

Estado de la resistencia a la fisuración de las mezclas bituminosas. Ensayos Fénix y EBADE

Este artículo propone el empleo de dos ensayos desarrollados por el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, uno estático de tracción (ensayo Fénix) y otro cíclico de tracción-compresión (ensayo EBADE), para evaluar la resistencia a la fisuración de las mezclas bituminosas, su variación con la temperatura y su comportamiento a fatiga. El ensayo Fénix se ha mostrado como un método válido para evaluar la resistencia a la fisuración a diferentes temperaturas. Así mismo, permite estimar el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas.

El procedimiento EBADE de barrido de deformaciones se ha mostrado suficientemente sensible para evaluar el comportamiento a fatiga de mezclas rígidas y mezclas más dúctiles, y ha sido capaz de evaluar la influencia de las tensiones térmicas en la vida a fatiga de la mezcla.

Palabras clave: Energía de fractura, ensayo Fénix, barrido de deformaciones, tensiones térmicas, fatiga.

This article presents a new approach to the evaluation of bituminous mixtures cracking resistance, its sensitivity to the test temperature and fatigue behavior. Two tests procedures developed at the Road Research Laboratory from the Technical University of Catalonia are employed to that end, Fenix test and EBADE test. The first is a traction test and the second a cyclic uniaxial tension-compression test. The Fénix test proved to be a fine procedure to evaluate cracking resistance at different temperatures. At the same time it allows to estimate bituminous mixtures fatigue behavior. The EBADE procedure was sensitive enough to characterize the fatigue behavior of soft and stiff mixtures. In addition it was able to evaluate the influence of thermal stress in mixtures fatigue life.

Key words: Fracture energy, Fenix test, strain sweep, thermal stress, fatigue

Félix E. Pérez Jiménez edmundo.perez@upc.edu
Rodrigo Miró Recasens r.miro@upc.edu
Adriana Martínez adriana.martinez@upc.edu
Ramón Botella Nieto ramon.botella@upc.edu

Universidad Politécnica de Cataluña

Gonzalo A. Valdés Vidal gvaldes@ufro.cl

Universidad de la Frontera, Temuco, Chile

propiedades especiales que el betún le aporta. El betún es un producto aglomerante que une y cohesionan los materiales granulares que, junto con éste, se utilizan en la fabricación de la mezcla bituminosa. Esta cohesión permite a la mezcla bituminosa resistir los esfuerzos abrasivos del tráfico cuando es colocada en la capa de rodadura del firme. Además, esta cohesión proporciona también a la mezcla su rigidez, estabilidad y resistencia a la fisuración. Estas cualidades hacen que la mezcla bituminosa pueda ser empleada en la construcción de firmes, como una capa resistente, que soporta, sin deformarse ni fisurarse, las solicitaciones del tráfico y que colabora, con las otras capas del firme, en amortiguar los esfuerzos que llegan a la explanada para que puedan ser soportados por ésta.

En principio una mezcla bituminosa es un material dúctil y flexible, sobre todo, si lo comparamos con otros materiales

1. Introducción

La mezcla bituminosa es un material cuyo amplio y extenso uso en la construcción de carreteras se debe en gran parte a las

Estado de la resistencia a la fisuración de las mezclas bituminosas

empleados también en la construcción de carreteras, como es el caso de los materiales tratados con cemento. Esta ductilidad y flexibilidad está relacionada con su resistencia a la fisuración, por ello las mezclas bituminosas presentan una mejor respuesta a la fisuración que los materiales tratados con cemento, en particular, a la fisuración térmica. Aunque esta resistencia varía con la temperatura, ya que las mezclas bituminosas pueden convertirse en materiales frágiles a bajas temperaturas, dependiendo del betún empleado.

El problema de fisuraciones térmicas a bajas temperaturas ocurre cuando la mezcla presenta un alto módulo y disminuye su deformación de rotura. Esto puede ocurrir en climas muy fríos o cuando va envejeciendo el betún. Salvo en estas condiciones adversas, las mezclas bituminosas presentan frente a las tensiones térmicas un módulo bajo, lo que hace que la mezcla pueda deformarse sin apenas experimentar tensiones y contrarrestar la retracción térmica. Este bajo módulo está asociado con la respuesta viscoelástica de la mezcla, que hace que se deforme sin apenas presentar resistencia cuando las cargas son aplicadas lentamente, caso de las tensiones térmicas. Además, si la velocidad de aplicación de carga es lenta, también aumenta su ductilidad y deformación de rotura. Todo esto hace que las mezclas bituminosas puedan soportar muy bien las tensiones térmicas. Pero es importante conocer en qué condiciones de temperatura y con que tipo de betunes y formulaciones, las mezclas pierden esta propiedad tan importante.

Los parámetros que gobiernan la resistencia a la fisuración térmica de la mezcla son: su módulo de deformación bajo cargas lentas, que determina su flexibilidad, y la deformación de rotura, también bajo cargas lentas, que caracteriza su ductilidad. Relacionado con estos dos parámetros está la energía de fractura total, que está relacionada con la *J*-integral que determina la velocidad de propagación de fisuras.

El desarrollo de la *J*-integral (Rice 1968, Schapery 1984, Kuai, et al. 2009) supuso un avance muy importante en la aplicación de la teoría de la mecánica de fractura elasto-plástica. Se trata de unas integrales de contorno independientes del camino tomado y coinciden con el ratio de energía liberada en un material elástico no-lineal que contiene una fisura para cada aplicación de carga, ecuación 1. El cálculo de esta energía para un material elástico con una fisura depende del módulo del material y del valor del factor intensidad de tensiones en la punta de la fisura. Este factor relaciona la tensión aplicada al material con la tensión que se concentra en la punta de la fisura.

$$J = G = \frac{K_I^2}{E'} \quad , 1$$

donde:

G = energía liberada en cada aplicación de carga.

$$E' = \text{módulo en tensión plana o} \quad \frac{E}{1-\nu}$$

en deformación plana,

K_I = factor intensidad de tensiones en modo I.

Bajo ciertas condiciones, la velocidad de propagación de una fisura en un material puede ser representada en función del factor intensidad de tensiones K . Si el material es elástico lineal el estado tensional en la punta de la fisura queda completamente definido por este factor en este punto. Esta relación puede ser expresada mediante la ley de Paris (Hertzberg 1996):

$$\frac{d\alpha}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m \quad , 2$$

donde:

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$$

K_{\max} , K_{\min} = valor máximo y mínimo del factor intensidad de tensiones a lo largo de un ciclo,

α = longitud de la fisura,

N = número de ciclos de carga,

C y m = coeficientes de la regresión.

