos (MD), se sitúan en la parte inferior de la recta de tendencia. A su vez, las mezclas con mayores rigideces o módulos, como el caso de las confeccionadas con el ligante de menor penetración, B13/22, ensayadas a una temperatura de 5 °C, se sitúan en la parte superior de la tendencia.

Tabla 2. Parámetros correlacionados entre el ensayo Fénix y el ensayo de fatiga a flexotracción.

Mezclas	Temperatura	Ensayo Fénix		Ensayo de fatiga a flexotracción en tres puntos			
		Índice de rigidez a tracción	Desplazamiento al 50% Fmax dp	Módulo dinámico	Ley de fatiga $\varepsilon = a \cdot N^{-b}$	a	b
	(°C)	I_{RT}	Δ_{mdp}	MD			
		(KN/mm)	(mm)	(MPa)			
G-20 B-60/70	20	3,61	1,75	2.410	$\varepsilon=0{,}0041 \cdot N^{-0{,}2124}$	0,0041	0,2124
	5	9,22	0,86	9.293	$\varepsilon=0{,}0013 \cdot N^{-0{,}1684}$	0,0013	0,1694
S-20 B-60/70	20	3,56	1,66	3.229	$\varepsilon=0{,}0035 \cdot N^{-0{,}2061}$	0,0035	0,2061
	5	10,09	0,95	13.520	$\varepsilon=0{,}0011 \cdot N^{-0{,}1662}$	0,0011	0,1662
G-20 B-13/22	20	7,59	0,97	8.750	$\varepsilon=0{,}0012 \cdot N^{-0{,}1731}$	0,0012	0,1731
	5	13,85	0,33	18.623	$\varepsilon=0{,}0007 \cdot N^{-0{,}1383}$	0,0007	0,1383
S-20 B-13/22	20	9,47	0,94	11.556	$\varepsilon=0{,}0011 \cdot N^{-0{,}1638}$	0,0011	0,1638
	5	14,72	0,31	23.848	$\varepsilon=0{,}0006 \cdot N^{-0{,}1277}$	0,0006	0,1277
S-20 R60	20	9,74	0,56	11.212	$\varepsilon=0{,}0008 \cdot N^{-0{,}1458}$	0,0008	0,1458
S-12 R40	20	8,05	0,84	9.671	$\varepsilon=0{,}0011 \cdot N^{-0{,}1751}$	0,0011	0,1751

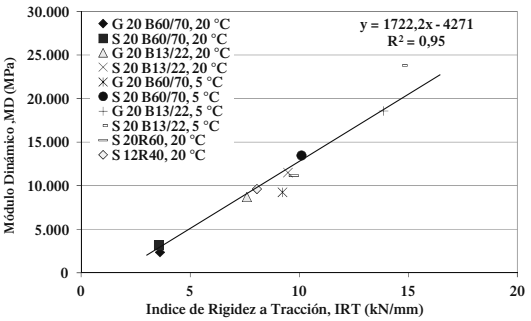

Figura 9. Correlación entre Módulo Dinámico del ensayo de fatiga a flexotracción y el índice de rigidez a tracción del ensayo Fénix.

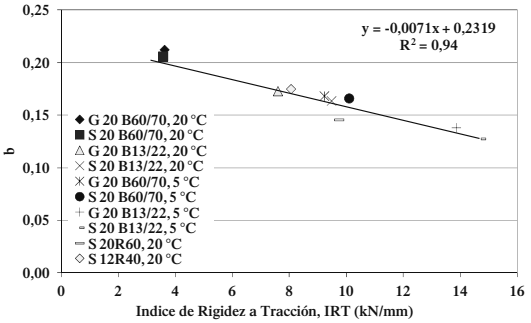

Figura 10. Correlación entre parámetro "b" de la ley de fatiga a flexotracción y el índice de rigidez a tracción del ensayo Fénix

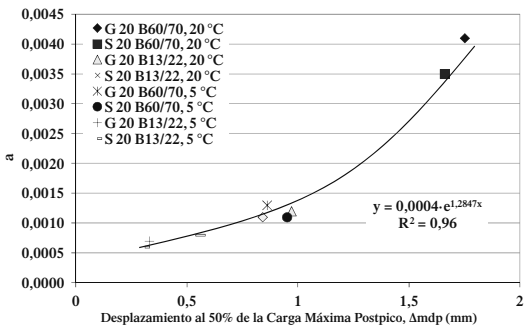

Figura 11. Correlación entre parámetro "a" de la ley de fatiga a flexotracción y el desplazamiento al 50% de la carga máxima pospico del ensayo Fénix.

