

VALDÉS, G.; PÉREZ-JIMÉNEZ, F.; BOTELLA, R.

Ensayo Fénix, una Nueva Metodología para Medir la Resistencia a la Fisuración en
Mezclas Asfálticas

Revista de la Construcción, vol. 8, núm. 1, 2009, pp. 114-125

Pontificia Universidad Católica de Chile

Chile

Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=127612575011>



Revista de la Construcción

ISSN (Versión impresa): 0717-7925

mandradg@uc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile

Chile

¿Cómo citar?

Número completo

Más información del artículo

Página de la revista

*Fénix Test, a New
Methodology
to Measure Cracking
Resistance on Asphalt
Mixtures*

**Ensayo Fénix, una
Nueva Metodología para
Medir la Resistencia a
la Fisuración en Mezclas
Asfálticas**



Autores

VALDÉS, G. Académico Departamento de Ingeniería de Obras Civiles
Universidad de La Frontera, Temuco, Chile
email: gvaldes@ufro.cl

PÉREZ-JIMÉNEZ, F. Catedrático de Caminos, Departamento de Infraestructura del
Transporte y del Territorio
Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España
email: edmundoperez@upc.edu

BOTELLA, R. Investigador, Departamento de Infraestructura del Transporte y del
Territorio
Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España
email: ramon.botella@upc.edu

Fecha de recepción 02/03/2009

Fecha de aceptación 19/05/2009

Resumen

El presente trabajo de investigación tiene por objetivo principal presentar un nuevo ensayo a tracción desarrollado por el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña para evaluar los mecanismos de fisuración en las mezclas asfálticas, representando este fenómeno de deterioro mediante un ensayo sencillo, económico y fácil de ejecutar. Se presenta el ensayo Fénix como un procedimiento que permite determinar la resistencia a fisuración de las mezclas asfálticas mediante el cálculo de la energía disipada en el proceso de fisuración. Para ello, se muestra en este artículo la metodología del ensayo y un análisis de los resultados

experimentales obtenidos de su aplicación a distintos tipos de mezclas. Las variables estudiadas fueron: velocidad de aplicación de carga, envejecimiento, tipo de ligante, contenido de ligante, temperatura de ensayo y temperatura de compactación de la mezcla. A su vez, se presenta un análisis estadístico de los resultados con la finalidad de establecer la repetibilidad y sensibilidad del ensayo frente a variables de estudio. Como resultado de esta investigación, los autores señalan que el ensayo Fénix es un procedimiento práctico y efectivo para determinar las propiedades mecánicas vinculadas con el deterioro de fisuración en las mezclas asfálticas.

Palabras clave: mezclas asfálticas, ensayos, fisuración.

Abstract

The aim of this paper is to present a new tensile test developed by The Road Research Laboratory of the Technical University of Catalonia, called Fénix test. The test is presented as a procedure to evaluate asphalt mixture crack behaviour. It is a simple procedure and has a low cost set up. Fénix test is a procedure to determine crack resistance through calculation of dissipated energy in cracking process. Test procedure and data analysis are shown for

different types of mixtures. The influence of load application velocity, aging, binder type, binder content, test temperature and compaction temperature was studied. On the other hand, a statistical analysis is presented to prove the repeatability and sensitivity of the test. As a result, authors found out that Fénix test is an effective procedure to determine mechanical properties regarding cracking resistance of asphalts mixtures.

Key words: asphalt mixtures, test, cracking.

1. Introducción

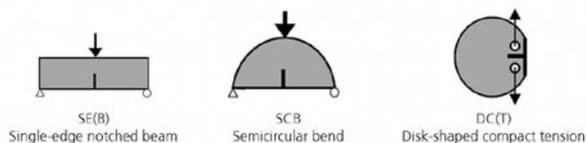
La fisuración de los pavimentos asfálticos es una de las causas más frecuentes de deterioro. Debido a las características reológicas de las mezclas asfálticas hacen que su comportamiento a la fisuración sea complejo de analizar, puesto que este depende de varios factores que hacen que este material se comporte de manera completamente diferente frente a las sollicitaciones producidas por el medio ambiente y el tráfico, que se manifiestan mediante variaciones térmicas y diferentes tipologías y velocidades de aplicación de las cargas.

De acuerdo a lo anterior, en los últimos años, con la aplicación de conceptos desarrollados en el área de mecánica de fracturas aplicados a los materiales cuasi frágiles, la comunidad científica ha enfocado sus investigaciones con la finalidad de comprender el comportamiento de las mezclas asfálticas frente al fenómeno de fisuración por diversas áreas de la ingeniería, algunos mediante modelos analíticos y otros mediante estudios experimentales que simulen mejor el mecanismo de propagación de fisuras en las capas de mezclas asfálticas, y a su vez, que entreguen información que permita evaluar la resistencia de las mezclas ante este modo de deterioro (Li *et al.*, 2008).

