

**CRITERIOS Y
ESPECIFICACIONES PARA
EL USO DEL ENSAYO FÉNIX
EN EL DISEÑO DE MEZCLAS
BITUMINOSAS TIPO AC**

**FÉLIX E. PÉREZ-JIMÉNEZ,
GONZALO VALDÉS VIDAL,
MARINA MUÑOZ OLIVER,
RODRIGO MIRÓ RECASENS,
ADRIANA H. MARTÍNEZ REGUERO,
RAMÓN BOTELLA NIETO
Y JOSÉ AMORÓS PARRAS**
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE
CATALUNYA – BARCELONATECH

CRITERIOS Y ESPECIFICACIONES PARA EL USO DEL ENSAYO FÉNIX EN EL DISEÑO DE MEZCLAS BITUMINOSAS TIPO AC

RESUMEN

El diseño de las mezclas bituminosas se ha basado en la mayoría de los casos en evaluar la estabilidad y la resistencia a las deformaciones plásticas de la mezcla. Esto ha llevado al uso de mezclas poco flexibles y con escasa ductilidad que presentan problemas de fisuración. El método propuesto basado en el ensayo Fénix pretende tener en cuenta ambas propiedades de la mezcla, estabilidad y resistencia a la fisuración, mediante el control volumétrico de su composición y la evaluación de su ductilidad y energía de fractura mediante el ensayo Fénix. Se recoge también una serie de recomendaciones y especificaciones para el diseño de mezclas tipo AC.

PALABRAS CLAVE

Mezcla bituminosa, ensayo Fénix, diseño de mezcla.

INTRODUCCIÓN

Las mezclas bituminosas presentan la característica de que en su diseño y dosificación hemos de tener en cuenta diferentes propiedades. Así como al dosificar y diseñar un hormigón hidráulico prácticamente sólo nos ocupamos de su módulo y resistencia, en el caso de las mezclas bituminosas hemos de considerar su módulo y resistencia mecánica, pero también nos hemos de fijar en su resistencia a la deformación y a la fisuración, por no hablar de su resistencia a la disgregación o a la acción del agua.

Además, estas propiedades varían con la temperatura de ensayo. Por lo tanto, si queremos considerar todas estas propiedades en el diseño de las mezclas, tendremos que recurrir a una amplia gama de ensayos en donde deberemos estudiar la variación de las propiedades de la mezcla en función de la temperatura, el porcentaje y tipo de betún utilizado. Todo esto lleva a que en el diseño y dosificación de una mezcla bituminosa se dé prioridad a una propiedad o tipo de ensayo, que se considera prioritario para esa mezcla en función de su ubicación y uso, con el que se lleva a cabo los estudios de la granulometría, tipo y contenido de ligante, y posteriormente se evalúan las otras propiedades de la mezcla para la fórmula y dosificación seleccionada. El ensayo elegido como base del método tiene una gran incidencia en la calidad del procedimiento y sobre las características de la mezcla diseñada, pues de alguna manera estaremos dando prioridad a las propiedades o características de la mezcla que este ensayo evalúa.

Así, el método Marshall, el método de diseño hasta ahora empleado en España, se basa en diseñar la mezcla teniendo en cuenta principalmente su estabilidad, que es la propiedad que se determina en este ensayo. Al exigir una estabilidad mínima a 60°C, lo que se va buscando es diseñar mezclas que resulten resistentes a las deformaciones plásticas a altas temperaturas, que ha sido uno de los problemas que siempre ha preocupado en nuestro país en el uso de las mezclas bituminosas.

El método consideraba también una deformación mínima de la mezcla para evitar el uso de mezclas excesivamente frágiles, que se fisurarían con facilidad, e indicaba una cantidad mínima de betún para así tener una cohesión mínima que evitase la rápida disgregación de la mezcla por la acción del tráfico y del agua.

Analizando la variación de los parámetros Marshall (estabilidad y deformación) y los volumétricos (% huecos en mezcla y % de huecos rellenos) con el contenido de betún se definía el porcentaje óptimo y, con posterioridad, se determinaba para la mezcla seleccionada su resistencia a las deformaciones plásticas, mediante el ensayo de pista, y su resistencia a la acción del agua, mediante el ensayo de inmersión-compresión. Este método llevó al diseño de mezclas estables y resistentes a las deformaciones plásticas, pero que con frecuencia han resultado excesivamente frágiles y fisurables al no tenerse en cuenta esta propiedad en el diseño de la mezcla.

Actualmente se encuentran dos tendencias en los métodos de diseño, una que se apoya en el proyecto SHRP y en el método Superpave [1] que dosifica la mezcla basándose fundamentalmente en sus características volumétricas y el proceso de compactación giratorio, y otra, prestacional o funcional, consistente en diseñar la mezcla aplicando una serie más completa de ensayos que permita analizar con profundidad los parámetros de la mezcla: módulo, deformaciones plásticas, resistencia a la fisuración por fatiga, tensiones térmicas, etc. Son los extremos que nos podemos encontrar, aunque la aplicación de uno u otro procedimiento esté también relacionada con la intensidad de la vía donde va a ser usada la mezcla. El mismo método Superpave sólo considera la dosificación volumétrica para el nivel 1, recomendando la dosificación

funcional, basada en las propiedades mecánicas de la mezcla, para los niveles 2 y 3, tabla 1a.