Para materiales viscoelásticos, en lugar de emplear el factor intensidad de tensiones en la ecuación 2, se puede emplear el incremento de la *J*-integral que proporciona un método más adecuado en estos casos:

$$\frac{d\alpha}{dN} = A \cdot (\Delta J)^n \quad , 3$$

donde:

ΔJ = diferencia entre los valores máximo y mínimo de la *J*-integral en cada ciclo,

A y n son los coeficientes de la regresión.

De esta forma, obteniendo las *J-integrales* y registrando la longitud de fisura a diferente número de ciclos se puede obtener la regresión que relaciona el incremento de la *J-integral* con la velocidad de propagación de fisuras en el material.

Respecto a la fisuración por cargas repetidas, los ensayos de fatiga ponen de manifiesto que existe un *endurance limit*, una deformación máxima, por debajo de la cual no se produce fisuración por fatiga. Este *endurance limit* está asociado también con el módulo de rigidez de la mezcla con la que se hace el ensayo. Para ese módulo y condiciones de sollicitación existe también una deformación en que rápidamente se produce la fisuración de las mezclas. Cuanto más alejada se encuentre la mezcla de ese nivel de deformación en el firme, mayor será el número de aplicaciones de carga que podrá resistir la mezcla hasta su fisuración por fatiga. De nuevo resulta interesante conocer los niveles de deformación a que tiene lugar la fisuración de la mezcla, pero en este caso se trata de analizar el comportamiento de la mezcla bajo velocidades de aplicación de carga rápida, como es el caso del tráfico.

Es por este motivo que el Laboratorio de Caminos de la UPC, ha desarrollado dos ensayos: Fénix y Ebade, que permiten valorar todas estas propiedades de la mezcla relacionadas con su fisuración. El primero es un ensayo monotónico de tracción a velocidad de deformación constante y el otro es un ensayo cíclico de barrido de deformaciones. Ambos ensayos

permiten evaluar y caracterizar el comportamiento de las mezclas respecto a su fallo por fatiga o por fisuración térmica.

En este artículo se presenta la aplicación del ensayo Fénix para analizar el efecto de la temperatura y de la penetración del betún en la respuesta dúctil o frágil de las mezclas bituminosas. También se recoge su aplicación para evaluar la resistencia a fisuración por fatiga de las mezclas bituminosas, dada la buena correlación que se ha obtenido entre los parámetros del ensayo Fénix y del ensayo de fatiga (Valdés Vidal, et al. 2010).

El ensayo EBADE ha sido aplicado para analizar también el efecto de la temperatura en la respuesta a la fisuración bajo cargas cíclicas de mezclas fabricadas con betunes de diferente penetración, determinando la variación del módulo y deformación de rotura de estas mezclas, así como la de la energía disipada con la temperatura. También se analiza la superposición de las tensiones térmicas y de las cargas cíclicas en el fallo por fatiga (Pérez Jiménez, et al. 2011).

2. Ensayo Fénix

El ensayo Fénix es un ensayo de fisuración a tensión, en el que los bordes de una ranura rectangular creada en la probeta se ven sometidos a un desplazamiento a velocidad constante, lo que produce la apertura y propagación de una fisura hasta la fractura de la probeta (modo I de fractura) (Anglada, et al. 2002, Pérez, et al. 2010, Pérez-Jiménez, et al. 2009, Valdés, Pérez-Jiménez et al. 2009), Figura 1.

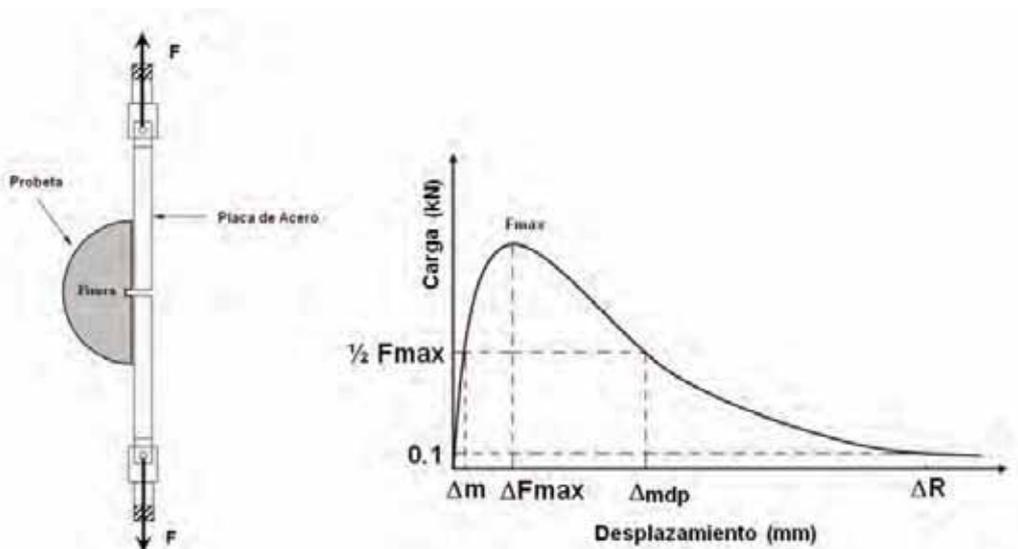


Figura 1. Esquema ensayo Fénix y curva carga desplazamiento resultante.

Estado de la resistencia a la fisuración de las mezclas bituminosas

Para ello, se parte de cada una de las mitades de una probeta o testigo cilíndrico que ha sido serrada por la mitad y se realiza, sobre su superficie plana, en la dirección del eje de la probeta, una ranura de 3 mm de anchura y 5 mm de profundidad. La superficie plana de la probeta de ensayo se pega mediante una resina epoxi a dos placas de acero que se colocan a ambos lados de la ranura. Estas dos placas son fijadas mediante dos pernos a la prensa lo que permite aplicar en los bordes de la ranura unos esfuerzos de tracción, Figura 1, que ocasiona su fractura. Los pernos de sujeción permiten el giro de la placa, por lo que ésta sólo transmite esfuerzos de tensión en los bordes de la ranura. El ensayo se realiza a una velocidad constante de deformación del émbolo de la prensa de 1 mm/min y en él se mide la carga aplicada durante el proceso de rotura en relación con el desplazamiento del émbolo de la prensa.