En la literatura se han identificado tres ensayos cuya finalidad es medir propiedades de fractura en mezclas asfálticas, los cuales se ilustran en la Figura 1.

El ensayo de viga entallada, SE(B), se ha utilizado en varios estudios para determinar las propiedades de fractura de las mezclas asfálticas. La geometría del ensayo SE(B) proporciona una adecuada propagación de la fisura de acuerdo al modo I de fractura. Sin embargo, su geometría tiene la desventaja de al no ser una probeta estandarizada, se limita su aplicabilidad

Figura 1 Diferentes geometrías de probetas de ensayos para medir energía de fractura



¹ Se ha llamado ensayo Fénix de acuerdo al acrónimo del proyecto de investigación que ha permitido su desarrollo. Proyecto CENIT: Investigación Estratégica de Carreteras más Seguras y Sostenibles (Acrónimo: FÉNIX).

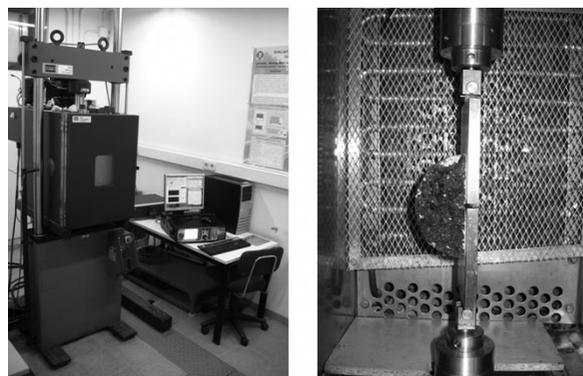
a vigas compactadas en laboratorio, no permitiendo su aplicación a testigos (Wagoner *et al.*, 2005).

El ensayo de viga semicircular a flexión, SCB, ha sido aplicado en varios estudios (Molenaar *et al.*, 2002; Mull *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2008), destacando las ventajas del ensayo SCB de su fácil aplicación a probetas y testigos, y que requiere un menor número de muestras por su geometría; sin embargo, la forma de aplicación de la carga produce un complejo estado tensional que afecta en el proceso de propagación de la fisura, generando un efecto de arco con altos esfuerzos de compresión en la localidad cercana a la fisura (Wagoner *et al.*, 2005).

El ensayo DC(T) tiene las ventajas que presenta un tamaño mayor del área de fractura y su aplicación a testigos. Sin embargo, en el proceso de fabricación de las probetas existe el inconveniente de generar microfisuras en los alrededores de los orificios donde se aplica la carga. Sumado a lo anterior, existe la complejidad de efectuar el ensayo a temperaturas superiores a los 10 °C.

Siguiendo esta línea de investigación, en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña se ha desarrollado y puesto a punto un nuevo ensayo experimental práctico, cuya finalidad es evaluar la resistencia a la fisuración de las mezclas asfálticas a través del cálculo de la energía disipada en el proceso de fisuración de las mezclas. Este ensayo ha sido llamado Fénix¹ y su montaje se observa en la Figura 2.

Figura 2 Montaje ensayo Fénix en prensa 810 MTS (Material Test System)



El ensayo Fénix permite obtener la energía disipada en el proceso de fisuración del material, la cual es una combinación de energías liberadas durante el proceso de deformación y fractura del material (Li *et al.*, 2008). La evaluación de la energía disipada en ensayo se presenta como una forma efectiva de medir la resistencia a la fisuración en las mezclas asfálticas.

Por otra parte, se ha definido el concepto de tenacidad en las mezclas asfálticas como la capacidad que tiene la mezcla de mantener unido sus materiales constituyentes una vez que se ha iniciado el fallo de fisuración, el cual puede ser determinado y evaluado por el índice de tenacidad, I_T , propuesto en este trabajo. El índice de tenacidad se ha definido físicamente como la energía disipada en la fase de *softening* o relajación en la curva carga-desplazamiento del ensayo Fénix (Figura 3), ponderada por un factor de fragilidad de la mezcla dado por la diferencia entre desplazamiento requerido para que el valor de la carga máxima disminuya a la mitad de su valor y el desplazamiento a carga máxima.

2. Procedimiento del ensayo Fénix

El procedimiento del ensayo Fénix consiste en someter media probeta cilíndrica con una fisura inducida de 6 mm de longitud, fabricada mediante el procedimiento Marshall, o bien, mediante el compactador giratorio, a un esfuerzo de tracción con una velocidad de desplazamiento constante a una temperatura

deseada. Una vez preparada la probeta con la fisura inducida, se fijan a las dos secciones de la cara plana, separadas por la entalladura, unas placas de acero. Estas, a su vez, son fijadas a los soportes de la prensa, permitiendo un movimiento de rotación respecto a las fijaciones, tal cual se ilustra en la Figura 3.