A continuación se estableció una correlación entre los parámetros de rigidez, IRT, y desplazamiento al 50% de la carga máxima pospico, Δmdp, obtenidos del ensayo Fénix, y los parámetros de la ley de fatiga, pendiente y deformación en el ciclo 1 de la ley de fatiga, parámetros "b" y "a", respectivamente. En la Figura 10 se observa que las mezclas con una mayor rigidez, IRT, obtienen en el ensayo a fatiga una menor pendiente en la ley de fatiga y se sitúan en la parte inferior de la recta de tendencia. Por otra parte, las mezclas con rigideces bajas obtienen una mayor pendiente de la ley de fatiga situándose en la parte alta de la recta de tendencia, como es el caso de las mezclas fabricadas con el ligante de mayor penetración, B60/70, y ensayadas a la temperatura de 20 °C.

En la Figura 11 se observa cómo las mezclas que obtienen un mayor desplazamiento al 50% de la carga máxima pospico, Δmdp, en el ensayo Fénix, presentan una mayor deformación en el ciclo 1 en el ensayo a fatiga "a", como es el caso de las mezclas confeccionadas con los ligantes de mayor penetración ensayadas a la temperatura de 20 °C. A su vez, las mezclas fabricadas con ligantes de menor penetración y ensayadas a bajas temperaturas se sitúan en la parte inferior de la línea de tendencia.

Las correlaciones determinadas en este estudio, entre los parámetros de deformación y rigidez obtenidos en ambos procedimientos evaluados, muestran que es posible estimar o predecir la respuesta a fatiga de las mezclas por medio de un procedimiento más sencillo. Una nueva ley de fatiga se podría estimar mediante los parámetros de entrada: índice de rigidez a tracción, IRT, y desplazamiento al 50% de la carga máxima pospico, Δmdp, entregados por el ensayo Fénix.

A su vez, la buena correlación entre el módulo dinámico obtenido del ensayo de fatiga, MD, y el índice de rigidez a tracción del ensayo Fénix, IRT, permite dar a conocer el valor del módulo de una mezcla que, junto a la ley de fatiga, permite determinar el comportamiento de la mezcla frente a la acción del tráfico en los actuales métodos analíticos de diseño de pavimentos.

De acuerdo con los resultados experimentales obtenidos y basándose en las correlaciones obtenidas, se indican en la Tabla 3 los módulos y leyes de fatiga estimadas para cada una de las mezclas evaluadas.

Tabla 3. Módulos y leyes de fatiga determinadas por el ensayo Fénix para las mezclas evaluadas

Mezclas	Tem.	Ensayo Fénix	
		Módulo estimado $MD = 1722{,}2 \cdot I_{RT} - 4271$	Ley de fatiga estimada $\varepsilon = a \cdot N^{-b}$ $b = -0{,}0071 \cdot I_{RT} + 0{,}2319$ $a = 0{,}0004 \cdot e^{1{,}2847 \cdot \Delta mdp}$
	(°C)	MD (MPa)	
G-20 B-60/70	20	1.946	$\varepsilon = 0{,}0038 \cdot N^{-0{,}2063}$
	5	11.608	$\varepsilon = 0{,}0012 \cdot N^{-0{,}1664}$
S-20 B-60/70	20	1.860	$\varepsilon = 0{,}0034 \cdot N^{-0{,}2066}$
	5	13.106	$\varepsilon = 0{,}0014 \cdot N^{-0{,}1603}$
G-20 B-13/22	20	8.800	$\varepsilon = 0{,}0014 \cdot N^{-0{,}1780}$
	5	19.581	$\varepsilon = 0{,}0006 \cdot N^{-0{,}1336}$
S-20 B-13/22	20	12.038	$\varepsilon = 0{,}0013 \cdot N^{-0{,}1647}$
	5	21.080	$\varepsilon = 0{,}0006 \cdot N^{-0{,}1274}$
S-20 R60	20	12.503	$\varepsilon = 0{,}0008 \cdot N^{-0{,}1627}$
S-12 R40	20	9.592	$\varepsilon = 0{,}0012 \cdot N^{-0{,}1747}$