A partir de la curva carga-desplazamiento se han determinado una serie de parámetros que permiten evaluar la resistencia a la fisuración de las mezclas y analizar el efecto de la temperatura en su comportamiento. Estos parámetros hacen relación a:

Rigidez de la mezcla

Se ha determinado un índice de rigidez a tracción (IRT) que relaciona el incremento de carga con el incremento de deformación en la zona inicial de carga. Se trata de un módulo secante que está relacionado con la rigidez del material ensayado:

$$IRT = \frac{\Delta F}{\Delta d} \left(\frac{KN}{mm} \right), 4$$

donde:

ΔF : incremento de fuerza (diferencia entre el 50% y 15% de la carga máxima, en el ramal de subida) en KN.

Δd : diferencia entre los desplazamientos para estos dos escalones de carga en mm.

Ductilidad de la mezcla

Con objeto de caracterizar la ductilidad de la mezcla, se ha medido su deformación de rotura, habiendo sido considerados dos parámetros:

$\Delta F_{m\acute{a}x}$: el desplazamiento correspondiente a la carga máxima, en mm.

Δm_{dp} : el desplazamiento en la zona de rotura correspondiente al 50% de la carga máxima, en mm.

Cuanto más elevados sean estos parámetros menor será la fragilidad de la mezcla.

Energía de fractura e Índice de tenacidad

En la rotura de la probeta se ha realizado un trabajo, que ha sido denominado energía de fractura y que corresponde con la integral de la curva fuerza-desplazamiento:

$$G_F = \frac{1}{S} \int_0^{\Delta R} F \cdot du, 5$$

donde:

G_F : energía disipada en el proceso de fractura, en J/m².

u : desplazamiento, en mm.

ΔR : desplazamiento al final de la rotura, correspondiente a $F = 0,1$ KN.

F : fuerza correspondiente a cada desplazamiento.

S : Superficie de fractura, en mm²

En el caso de las mezclas bituminosas es importante distinguir entre la energía requerida hasta alcanzar la carga máxima de rotura y la energía disipada en el proceso posterior hasta la total rotura del material. Por tratarse de un material dúctil y tenaz, la carga no cae bruscamente al llegar al máximo, sino que se mantiene o va descendiendo más lentamente durante el proceso de rotura. Este tipo de rotura puede darse con más claridad en mezclas fabricadas con un alto contenido de betún o cuando se usan betunes modificados con elastómeros. Con objetivo de poder valorar este comportamiento de mezcla se ha determinado la energía disipada en la zona post-pico, ponderando esta energía por la deformación (desplazamiento) que experimentaba la mezcla durante su rotura, índice de tenacidad. Se ha ponderado la energía post-pico por la deformación en la rotura para resaltar la diferencia de comportamiento entre las mezclas que han obtenido una elevada energía post-pico pero en las cuales la carga cae bruscamente y presentan una rotura frágil, frente a las que muestran una rotura más dúctil y la carga se mantiene durante el proceso de rotura con una mayor deformación. Para la misma energía de rotura tras pico, tendría una respuesta más dúctil aquella mezcla que hubiese experimentado una mayor deformación.

$$IT = G_D - G_{F_{m\acute{a}x}} \cdot (\Delta m_{dp} - \Delta F_{m\acute{a}x}), 6$$

donde:

I_T : índice de tenacidad, en J/m

$G_{Fmáx}$: energía disipada hasta $\Delta F_{máx}$

2.1. Aplicaciones del ensayo Fénix en la evaluación del efecto de la temperatura sobre la fragilidad de las mezclas

El ensayo Fénix ha sido aplicado para conocer el efecto de la temperatura en la resistencia a la fisuración de cuatro mezclas bituminosas. Se trata de cuatro mezclas bituminosas de granulometría tipo semidensa S-20, de acuerdo con la nor-

mativa española, Tabla 1, fabricadas con tres tipos de betunes convencionales de diferente penetración: B13/22, B40/50, B60/20 y un betún modificado con polímeros tipo BM3C, Tabla 2.

Todas las mezclas han sido fabricadas con el mismo porcentaje de betún, 4,3% de peso de betún sobre áridos y los ensayos han sido realizados a 20, 5 y -10°C.

Los resultados del ensayo Fénix para cada uno de estos betunes han sido recogidos en las siguientes figuras (Figura 2, Figura 3, Figura 4 y Figura 5) junto los parámetros Fénix de cada uno de los ensayos.

Tabla 1. Granulometría empleadas en la mezcla S-20.

Tamiz (mm)	25	20	12.5	8	4	2	0.5	0.25	0.125	0.063
Pasa (%)	100	87.5	71.5	58	42.5	31	16	11	7.5	5

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	-

Estado de la resistencia a la fisuración de las mezclas bituminosas

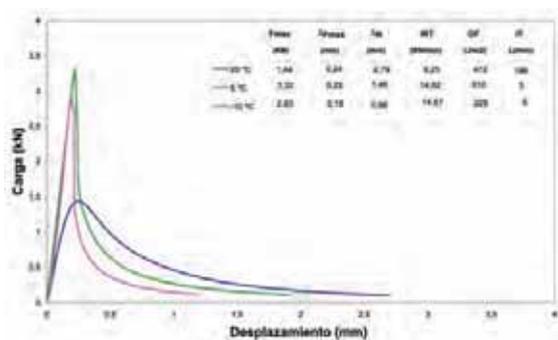


Figura 2. Curva carga-desplazamiento ensayo Fénix mezcla S20, betún B13/22.

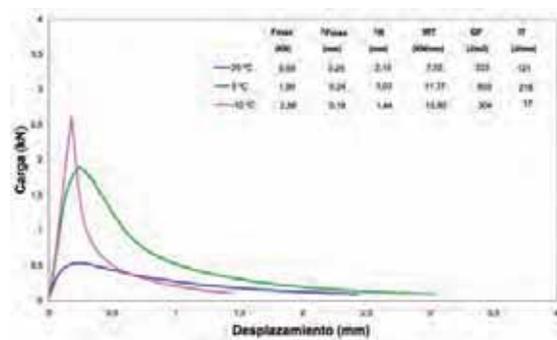


Figura 4. Curva carga-desplazamiento ensayo Fénix mezcla S20, betún B60/70.

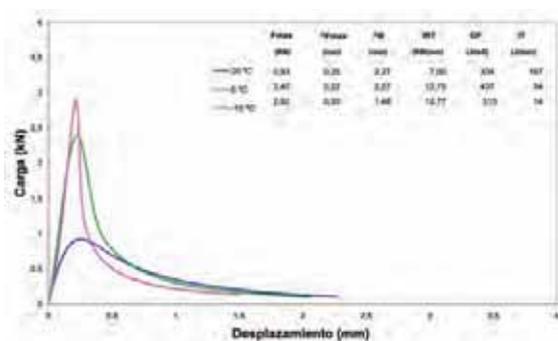


Figura 3. Curva carga-desplazamiento ensayo Fénix mezcla S20, betún B40/50.