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

La energía disipada en todo el proceso de fisuración del material, G_D , se determina con las ecuaciones (1) y (2). El parámetro índice de tenacidad, I_T , puede ser determinado por medio de la ecuación (3). A su vez, se obtiene el índice de rigidez a tracción, I_{RT} , por medio de la ecuación (4). Otros parámetros mecánicos de la mezcla como: carga máxima a tracción, $F_{máx}$, desplazamiento a carga máxima, $\Delta F_{máx}$ y desplazamiento de rotura, Δ_{Rt} pueden ser determinados de la curva resultante carga – desplazamiento.

$$G_D = \frac{W_D}{h \cdot l} \quad (1)$$

Donde, G_D = energía disipada en el proceso de fisuración, J/m^2 ; W_D = trabajo disipado en el proceso de fisuración, KN-mm; h = espesor de la probeta, m; l = longitud inicial de ligamento, m.

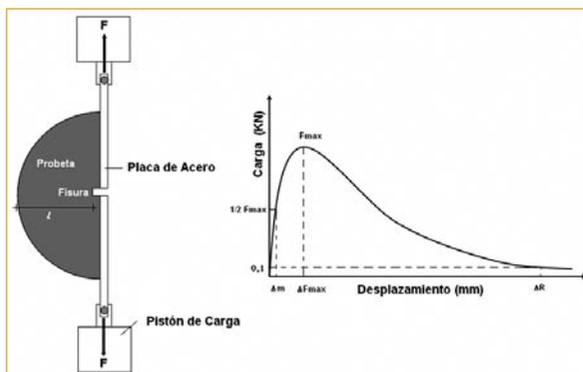
$$W_D = \int_0^{\Delta R} F \cdot du \quad (2)$$

Donde, F = carga, KN; u = desplazamiento, mm; ΔR = desplazamiento a $F = 0,1$ KN postpico, mm.

$$I_T = \frac{W_D - W_{F_{máx}}}{h \cdot l} \cdot (\Delta_{mdp} - \Delta_{F_{máx}}) \quad (3)$$

Donde, I_T = índice de tenacidad, adimensional; W_D = trabajo disipado en el proceso de fisuración, KN-mm; $W_{F_{máx}}$ = trabajo disipado hasta carga máxima, KN-mm; Δ_{mdp} = desplazamiento a $1/2 F_{máx}$ postpico, mm; $\Delta_{F_{máx}}$ = desplazamiento a $F_{máx}$, mm.

Figura 3 Representación esquemática ensayo Fénix y curva carga - desplazamiento resultante



$$I_{RT} = \frac{1/2 \cdot F_{\text{máx}}}{\Delta_m} \quad (4)$$

Donde, I_{RT} = índice de rigidez a tracción, KN/mm; $F_{\text{máx}}$ = carga máxima a tracción, KN; Δ_m = desplazamiento antes de la carga máxima a $1/2 F_{\text{máx}}$, mm.

3. Estudio experimental

La aplicación del ensayo Fénix se ha realizado a series de probetas de distintos tipos de mezclas para evaluar el comportamiento mecánico de estas, junto con la sensibilidad del ensayo frente a diferentes variables, tales como:

- Velocidad de aplicación de carga
- Envejecimiento (protocolo SHRP)
- Tipo de ligante
- Contenido de ligante
- Temperatura de ensayo
- Temperatura de compactación

Para ello, se han ensayado tres probetas Fénix para cada variable estudiada. Las probetas Fénix fueron

fabricadas siguiendo el procedimiento Marshall. Las mezclas analizadas fueron los tipos S-12, S-20 y G-20, de acuerdo a las especificaciones españolas². A la mezcla S-12 se le evaluó la influencia de la velocidad de carga aplicada en el ensayo (0.1, 1 y 10 mm/min.) y el envejecimiento (protocolo SHRP), mientras que a la mezcla S-20 se evaluó la influencia del tipo de ligante utilizado, la temperatura de ensayo (-10°C, 5°C y 20°C) y temperatura de compactación de la mezcla (120°C, 135°C y 155°C). En la mezcla G-20 se evaluó la influencia del contenido de ligante junto a la temperatura de ensayo.

Todas las mezclas evaluadas se fabricaron empleando áridos de origen calizo y diferentes tipos de ligante. Las granulometrías utilizadas y las características de los ligantes empleados se observan en las Tablas 1 y 2, respectivamente.

El ligante empleado en la elaboración de la mezcla S-12 fue un B-60/70 con un contenido de un 5% s/a. En la mezcla S-20 se utilizaron los ligantes de distinta penetración B60/70, B40/50, B13/22 y un ligante modificado con polímetros tipo BM3c, todos ellos con un contenido de un 4,3% s/a. En la mezcla G-20 se utilizaron los ligantes B60/70, B40/50 y B13/22 en porcentajes de 3,5, 4,5, y 5,5% s/a.