EVALUACIÓN DE LA VIDA A FATIGA DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO

Cálculo analítico de la vida a fatiga de diferentes secciones estructurales

Para evaluar el comportamiento a fatiga estimado de las mezclas evaluadas en la fase experimental, se ha realizado un análisis de sensibilidad para una estructura de pavimento de control. La estructura de pavimento analizada corresponde a una sección tipo, ubicada en un clima mediterráneo, y diseñada para resistir un tránsito T3 (50 y 200 vehículos pesados/día) de acuerdo con el actual catálogo de secciones estructurales de la normativa española [10]. En esta estructura se ha realizado un análisis comparativo de su durabilidad a fatiga utilizando leyes de fatiga obtenidas por ambos métodos descritos en este estudio. Por una parte, las leyes de fatiga y módulos dinámicos obtenidos experimentalmente mediante el ensayo de flexotracción en tres puntos y, por otra, utilizando las leyes de fatiga y módulos dinámicos estimados por medio de las correlaciones obtenidas con el ensayo Fénix.

El código que ha sido utilizado para el análisis multicapa en ente estudio es el BISAR 3.0. Los parámetros de diseño utilizados fueron los correspondientes al eje equivalente en el dimensionamiento de pavimentos por métodos mecanicistas:

- Eje simple de 80 kN
- Carga vertical de una rueda gemela 20 kN
- Área circular equivalente de radio 10,5 cm

La estructura considerada para el análisis está compuesta por una capa base de mezcla asfáltica de 15 cm, 25 cm de una base granular chancada estabilizada y una explanada o subrasante con un CBR≥10%. Además, con la finalidad de disminuir posibles efectos de tensiones térmicas se consideró en este análisis una capa de rodadura de 4 cm compuesta por una mezcla tipo SMA (*Stone Mastic Asphalt*). Los módulos de esta última mezcla fueron medidos experimentalmente a las temperaturas de 5 °C y 20 °C, obteniéndose valores de 4534 MPa y 9822 MPa, respectivamente [11].

En esta estructura se varió las condiciones de la mezcla asfáltica de capa de base, puesto que es la solicitada a fatiga, evaluando un total de 10 secciones dependiendo del tipo de mezcla utilizada en la capa base y temperatura de evaluación. Estas variaciones se realizaron según los resultados obtenidos en la fase experimental en las diferentes mezclas, de acuerdo con su granulometría (gruesa o semidensa), temperatura (20 y 5 °C), ligante utilizado (B60/70 y B13/22) y mezcla con incorporación de RAP. Como resultado se pudo comparar la durabilidad de estas estructuras utilizando los módulos dinámicos y leyes de fatiga estimados mediante el ensayo Fénix con aquellas estructuras en que se utilizaron los módulos dinámicos y leyes de fatiga obtenidas experimentalmente.

Los parámetros críticos considerados en el análisis a fatiga de las secciones de la estructura evaluada fueron el colapso por compresión de la explanada o subrasante y el fallo por tracción en la capa asfáltica de base. El fallo de la explanada o subrasante está relacionado con la deformación vertical que llega a la coronación de la estructura. El segundo fallo a evaluar es el que se produce por efectos de fatiga en la capa asfáltica de base, y está relacionado con las tensiones y deformaciones tangenciales desarrolladas producto de las repetidas cargas del tráfico en la fibra inferior de esta capa.