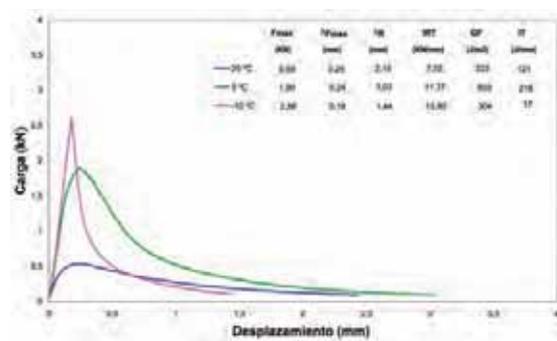


Figura 5. Curva carga-desplazamiento ensayo Fénix mezcla S20, betún BM-3c.

Estos resultados muestran claramente el efecto de la temperatura en la resistencia a la fisuración de las mezclas bituminosas, así como la variación de su comportamiento por efecto de la penetración del betún.

Del análisis de estas gráficas se deducen los siguientes resultados:

- Todas las mezclas ensayadas presentan un comportamiento frágil a -10°C. Las curvas obtenidas son similares para las cuatro mezclas, presentando una deformación de rotura ΔF_{max} muy baja y un elevado Índice de Resistencia a Tracción, módulo secante.
- La diferencia en el comportamiento de esta mezclas se aprecia más cuando el ensayo se realiza a 5 y 20°C.
- A 5°C, las mezclas fabricadas con los betunes más duros, B40/50 y B13/22 - en especial con éste último-, continúan presentando un comportamiento frágil. La respuesta de la mezcla con el betún más

duro es prácticamente igual a -10 que a 5°C. Sin embargo, las mezclas fabricadas con los betunes blandos ya no presentan este comportamiento frágil, sino que al contrario, presentan una mayor deformación para la carga máxima de rotura, y es a esta temperatura cuando mayor carga de rotura y energía de fractura muestran. A esta temperatura, los betunes blandos presentan una energía de fractura muy superior a la de los betunes duros.

- A 20°C, los cuatro tipos de betunes presentan un comportamiento muy diferente. Los betunes duros son los que presentan una mayor energía de fractura, sobre todo el B13/22. Los betunes blandos presentan una menor energía, pero ha aumentado notablemente su deformación de rotura y su tenacidad.

Este efecto de la temperatura sobre el comportamiento de mezclas fabricadas con betunes de diferente penetración puede ser apreciada con mayor claridad en la Figura 6, don-

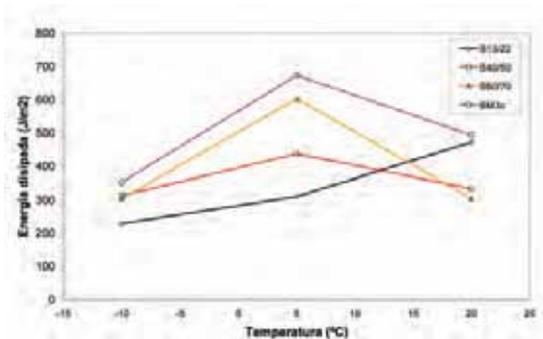


Figura 6. Energía disipada en el proceso de fisuración de mezclas con diferentes ligantes y a diferentes temperaturas de ensayo.

de se ha representado la variación de la energía de fractura con la temperatura. A -10°C, es cuando las mezclas presentan una menor energía y presentan una tendencia a converger todas en un mismo valor. La energía de fractura va aumentando con la temperatura hasta alcanzar un máximo en los betunes más blandos. El betún B13/22, probablemente

presente este máximo a una temperatura de 20°C o ligeramente mayor.

Lo que es importante remarcar es que a 5°C los betunes duros continúan mostrando una respuesta frágil. Esto puede ser importante cuando se vayan a usar estos betunes para fabricar mezclas de alto módulo. En estos casos debería aumentarse el contenido de betún por encima del 5-6% con objeto de mejorar la ductilidad de la mezcla y evitar un comportamiento frágil.

2.2. Relación entre los resultados del ensayo Fénix y los ensayos de fatiga

Se han determinado las leyes de fatiga de una serie de mezclas bituminosas con la intención de analizar la posible correlación con el ensayo Fénix. Las mezclas estudiadas han sido G-20, S-20, con betunes 13/22 y 60/70, y S20 y S-12 con 60 y 40% de material bituminoso reciclado (RAP). La tabla 1 muestra los resultados obtenidos en esta etapa y en las figuras 6, 7 y 8 se presentan las correlaciones encontradas en-

Tabla 3. Parámetros Fénix y leyes de fatiga de mezclas con diferentes ligantes y a diferentes temperaturas de ensayo.

Mezclas	Temperatura (°C)	Ensayo Fénix			Ensayo de Fatiga a Flexotrac. en 3 Ptos	
		Índice de Rig. a Tracción I_{RT} (kN/mm)	Energía Disipada G_D (J/m ²)	Desplazamiento al 50% Carga Máx. Δ_{mdp} (mm)	Módulo dinámico MD (MPa)	Ley de Fatiga
G 20 B-60/70	20	3,61	284	1,75	2.410	$\epsilon = 0,0041 N^{-0.2124}$
	5	9,22	838	0,84	9.293	$\epsilon = 0,0013 N^{-0.1684}$
S 20 B-60/70	20	3,56	323	1,66	3.229	$\epsilon = 0,0035 N^{-0.2061}$
	5	10,09	1093	0,94	13.520	$\epsilon = 0,0011 N^{-0.1662}$
G 20 B-13/22	20	7,59	713	0,97	8.750	$\epsilon = 0,0012 N^{-0.1731}$
	5	13,85	429	0,33	18.623	$\epsilon = 0,0007 N^{-0.1383}$
S 20 B-13/22	20	9,47	833	0,93	11.556	$\epsilon = 0,0011 N^{-0.1638}$
	5	14,72	474	0,31	23.848	$\epsilon = 0,0006 N^{-0.1277}$
S20 R60	20	9,74	398	0,56	11.212	$\epsilon = 0,0008 N^{-0.1458}$
S12 R40	20	8,05	520	0,84	9.671	$\epsilon = 0,0011 N^{-0.1751}$

Estado de la resistencia a la fisuración de las mezclas bituminosas

tre los parámetros Fénix (IRT, GF y Δmdp) y los parámetros de las leyes de fatiga ($\epsilon = \alpha \cdot N^b$) obtenidos en cada una de las mezclas ensayadas.