Tabla 1 *Granulometrías empleadas en mezclas S-12, S-20 y G-20*

Tamiz (mm)	S-12	S-20	G-20
	Porcentaje que pasa	Porcentaje que pasa	Porcentaje que pasa
25	100	100	100
20	100	87,5	75
12,5	87,5	71,5	55
8	67,5	58	40
4	42,5	42,5	25
2	31	31	19
0,5	16	16	10
0,25	11	11	7
0,125	7,5	7,5	6
0,063	5	5	5

² S-12 y S-20, mezclas tipo semidensas, tamaños máximos 12 y 20 mm, respectivamente.
G-20, mezcla tipo gruesa, tamaño máximo 20 mm.

Tabla 2 Características de los ligantes

Características del ligante	Unidad	Norma española (NLT)	B-13/22	B-40/50	B-60/70	BM-3c
Penetración (25 °C; 100 g; 5s)	0,1 mm	124	17	43	64	58
Índice de penetración		181	0,1	-0,2	-0,2	2,8
Punto de reblandecimiento anillo y bola	°C	125	67,3	55,9	51,7	67,4
Punto de fragilidad Fraass	°C	182	-5	-12	-17	-20
Ductilidad a 25 °C	cm	126	15	>100	>100	-
Viscosidad dinámica 60 °C	(Pa.s)	-	4551	651	367	-
Viscosidad dinámica 135 °C	(Pa.s)	-	1,92	0,72	0,56	2,37
Residuo RTFOT						
Pérdida de masa	%	186	0,35	0,4	0,5	0,6
Penetración (25 °C; 100 g; 5s)	% p.o.	124	10	23	32	40
Incremento en el punto de reblandecimiento	°C	-	7,5	9,5	9,6	3,7
Ductilidad a 25 °C	cm	126	7	18	50	-

4. Resultados y discusión

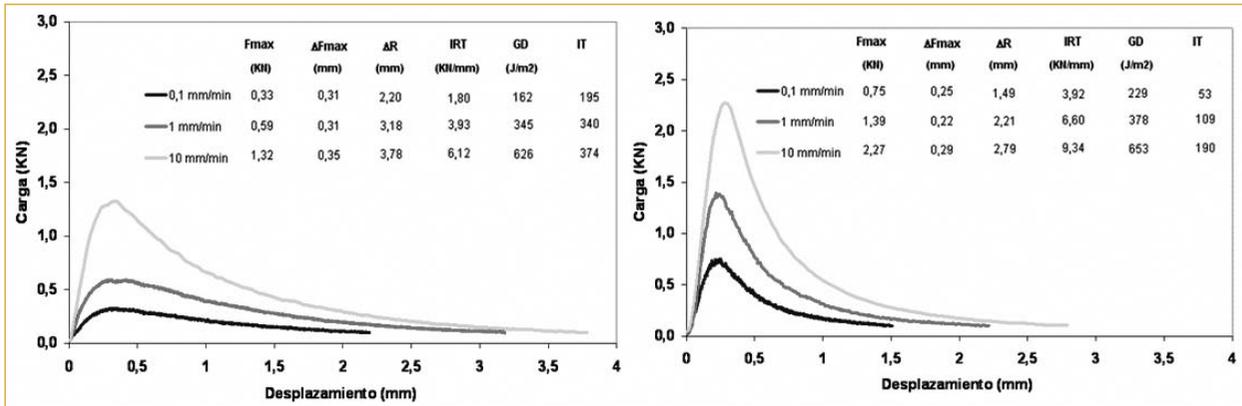
4.1 Análisis del efecto de la velocidad de aplicación de carga y envejecimiento

La Figura 4 muestra el resultado de las curvas carga-desplazamiento, para una mezcla S-12, envejecida y sin envejecer, obtenidas del ensayo Fénix a 20 °C para diferentes velocidades de aplicación de carga. El envejecimiento aplicado a la mezcla asfáltica fue empleado siguiendo un procedimiento SHRP, consistente en colocar las muestras durante un periodo de 4 días en un horno con una temperatura a 80 °C con aplicación de aire forzado (Kandhal y Chakraborty, 1996). En la Figura 4 se observa que en ambos casos la mezcla envejecida y sin envejecer, presenta un comportamiento más rígido (mayor I_{RT}) a medida que aumenta la velocidad de aplicación de carga

para la temperatura de ensayo evaluada, exhibiendo una mayor energía disipada en el proceso de fisuración, G_D . Las probetas envejecidas (Figura 4 izq.) han mostrado un comportamiento más frágil que las no envejecidas (Figura 4 der.), lo cual se observa al disminuir los desplazamientos de rotura, Δ_{Rr} , para iguales velocidades de aplicación de carga. A su vez, se observa en la Figura 4 la pérdida de tenacidad que sufre la mezcla producto del envejecimiento de esta, lo que se aprecia al comparar los índices de tenacidad, I_{Tr} , en todas las velocidades de aplicación de carga evaluadas.