Para el análisis de las capas asfálticas de base se utilizaron los módulos dinámicos y las leyes de fatiga obtenidas experimentalmente mediante el ensayo de fatiga a flexotracción en tres puntos, Tabla 2, y aquellas obtenidas por medio de las correlaciones con el ensayo Fénix, Tabla 3. Mientras que para el análisis de la explanada o subrasante se utilizó la ley de fatiga propuesta por Edwards y Valkering [12] señalada en la ecuación (5).

$$N = 6{,}146 \cdot 10^{-7} \cdot \varepsilon_z^{-4} \qquad (5)$$

Donde, N: Número de ciclos de carga admisibles, ε_z: Deformación vertical por compresión de la subrasante.

Análisis de resultados del cálculo analítico de la vida a fatiga

Los resultados obtenidos del análisis de vida a fatiga mediante la modelación multicapa de la estructura de pavimento evaluada se puede observar en las Figuras 12 y 13, para las mezclas evaluadas a 20 °C y 5 °C, respectivamente.

En estas figuras se ilustra que la estimación del número de ciclos de carga proporcionada por el procedimiento del ensayo Fénix a través de los módulos dinámicos y leyes de fatiga estimados se aproxima a los ciclos de carga calculados con los parámetros obtenidos de los ensayos a fatiga en la fase experimental de este estudio, mostrando las mismas tendencias de aumento de la vida a fatiga en las mezclas con mayor módulo dinámico fabricadas con los ligantes de mayor penetración (B13/22) para las mismas granulometrías (S20, G20), evidenciando una mayor durabilidad por concepto del aumento del módulo por sobre la menor en la capacidad de deformación que tienen las mezclas fabricadas con ligantes más duros, así como se observa en las leyes de fatiga obtenidas de la fase experimental.

De acuerdo con lo anterior, tanto para temperaturas bajas (5 °C) como temperaturas intermedias (20 °C) se observa que el procedimiento Fénix entrega una estimación bastante cercana en el número de ciclos que puede resistir un pavimento flexible frente al fallo por fatiga.

Además, se observa que en los análisis realizados de todas las secciones evaluadas se produjo siempre

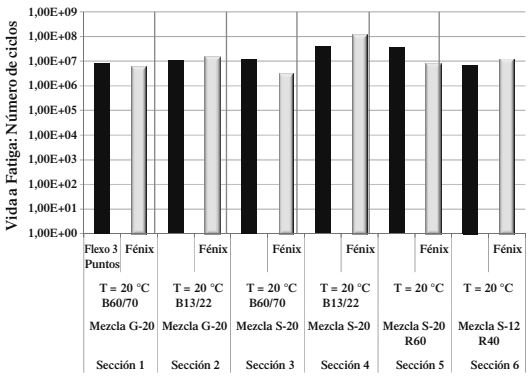

Figura 12. Vida a fatiga de las mezclas evaluadas a una Tº de 20 °C.

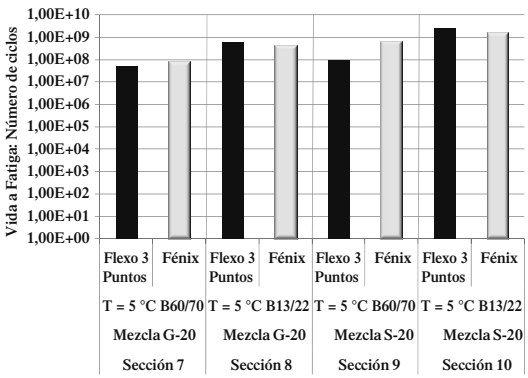

Figura 13. Vida a fatiga de las mezclas evaluadas a una Tº de 5 °C.

el fallo por fatiga en la estructura debido a las deformaciones por tracción de la capa asfáltica de base antes que por deformaciones por compresión en la capa de subrasante.

CONCLUSIONES

En este estudio se presenta un procedimiento, basado en un ensayo simple a tracción directa, para estimar el comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas por medio de las correlaciones obtenidas con el ensayo de fatiga a flexotracción en tres puntos.