La Figura 7 muestra la correlación entre los resultados del índice de rigidez, IRT, obtenidos del ensayo Fénix y del módulo dinámico, MD, obtenidos del ensayo de fatiga a flexotracción. Se observa la correspondencia que hay entre ambos parámetros, confirmando que a menor penetración del ligante y menor temperatura de ensayo, mayor módulo y mayor índice rigidez.

Los coeficientes de la ley de fatiga también han sido correlacionados con parámetros del ensayo Fénix.

En la Figura 8 se puede ver la relación entre el parámetro "a" de la ley de fatiga (deformación en el ciclo 1 del ensayo a fatiga) y el desplazamiento cuando la carga alcanza la mitad del valor máximo en la zona post pico, Δmdp . Se deduce de esta figura que a mayor desplazamiento obtenido del ensayo Fénix, mayor deformación en la ley de fatiga, como lo muestran las mezclas con betunes de mayor penetra-

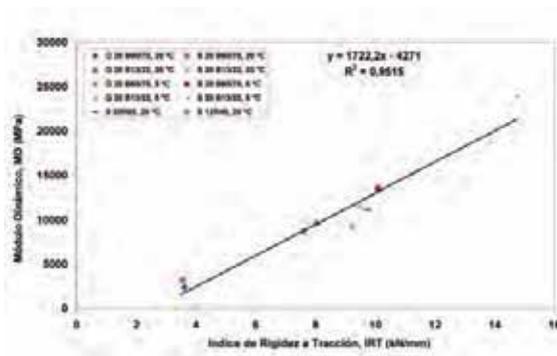


Figura 7. Correlación entre Módulo Dinámico del ensayo de fatiga y el parámetro índice de rigidez a tracción del ensayo Fénix.

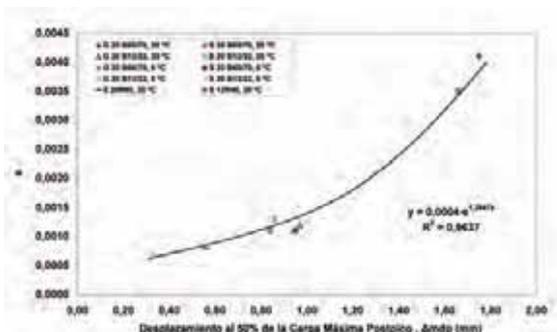


Figura 8. Correlación entre parámetro "a" de la ley de fatiga y el parámetro desplazamiento al 50% de la carga máxima post-pico del ensayo Fénix.

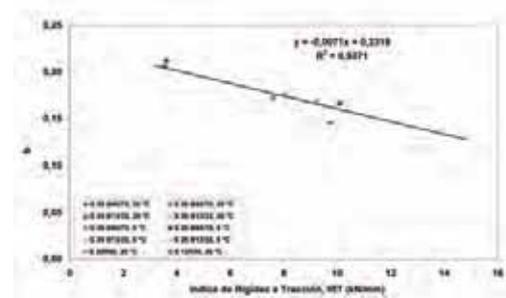


Figura 9. Correlación entre parámetro "b" de la ley de fatiga y el parámetro índice de rigidez a tracción del ensayo Fénix.

ción y ensayadas a mayor temperatura en el ensayo Fénix.

Finalmente, en la Figura 9 se presentan las correlaciones entre el índice de rigidez, IRT, y la pendiente "b" de la ley de fatiga. En este caso se puede comprobar que las mezclas con mayor rigidez en el ensayo Fénix presentan menor pendiente en la ley de fatiga, como es el caso de las mezclas con betunes más duros ensayadas a bajas temperaturas en el ensayo Fénix.

De este modo, a partir de los parámetros obtenidos del ensayo Fénix y mediante las correlaciones encontradas, es posible estimar la ley de fatiga de la mezcla bituminosa.

3. Ensayo EBADE

El ensayo EBADE consiste en un ensayo cíclico de tracción-compresión a deformación controlada a una frecuencia de 10 Hz. Durante el ensayo se va aumentando el nivel de deformaciones impuesto con lo que se consigue caracterizar el comportamiento de las mezclas bituminosas bajo cargas cíclicas de diferentes amplitudes. Cada nivel de deformación es mantenido durante un número constante de ciclos, normalmente 5.000, lo que permite analizar el proceso de deterioro de la mezcla bituminosa a distintos niveles de deformación hasta llegar a su rotura, Figura 10.

Durante el ensayo se determinan los siguientes parámetros de la mezcla:

Tensión:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad ,7$$

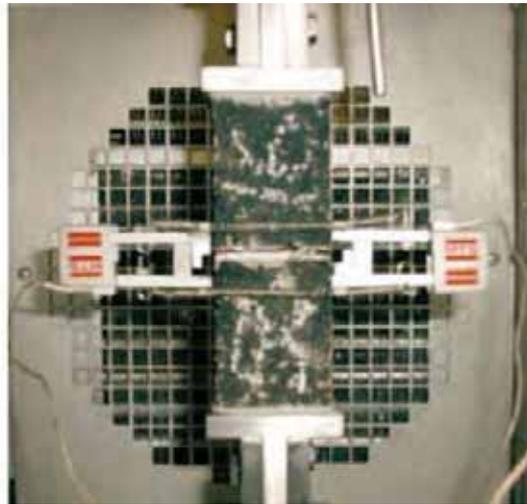
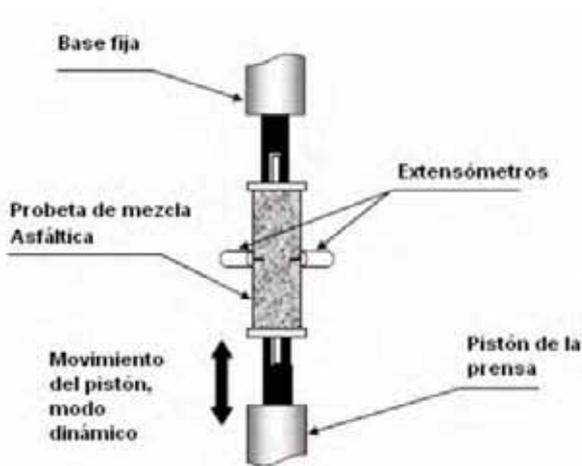


Figura 10. Montaje de nuevo procedimiento EABDE.

donde F es la fuerza registrada y S la superficie de fractura.