Debido a la amplia gama de tipos mezclas y ligantes evaluados, para un mejor análisis de la zona de *softening* de la curva carga-desplazamiento, como de los parámetros resultantes, se decidió establecer la velocidad de 1 mm/min para realizar los ensayos siguientes.

Figura 4 Influencia de la velocidad de aplicación de carga en mezcla S-12 no envejecida (izq.) y envejecida (der.), ensayo Fénix a 20 °C



4.2 Análisis del efecto del tipo de ligante y temperatura de ensayo

En las Figuras 5 a 7 se observan los resultados de la mezcla S-20, en la cual se evaluó la influencia del tipo de ligante y la temperatura de ensayo. La mayor parte de las mezclas evaluadas frente a las variables analizadas presentaron un comportamiento similar. A bajas temperaturas, -10 °C, las mezclas presentaron un comportamiento frágil con altas cargas máximas y bajos desplazamientos de rotura (Figura 5). A la temperatura de 20 °C se observó un comportamiento más dúctil, con altos valores de desplazamiento de rotura, Δ_{Rt} y bajos valores de carga máxima, F_{max} y rigidez, I_{RT} (Figura 7). A temperaturas medias de ensayo, 5 °C, se observó un comportamiento intermedio (Figura 6).

En relación a la tenacidad (I_t) presentada en las mezclas evaluadas, se observa, en las Figuras 5 a 7, que a bajas temperaturas, -10 °C, las mezclas evaluadas se comportaron de forma similar, mostrando una baja tenacidad producto de la fragilidad presentada. A medida que se incrementa la temperatura, se observa que la mezcla que empleó el ligante BM3c aumenta su tenacidad, respecto las otras mezclas evaluadas. La mezcla que utilizó el ligante con mayor viscosidad, el B13/22, empieza a mostrar una mayor tenacidad a temperaturas mas altas, a su vez, la mezcla que empleó el ligante menos viscoso, el B60/70, muestra su mayor tenacidad a la temperatura de 5 °C, puesto que a temperaturas superiores la mezcla comienza a presentar un comportamiento más dúctil.

Figura 5 Curva carga-desplazamiento ensayo Fénix mezcla S20, temperatura de ensayo -10 °C

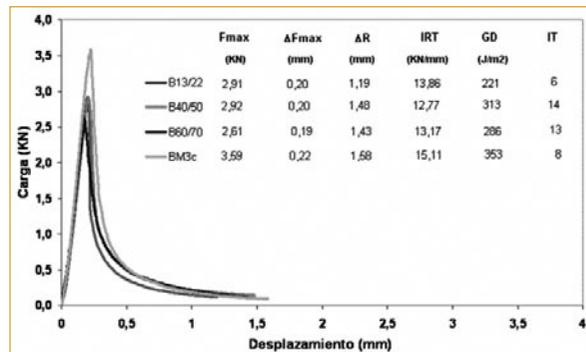


Figura 6 Curva carga-desplazamiento ensayo Fénix mezcla S20, temperatura de ensayo 5 °C

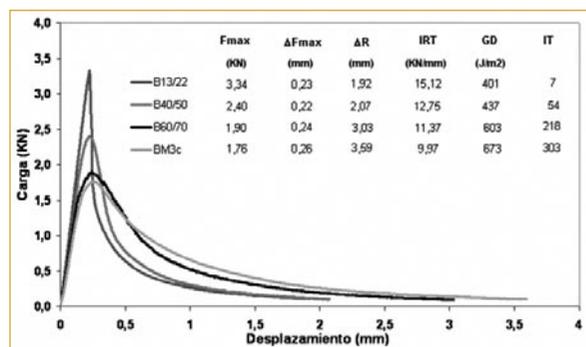
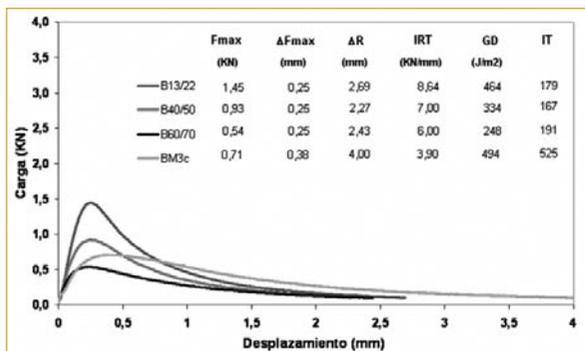