- Existe una buena correlación lineal entre la rigidez obtenida del ensayo Fénix, IRT, y el módulo dinámico obtenido de la ley de fatiga, MD.
- Existe una buena correlación lineal entre la rigidez obtenida del ensayo Fénix, IRT, y la pendiente de la ley de fatiga, parámetro “b”.

- Existe una buena correlación exponencial entre la deformación en el ciclo 1 de la ley de fatiga, parámetro "a", y la capacidad de deformación, Δmdp, obtenida del ensayo Fénix.
- Las correlaciones anteriores permiten determinar una ley de fatiga a partir de los resultados obtenidos del ensayo Fénix, y evaluar por una metodología simple la vida a fatiga de la capa de mezcla asfáltica de un pavimento mediante los métodos de dimensionamiento analíticos existentes.

El procedimiento propuesto no busca reemplazar los ensayos cíclicos para obtener las leyes de fatiga utilizadas en el diseño de pavimentos. Más bien propone una nueva herramienta para estimar de una forma rápida el comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo recibido del Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI) de España en el desarrollo del proyecto FÉNIX y al proyecto DIUFRO DI 12-0035, financiado por la Universidad de La Frontera.

REFERENCIAS

[1] S. Carpenter. "Fatigue performance of IDOT mixtures". Research Report FHWAICT-07-007. Illinois Center for Transportation, pp. 1-47. 2006.

[2] R. Brown, P. Kandhal and J. Zhang. "Performance testing for hot mix asphalt". NCAT report 01-05. National Center for Asphalt Technology, pp. 1-79. 2001.

[3] R. Roque, B. Birgisson, Z. Zhang, B. Sangpetngam and T. Grant. "Implementation of SHRP indirect tension tester to mitigate cracking in asphalt pavement and overlays". Final Report, Florida Department of Transportation, pp. 1-240. 2002.

[4] H. Baaj and H. Di Benedetto. "Effect of binder characteristics on fatigue of asphalt pavement using an intrinsic damage approach". Road Materials and Pavement Design. Vol. 6, Issue 2, pp. 147-174. 2005.

[5] I. Artamendi and H. Khalid. "Characterization of fatigue damage for paving asphaltic materials". Fatigue Fract Eng Mater Struct. Vol. 28, pp. 1113-1118. 2005.

[6] K. Kanitpong and H. Bahia. "Relating adhesion and cohesion of asphalts to the effect of moisture on laboratory performance of asphalt mixtures". Transportation Research Record. Vol. 1901, pp. 33-43. 2005.

[7] A. Tayebali, J. Deacon and C. Monismith. "Development and evaluation of dynamic flexural beam fatigue test system". Transportation Research Record. Vol. 1545, pp. 89-97. 1996.

[8] F. Pérez, R. Miró and A. Martínez. "Analysis of the Fatigue Process in Bituminous Mixes. Fatigue Critical Strain". Transportation Research Board. TRB 86th Annual Meeting Compendium of Papers CD-ROM. 2007.

[9] F. Pérez, G. Valdés, R. Miró, A. Martínez and R. Botella. "Fénix Test: Development of a new test procedure for evaluating cracking resistance in bituminous mixtures". Transportation Research Record. Vol. 2181, pp. 36-43. 2010.

[10] Ministerio de Fomento de España. Secciones de Firme y Capas Estructurales de Firme: Orden Circular 10/2002. Editorial Ministerio de Fomento, pp. 1-88. 2002.

[11] F. Pérez y G. Valdés. "Evaluación de velocidades de aplicación de carga, temperatura y contenido de ligante en el módulo de rigidez de mezclas bituminosas convencionales y de alto módulo en pavimentos aeroportuarios". Informe INECO-TIFSA. Barcelona, España. 2009.

[12] J. Edward and C. Valkering. "Structural design of asphalt pavement for road vehicles-the influence of high temperatures". Highways and Road Construction. Vol. 42, Part 1770. 1974.