Módulo complejo:

$$E^* = \frac{\sigma_{\max}}{\varepsilon_{\max}}, \quad 8$$

donde σ_{\max} es la semi-amplitud de la tensión registrada en un ciclo y ε_{\max} es la semi-amplitud de la deformación impuesta.

Densidad de energía disipada:

Una de las características fundamentales de los materiales viscoelásticos es que se produce un retraso entre la señal impuesta, en nuestro caso la deformación, y la señal registrada.

A consecuencia de este fenómeno, cuando se representan los valores de tensión frente a los de deformación pertenecientes a un ensayo cíclico, se obtiene un ciclo de histéresis de forma elíptica. El área de esta elipse es una medida de lo que el material se aparta del comportamiento elástico ideal.

La Figura 11 muestra el área delimitada por la elipse obtenida en el plano tensión-deformación y la representación

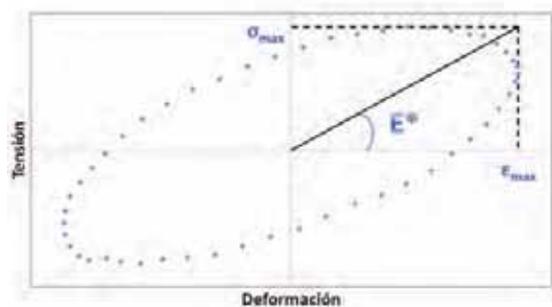


Figura 11. Ciclo de histéresis obtenido en un ensayo cíclico para un material viscoelástico (ref bahía).

gráfica del módulo complejo. El área de esta elipse es directamente proporcional a la energía disipada por el material en el proceso. Para el cálculo de este parámetro se emplea la ecuación 9.

donde g es la aceleración de la gravedad, S la superficie de fractura y σ_i y ε_i los n valores de la tensión y la deformación obtenidos a lo largo de un ciclo.

Estos parámetros son representados en función del número de ciclos lo que permite estimar la evolución del módulo de la mezcla y de la energía disipada con la amplitud de

$$ED = \frac{g}{S} \cdot \frac{1}{2} \left[(\sigma_1 \varepsilon_2 + \sigma_2 \varepsilon_3 + \dots + \sigma_{n-1} \varepsilon_n + \sigma_n \varepsilon_1) - (\sigma_2 \varepsilon_1 + \sigma_3 \varepsilon_2 + \dots + \sigma_n \varepsilon_{n-1} + \sigma_1 \varepsilon_n) \right], \quad 9$$

Estado de la resistencia a la fisuración de las mezclas bituminosas

deformación, ya que por la configuración del ensayo el número de ciclos está ligado a la deformación impuesta, 5.000 ciclos por escalón de deformación incrementándose ésta linealmente escalón a escalón.

Este ensayo muestra cómo influye la temperatura en el comportamiento mecánico de las mezclas bituminosas, mostrando una respuesta frágil y elástica a bajas temperaturas, y dúctil y tenaz para altas temperaturas. El ensayo EBADE puede también ser aplicado para considerar el efecto conjunto de las tensiones térmicas y los ciclos de fatiga y valorar su efecto, sobre todo, a bajas temperaturas.

3.1. Aplicación del ensayo EBADE en la evaluación del efecto de la temperatura sobre la energía de fractura.

El ensayo EBADE fue aplicado para comparar el efecto de la temperatura sobre el comportamiento bajo cargas cíclicas de mezclas bituminosas de diferente rigidez. Se analizó la respuesta de dos mezclas tipo S-12, fabricada una de ellas con un betún duro B-13/22, para conseguir un módulo elevado a medias y bajas temperaturas, y otra fabricada con un betún convencional B-60/70. Mediante la aplicación del ensayo EBADE a 20 y 5°C se ha analizado la variación del módulo de rigidez de la mezcla con la temperatura y, también, con la deformación impuesta, determinando para cada una de las mezclas y para cada temperatura su deformación de fallo. Los resultados de estos ensayos se recogen en las siguientes figuras (Figura 13, Figura 12, Figura 15 y Figura 14).

La mezcla fabricada con el ligante más duro, B-13/22, ensayada a 5°C ha mostrado una rigidez muy elevada y ha

llegado al fallo sin desviarse del comportamiento viscoelástico lineal, es decir, su módulo complejo se ha mantenido constante durante todo el proceso hasta que se ha producido el fallo de una manera brusca. Los reducidos valores obtenidos para la densidad de energía disipada indican que el ángulo de desfase entre deformación y tensión es reducido y, por lo tanto el comportamiento del material se encuentra cerca del comportamiento elástico lineal. Por su parte, la mezcla ensayada a 20°C, aunque también ha presentado un comportamiento marcadamente rígido, ha experimentado una ligera pérdida de módulo antes de romper, así como unos valores de la densidad de energía disipada en el tercer escalón de deformación de más del doble de los registrados por las probetas ensayadas a 5°C. Estas probetas han soportado un escalón más de deformación que las ensayadas a 5°C, Figura 13 y Figura 12.

La mezcla fabricada con el ligante B-60/70 ha mostrado un comportamiento totalmente diferente, Figura 15 y Figura 14. Los módulos complejos registrados han sido muy inferiores a igual temperatura de ensayo y se ha observado un comportamiento más dúctil. A 5°C la mezcla no se ha desviado del rango viscoelástico lineal hasta el tercer escalón, a partir del cual, se ha observado un ligera pérdida de módulo. A medida que ha progresado el ensayo, esta pérdida ha ido aumentando hasta producirse el fallo final de una forma relativamente frágil.

A la temperatura de 20°C la mezcla ha presentado una respuesta más dúctil. Su rotura tiene lugar a una deformación más elevada y la pérdida del módulo de la mezcla se va produciendo de forma continua, sin que en ningún momento haya una caída brusca.

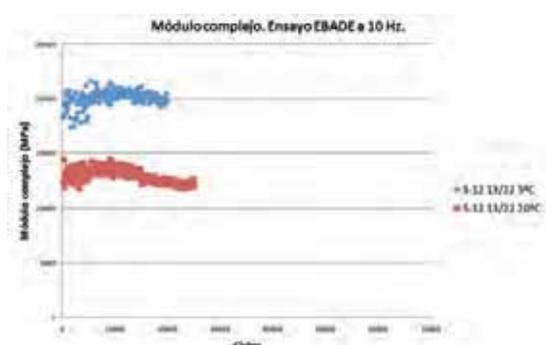


Figura 12. Módulo complejo para las mezclas fabricadas con el ligante B-13/22.