Figura 7 Curva carga-desplazamiento ensayo Fénix mezcla S20, temperatura de ensayo 20 °C



La Figura 8 ilustra la influencia de la temperatura de ensayo en las superficies de fractura de las probetas luego de realizado el ensayo Fénix. En esta imagen se observa que a bajas temperaturas, -10 °C, la superficie fracturada muestra que la fisura se produce en toda la matriz árido-ligante, dejando áridos fracturados a medida que la fisura progresa. A temperaturas intermedias, 5 °C, se observa una mayor predominancia de que la fractura del material se produce en la interfase árido-ligante, fracturando solo algunos de los áridos a medida que se propaga la fisura. Finalmente, a 20 °C, la fractura se produce prácticamente solo en la interfase árido-ligante.

Los resultados obtenidos para la energía disipada en el proceso de fisuración, G_D , relacionada con el tipo de ligante y la temperatura de ensayo, han sido representados en la Figura 9. En esta figura se observa que la mezcla que utiliza el ligante modificado BM3c ha obtenido el valor más alto de energía disipada en todas las temperaturas evaluadas presentando un mejor comportamiento a la fisuración. Las mezclas fabricadas con los ligantes B60/70, B40/50 y BM3c han obtenido su valor máximo de energía disipada a la temperatura de 5 °C. La mezcla que utilizó el ligante B-13/22 registró la mayor energía disipada a la temperatura de ensayo de 20 °C, lo que se explica producto de la dureza del ligante, observándose un comportamiento más frágil a temperaturas inferiores.

4.3 Análisis del efecto del contenido de ligante y temperatura de ensayo

La Figura 10 presenta los resultados de la energía disipada en el proceso de fisuración *versus* temperatura de ensayo, en tres distintos contenidos de ligante, para tres tipos de ligantes evaluados en la mezcla G-20. En esta gráfica se observa que la energía disipada varía con la temperatura de ensayo registrando los mayores valores a la temperatura de ensayo de 5 °C, a excepción de las mezclas fabricadas con el ligante B13/22 que registran su mayor valor a la temperatura de 20 °C, producto de la alta viscosidad del ligante. A su vez se observa que a medida que se aumenta el contenido de ligante se presenta un aumento de la energía disipada durante el proceso de fisuración de la mezcla.

Figura 8 Superficies de fractura para mezcla G-20 a diferentes temperaturas de ensayo

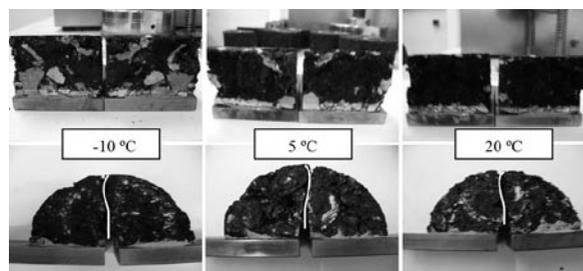


Figura 9 Energía disipada en el proceso de fisuración a diferentes temperaturas de ensayo y diferentes ligantes

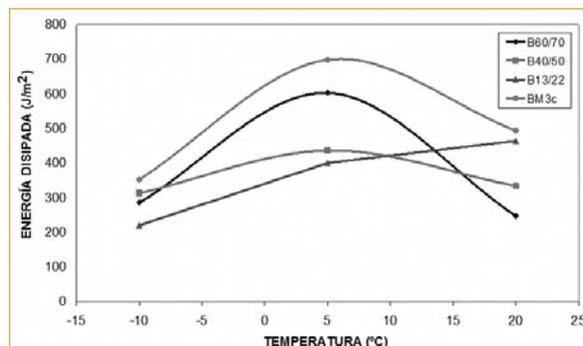
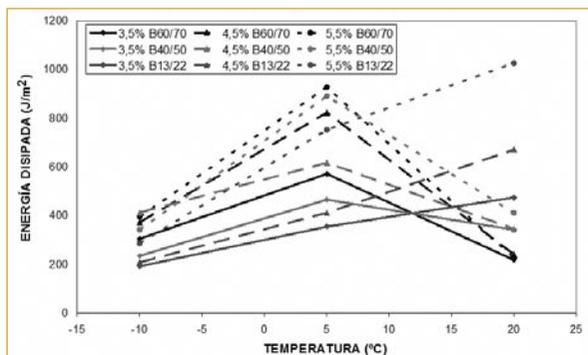


Figura 10 Energía disipada en tres temperaturas de ensayo con diferentes contenidos de ligante en la mezcla



4.4 Análisis del efecto de la temperatura de compactación

El efecto de la temperatura de compactación en la mezcla se observa en el gráfico carga-desplazamiento de la Figura 11. El gráfico ilustra cómo la temperatura de compactación posee un importante rol en la resistencia a la fisuración de la mezcla, puesto que al decrecer la temperatura de compactación de 155 a 120 °C, los valores calculados para la energía disipada en el proceso de fisuración, G_D , el índice de tenacidad, I_T , y la resistencia máxima a tracción, F_{max} disminuyen considerablemente. Lo anterior establece la pérdida de cohesión, tenacidad y resistencia por parte de la mezcla, al decrecer la temperatura de compactación, requiriendo una menor cantidad de energía para iniciar y propagar una fisura.

4.5 Análisis estadístico de los resultados

La repetibilidad del ensayo Fénix ha sido evaluada a través de valores de coeficiente de variación (C_v) calculados para cada serie de probetas ensayadas. Para los parámetros de energía disipada, G_D , y carga máxima a tracción, F_{max} , se obtuvieron valores de C_v promedio de 15% y 8,5%, respectivamente. Basándose en valores de C_v para la energía disipada, el ensayo Fénix presenta una buena repetibilidad, comparado con los ensayos SE(B) (3-18%), DC(T) (4-25%) y SCB(15-34%) (Wagoner *et al.* 2005).

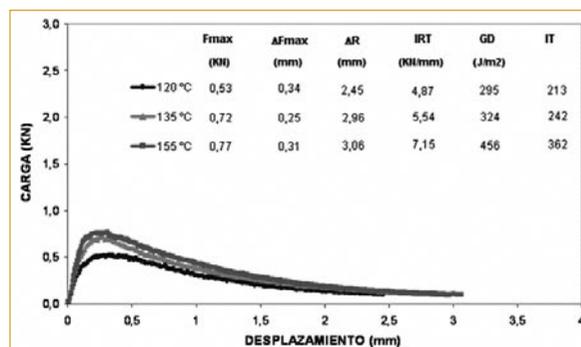
La sensibilidad del ensayo Fénix ha sido evaluada mediante unos análisis de varianza (ANOVA) de los

resultados de energía disipada obtenidos en las pruebas experimentales. Se ha escogido el análisis de varianzas, puesto que este permite comparar si los valores de un conjunto de datos numéricos son significativamente distintos a los valores de otro o más conjuntos de datos, lo que permite establecer así, para un determinado parámetro calculado, la sensibilidad del ensayo. El procedimiento para comparar estos valores está basado en la varianza global observada en los grupos de datos numéricos a comparar.

En una primera fase se analizó para la mezcla S-20 el efecto del tipo de ligante y la temperatura de ensayo sobre los resultados obtenidos en el ensayo Fénix para la energía disipada, G_D . Para ello, se realizó un análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo. En estos análisis los factores fueron: tipo de ligante y temperatura de ensayo. El factor tipo de ligante constó de cuatro niveles (B60/70, B40/50, B13/22 y BM3c) con un total de 9 datos para cada nivel, mientras que el factor temperatura de ensayo constó de tres niveles (-10 °C, 5 °C y 20 °C) con un total de 12 datos para cada nivel.

Al analizar los resultados expuestos en la Tabla 3, se observa que para los cuatro ligantes analizados, la razón F para los factores tipo de ligante y temperatura de ensayo, al igual que para la interacción de ambos factores, es mayor a su valor crítico determinado para un nivel de significancia de $p = 0,05$. Esto indica que para cada factor evaluado como en la interacción entre ambos se obtienen valores para la energía disipada, G_D , significativamente diferentes, estableciendo así la sensibilidad del ensayo para los factores analizados en esta fase.

Figura 11 Ensayo Fénix a 20°C para diferentes temperaturas de compactación, mezcla S-20



Una vez determinada la sensibilidad del ensayo Fénix frente a las variables tipo de ligante y temperatura de ensayo, se llevó a cabo una segunda fase de análisis estadístico consistente en el estudio del efecto del contenido de ligante y la temperatura de ensayo en la energía disipada, G_D . Al igual que en el análisis anterior, se realizó un análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo para cada tipo de ligante evaluado en la mezcla G-20 (B60/70, B40/50 y B13/22). Para estos análisis los factores fueron: contenido de ligante y temperatura de ensayo. El factor contenido de ligante constó de tres niveles (3,5%, 4,5% y 5,5%) con un total de 9 datos para cada nivel, y a su vez, el factor temperatura de

ensayo constó de tres niveles (-10 °C, 5 °C y 20 °C) con un total de 9 datos para cada nivel.

En los resultados expuestos en las Tablas 4, 5 y 6 se observa, en los tres ligantes analizados, que la razón F, tanto para el factor contenido de ligante como para el factor temperatura de ensayo, es mayor al valor crítico para F determinado para un nivel de significancia de $p = 0,05$. Esto indica que en el ensayo Fénix, frente a los factores contenidos de ligante y temperatura de ensayo, se obtienen valores de energía disipada, G_D , significativamente diferentes, estableciendo así la sensibilidad del ensayo frente a los dos factores analizados en esta fase.