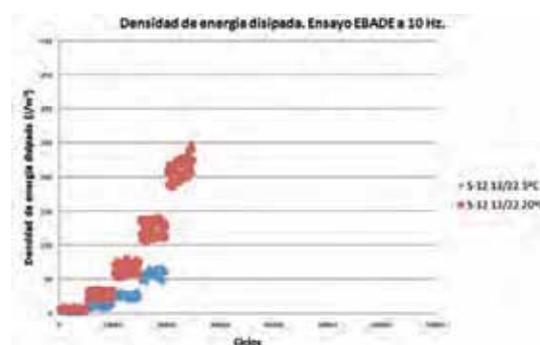


Figura 13. Densidad de energía disipada para las mezclas fabricadas con el ligante B-13/22.

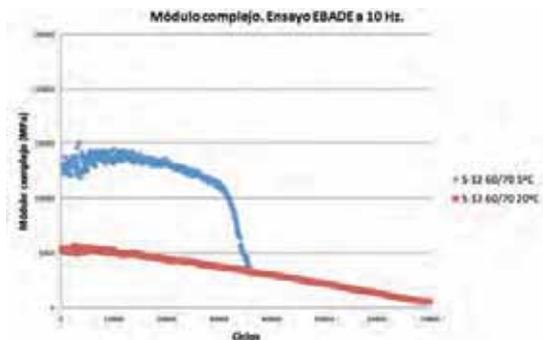


Figura 14. Módulo complejo para las mezclas fabricadas con el ligante B-60/70.

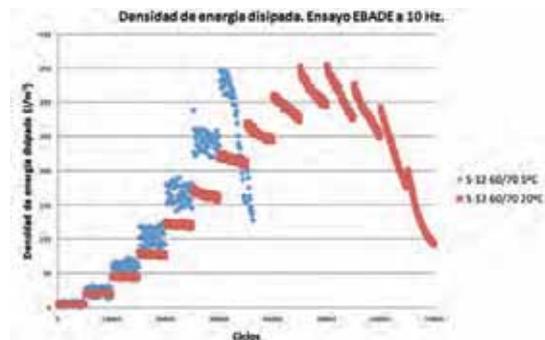


Figura 15. Densidad de energía disipada para las mezclas fabricadas con el ligante B-60/70.

Respecto a la energía disipada por esta mezcla a 5 y 20°C, se observa que es mucho mayor a 20°C, aunque el módulo a esta temperatura y la resistencia de la mezcla a rotura sea menor. La mezcla resulta más tenaz, se disipa más energía durante su proceso de fallo, cuando presenta menor resistencia y una mayor deformabilidad que en el caso de un comportamiento más rígido y resistente.

Los resultados de este ensayo indican que habría que tener más en cuenta la energía disipada y el comportamiento dúctil de las mezclas en el diseño de éstas, así como en el análisis estructural de los firmes flexibles, ya que se trata de un factor que afecta a la velocidad de propagación de fisuras en las capas del firme. Por otra parte, las gráficas de densidad muestran que para deformaciones muy bajas la energía disipada se mantiene constante. Es decir, no se observa ningún deterioro del material. Este nivel de deformaciones podría estar asociado con el endurecimiento límite de la mezcla. Este ensayo muestra claramente para cada una de las mezclas ensayadas los niveles de deformación en los que se produce el rápido fallo de la mezcla. Este nivel de deformación de rotura aumenta con la temperatura y la penetración del betún.

3.2. Efecto de las tensiones térmicas en la resistencia a fatiga

El ensayo EBADE permite también evaluar el estado de tensiones térmicas producido en una probeta de mezcla bituminosa cuando se mantienen las mordazas que la sujetan fijas y se baja la temperatura de la cámara. Se puede iniciar el ensayo cíclico cuando la probeta está sometida a tensiones térmicas y así superponer éstas con las tensiones originadas por

cargas cíclicas de amplitud variable. Mediante este procedimiento se ha analizado también el efecto de la temperatura y las cargas cíclicas en el comportamiento de mezclas deformables y tenaces, fabricadas con un betún B 60/70 y de mezclas rígidas y frágiles en las que se ha usado, igual que en los estudios anteriores, betunes duros B 13/22.

Las tensiones registradas en las distintas mezclas evaluadas como consecuencia de la variación de temperaturas entre 20 y 5 °C, pueden observarse en la Figura 16. En esta figura se han representado las tensiones registradas para cada mezcla fabricada con los ligantes de diferente penetración, para un periodo de 12 horas, cuando las probetas son confinadas en la prensa, sin posibilidad de deformación, mientras baja la temperatura. Se observa un fuerte incremento inicial de tensiones en la primera hora, registrándose para la mezcla fabricada con el ligante duro de penetración 13/22, una tensión máxima superior a cuatro veces la registrada por la mezcla fabricada con el ligante más blando, de penetración 60/70. A su vez, se observa en ambas curvas, que existe una disipación de tensiones posterior al periodo inicial en que se registraron los valores máximos, presentando al cabo de las 12 horas una tensión del orden de 1/3 del valor máximo registrado en ambas mezclas.

Los resultados obtenidos de la aplicación del procedimiento EBADE a las mezclas evaluadas, sometidas a un estado tensional previo de origen térmico, producto de la variación de la temperatura de 20 a 5 °C, pueden observarse en la Figura 17. En esta figura se aprecia que las tensiones registradas en la primera hora, al igual que en la Figura 16, alcanzan sus valores máximos al final de dicho periodo. Si en este momento se empieza a aplicar el procedimiento EBADE, ambas tensiones se superponen y el proceso de rotura es más rápido

Estado de la resistencia a la fisuración de las mezclas bituminosas

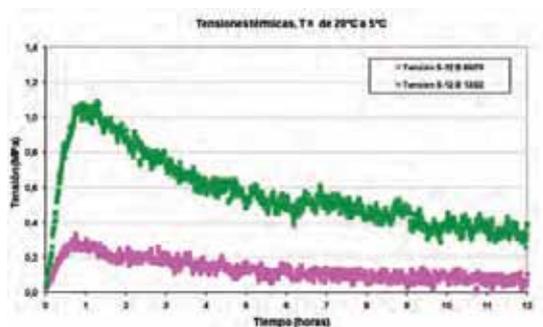


Figura 16. Tensiones térmicas registradas en un periodo de 12 horas, mezcla AC, B60/70 y B13/22.