Tabla 3 Tabla ANOVA para comparar el efecto del tipo de ligante y temperatura de ensayo en el parámetro energía disipada, G_D

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Tipo de ligante	132.414,178	3	44.138,059	20,42	8,59•10-07	3,009
T° de ensayo	337.020,377	2	168.510,188	77,95	3,18•10-11	3,403
Interacción	167.925,278	6	27.987,546	12,95	1,66•10-06	2,508

Tabla 4 Tabla ANOVA para comparar en el ligante B60/70 el efecto del contenido de ligante y temperatura de ensayo en el parámetro energía disipada, G_D

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Cont. de ligante	112.047,73	2	56.023,865	5,232	0,016	3,555
T° de ensayo	1.465.290,22	2	732.645,111	68,426	3,87 • 10-09	3,555
Interacción	103.244,73	4	25.811,183	2,411	0,087	2,928

Tabla 5 Tabla ANOVA para comparar en el ligante B40/50 efecto del contenido de ligante y temperatura de ensayo en el parámetro energía disipada, G_D

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Cont. de ligante	181.021,948	2	90.510,974	6,903	0,006	3,555
T° de ensayo	581.451,238	2	290.725,619	22,174	1,39 • 10-05	3,555
Interacción	154.442,805	4	38.610,701	2,945	0,049	2,928

Tabla 6 Tabla ANOVA para comparar en el ligante B13/22 efecto del contenido de ligante y temperatura de ensayo en el parámetro energía disipada, G_D

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Cont. de ligante	588.307,522	2	294.153,761	45,069	9,81 • 10-08	3,555
T° de ensayo	1.104.949,060	2	552.474,530	84,648	6,99 • 10-10	3,555
Interacción	173.596,074	4	43.399,018	6,649	0,002	2,928

5. Resumen y conclusiones

En este trabajo se presenta el desarrollo de un ensayo práctico para determinar la resistencia a la fisuración en mezclas asfálticas a través del cálculo de la energía disipada en el proceso de fisuración. El ensayo Fénix posee metodología experimental que permite aplicarlo fácilmente tanto a probetas fabricadas en laboratorio (Marshall o compactador giratorio) como a testigos. Con la finalidad de validar el ensayo y determinar su sensibilidad y repetibilidad, se han evaluado diferentes temperaturas de ensayo y tipos de mezclas asfálticas en el presente estudio experimental.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos, las principales conclusiones de este trabajo son:

El ensayo Fénix ha probado ser un procedimiento efectivo para caracterizar el comportamiento a la fisuración en mezclas asfálticas a variables como:

- Velocidad de aplicación de carga,
- Envejecimiento (protocolo SHRP),
- Tipo de ligante,
- Contenido de ligante,
- Temperatura de ensayo y
- Temperatura de compactación.

En el análisis estadístico, a través de los coeficientes de variación calculados, C_v , y los análisis de varianza (ANOVA) realizados a los resultados de las energías disipadas, G_D , se ha establecido la repetibilidad y sensibilidad del ensayo Fénix frente a las variables evaluadas.

El ensayo Fénix posee la ventaja que puede ser aplicado en un amplio rango de temperaturas.

El índice de tenacidad, I_r , propuesto en este trabajo, se considera como un buen indicador que permite analizar el comportamiento de las mezclas asfálticas una vez que ya se ha iniciado la fisura, después de alcanzada su carga máxima, en el área *softening*.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo recibido del Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI) de España en el desarrollo del proyecto FENIX, dentro del marco del programa Ingenio 2010 y, más concretamente, a través del Programa CENIT.

Referencias

1. Kandhal P. and Chakraborty S. (1996). Effect of Asphalt Film Thickness on Short and Long Term Aging of Asphalt Paving Mixtures. National Center for Paving Technology, TRB, USA.
2. Li X., Braham A., Marasteanu M., Buttlar W. and Williams R. (2008). Effect of Factors Affecting Fracture Energy of Asphalt Concrete at Low Temperature. Third EATA conference 2008, European Asphalt Technology Association, 397-416.
3. Molenaar A., Scarpas A., Liu X. and Erkens S. (2002). Semi-Circular Bending Test; Simple but Useful?, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 71, 795-815.
4. Mull M., Stuart K. and Yehia, A., (2002), Fracture Resistance Characterization of Chemically Modified Crumb Rubber Asphalt Pavement, Journal of Materials Science, 37, 557-566.
5. Wagoner M., Buttlar W. and Paulino G., (2005). Disk-shaped Compact Tension Test for Asphalt Concrete Fracture, Experimental Mechanics, 45(3), 270-277.