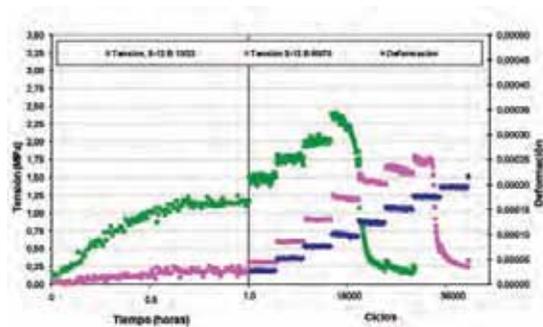


Figura 17. Tensiones térmicas registradas en un periodo de 1 hora, T° de 20 a 5°, posterior aplicación procedimiento de fatiga EBADE, mezcla AC 16 S, B60/70 y B13/22.

en el caso de la mezcla fabricada con el betún más duro. Sin embargo, para la mezcla confeccionada con el ligante de mayor penetración, B 60/70, las tensiones térmicas inducidas en el periodo evaluado, no afectaron significativamente ni a su nivel de deformación de rotura, ni al número de ciclos de hasta el fallo, poniendo de manifiesto la mayor flexibilidad y mejor comportamiento de la mezcla fabricada con el ligante de menor viscosidad. En este caso, las tensiones térmicas son bastante más pequeñas que para el ligante duro, lo que indica el bajo efecto de los cambios de temperatura en la mezcla, en los rangos evaluados de 20 a 5°C.

4. Conclusiones

El ensayo Fénix y EBADE son dos ensayos experimentales que permiten poner de manifiesto la resistencia a la fisuración de las mezclas y como varía su comportamiento por efecto de la temperatura. Ambos ensayos permiten diferenciar la respuesta frágil y dúctil de una mezcla bituminosa y cómo este

comportamiento viene afectado por la penetración del betún empleado y la temperatura de ensayo. Ambos ensayos pueden ser aplicados para obtener la energía de fractura de las mezclas bituminosas y, también, a partir de las correlaciones obtenidas, estimar la resistencia a fatiga y a la fisuración de las mezclas bituminosas.

De los resultados presentados a lo largo de este trabajo se derivan las siguientes conclusiones:

- Existe una buena correlación entre los parámetros obtenidos del ensayo Fénix y los parámetros que definen las leyes de fatiga, obtenidas por el procedimiento de ensayo de fatiga a flexotracción en tres puntos, por lo tanto, este ensayo puede caracterizar de una manera más fácil y rápida la respuesta de una mezcla al fallo por fatiga.
- El ensayo Fénix proporciona información de la energía disipada en el proceso de fractura, G_D , y la tenacidad de las mezclas, I_T , parámetros que pueden discriminar una mezcla de otra, junto con su módulo de rigidez, teniendo claro que presentan un mejor comportamiento aquellas con mayor energía disipada para similitud de módulos.
- El procedimiento EBADE de barrido de deformaciones se ha mostrado suficientemente sensible para evaluar el comportamiento a fatiga de mezclas rígidas y mezclas más dúctiles. A su vez, este procedimiento permite evaluar el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas frente al efecto combinado de las cargas del tráfico y las condiciones ambientales (gradientes térmicos).

5. Agradecimientos

La realización del Proyecto Fénix (www.proyctofenix.es) ha sido posible gracias a la contribución financiera del Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI) dentro del marco del programa Ingenio 2010 y, más concretamente, a través del Programa CENIT. Las empresas y centros de investigación que participan en el Proyecto desean mostrar su gratitud por dicha contribución.

Los autores quieren agradecer a todas las organizaciones y empresas participantes del Proyecto Fénix: Centro de Investigación Elpidio Sánchez Marcos (CIESM), Centro Zaragoza, Construcciones y Obras Llorente (Collosa), Ditec-pesa, Asfaltos y Construcciones Elsan, Intrame, Pavasal,

Repsol YPF, Sacyr, Serviá Cantó, Sorigué, CARTIF, CEDEX, CIDAUT, CSIC (IIQAB), GIASA, Intromac, Labein, Universidad de Alcalá de Henares, Universidad Carlos III de Madrid, Universidad de Castilla La Mancha, Universidad de Huelva, Universidad de Cantabria, Universidad Politécnica de Cataluña, Universidad Politécnica de Madrid, y a sus numerosos colaboradores cuya capacidad de trabajo y eficacia están permitiendo el desarrollo de este Proyecto en un ambiente de cooperación.

6. Referencias

1. Anglada, M. J., J. Alcalá, L. M. Llana, A. M. Mateo, y M. N. Salán 2002. *Fractura de materiales*. Barcelona: Edicions UPC.
2. Hertzberg, R. W. 1996. *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. John Wiley & Sons, Inc.
3. Kuai, H. D., H. J. Lee, G. S. Zi, y S. H. Mun 2009. *Application of generalized J integral to crack propagation modeling of asphalt concrete under repeated loading*. Transportation Research Board 88th Annual Meeting. Washington, D.C.
4. Pérez Jiménez, F., G. Valdés, R. Miró, R. Botella, y J. M. Campana 2011. *Effect of thermal stresses on fatigue behavior of bituminous mixtures*. Transport Research Board 90th Annual Meeting. Washington, D.C.
5. Pérez, F. E., G. Valdés, R. Miró, A. Martínez, y R. Botella 2010. *Fénix Test: Development of a New Test Procedure for Evaluating Cracking Resistance in Bituminous Mixtures*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board vol. 2181: 36-43.
6. Pérez-Jiménez, F. E., R. Botella, y G. Valdés 2009. *Experimental study on resistance to cracking of bituminous mixtures using the Fénix Test*. 7th Int. RILEM Symposium on Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, Rhodes, Greece.
7. Rice, J. R. 1968. *A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks*. Journal of Applied Mechanics vol. 35: 379-386.
8. Schapery, R.A. 1984 *Correspondence principles and a generalized J integral for large deformation and fracture analysis of viscoelastic media*. International Journal of Fracture vol. 25 - 3: 195-223.
9. Valdés Vidal, G. A., R. Botella Nieto, F. E. Pérez Jiménez, y R. Miró Recasens 2010. *Aplicación del ensayo Fénix para dosificar mezclas resistentes al fallo por fatiga*. V Jornada Nacional ASEFMA. Madrid, España.
10. Valdés, G., F. E. Pérez-Jiménez, y R. Botella 2009. *Ensayo Fénix, una Nueva Metodología para Medir la Resistencia a la Fisuración en Mezclas Asfálticas*. Revista de la Construcción vol. 8- 1: 114-125.