El procedimiento volumétrico del método Superpave se basa en dosificar la mezcla, cuya granulometría ha de cumplir una serie de requisitos, para que tenga un 4% de huecos tras el proceso de postcompactación que puede tener la mezcla en servicio por el paso del tráfico. En función del número de tráfico se aumenta el número de giros de compactación giratoria, tabla 1b, y al final, el porcentaje de huecos de la mezcla no puede ser inferior al 4%. Este procedimiento es avalado por la experiencia española, donde se ha observado que mezclas que presentan un porcentaje de huecos igual o superior al 4% presentan un buen comportamiento en el ensayo de pista [2].

El problema que puede tener este procedimiento es que de nuevo está muy centrado en la deformabilidad de la mezcla y no tiene en cuenta cómo puede afectar el tipo y el porcentaje de betún a otras propiedades mecánicas de la mezcla: módulo y resistencia a la fisuración. Está claro que este ensayo puede servir de referencia, como ocurría en el Marshall, para seleccionar una o varias dosificaciones y comprobar sus propiedades mecánicas y resistentes con otro tipo de ensayos,

Tabla 1b. Número de giros para la compactación giratoria.

ESALs de diseño (millones)	Número de giros del compactador giratorio		
	N _{ini}	N _{dis}	N _{max}
< 0,3	6	50	75
0,3 a < 3	7	75	115
3 a < 30	8	100	160
≥ 30	9	125	205

Tabla 1a. Niveles de diseño Superpave de mezclas bituminosas.

Nivel	Tráfico	ESAL (80 kN)	Propiedades a evaluar	
1	Bajo	≤ 10 ⁶	Volumétricas	-
2	Intermedio	≤ 10 ⁷	Volumétricas	Deformación permanente, fatiga, fisuración a baja temperatura, análisis intermedio
3	Alto	>10 ⁷	Volumétricas	Deformación permanente, fatiga, fisuración a baja temperatura, análisis completo

pero, al igual que el Marshall, prioriza la estabilidad frente a las otras propiedades de la mezcla.

Un procedimiento sencillo para la dosificación de la mezcla que podría tener en cuenta sus propiedades volumétricas y también algunas de sus propiedades mecánicas, en especial su resistencia a la fisuración, podría ser el procedimiento que se presenta a continuación basado en el ensayo Fénix.

ENSAYO FÉNIX. PROPIEDADES EVALUADAS

El ensayo Fénix, al igual que el ensayo Marshall, es un ensayo experimental, que como el Marshall tiene relación y sirve para valorar ciertas propiedades de la mezcla. En esencia consiste en determinar el esfuerzo necesario para fisurar una probeta semicilíndrica, aplicando un esfuerzo de tracción en su plano diametral, figura 1. El esfuerzo se aplica mediante dos placas pegadas a la probeta en su plano diametral que van sujetas a los anclajes de la prensa. El ensayo se realiza a una velocidad constante de deformación del pistón de aplicación de carga de 1 mm/min. Durante el ensayo se registra el esfuerzo aplicado en función de la deformación. La probeta presenta una pequeña hendidura entre las dos placas para facilitar la zona de fisuración de la probeta.

Si analizamos la curva de esfuerzos resultante del ensayo, podemos definir distintos parámetros que podemos relacionar con las características mecánicas y resistentes de la mezcla.

En primer lugar, se observa un aumento casi lineal del esfuerzo aplicado, que depende de la rigidez de la mezcla. En el ensayo Fénix se determina un índice de rigidez a tracción, IRT, que es la pendiente de la curva esfuerzo-deformación entre el 25 y el 50% de la carga máxima. Este parámetro se relaciona muy bien con el módulo dinámico de la mezcla, cuando se aplica este ensayo y el de fatiga de tres puntos en probetas fabricadas con el mismo tipo de mezcla. En los ensayos realizados en el Laboratorio de Caminos para el desarrollo del ensayo Fénix y su correlación con los ensayos de fatiga [3], se ha observado una relación lineal entre ambos parámetros, figura 2.

$$IRT = \frac{F_{50} - F_{25}}{(d_{50} - d_{25})} = \frac{0,25 F_{max}}{(d_{50} - d_{25})}$$

donde:

IRT: índice de rigidez a tracción, en kN/mm

*F*₅₀: 50% de la carga máxima, en kN

*F*₂₅: 25% de la carga máxima, en kN

*F*_{max}: carga máxima, en kN

*d*₅₀: deformación en el 50% de la carga máxima, en mm

*d*₂₅: deformación en el 25% de la carga máxima, en mm

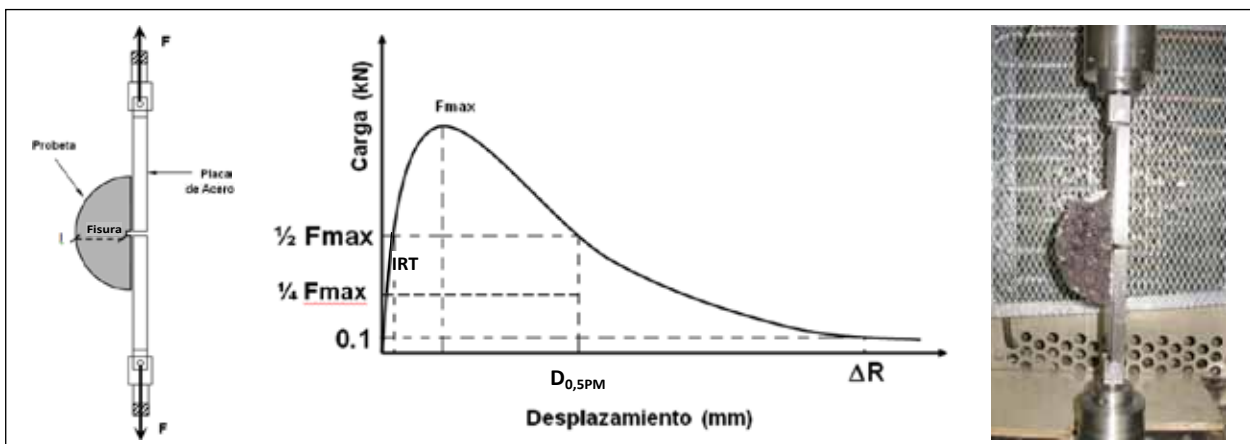


Figura 1. Esquema del ensayo Fénix y curva carga-desplazamiento obtenida.

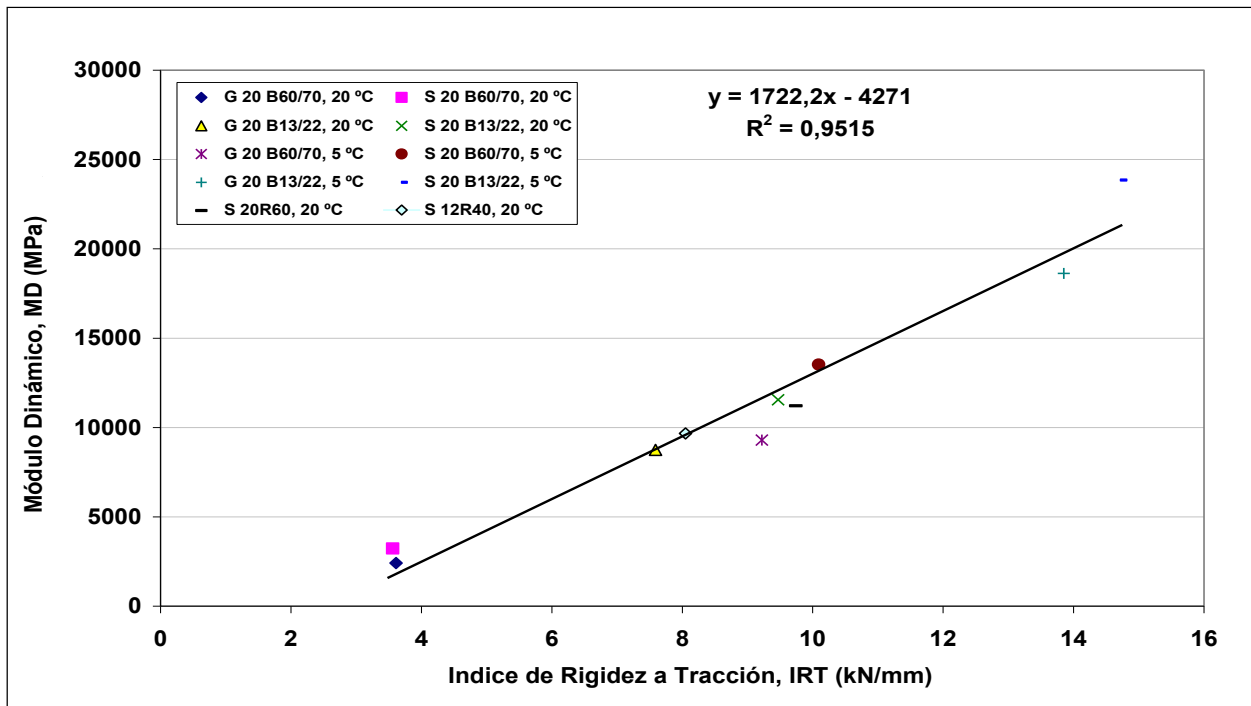


Figura 2. Correlación entre el módulo obtenido con el ensayo de fatiga a tres puntos y el índice de rigidez del ensayo Fénix.

Por otra parte, está la resistencia máxima de la curva esfuerzo-deformación que estaría asociada con la cohesión proporcionada por el mástico asfáltico a la mezcla.

$$T_{max} = \frac{F_{max}}{S} \quad (\text{MPa})$$

donde:

T_{max} : tensión máxima, en MPa

Se observa que a temperaturas bajas, cuando la cohesión proporcionada por el betún es muy alta, la fisuración y el plano de fallo tienen lugar a través de las piedras, mientras que a temperaturas más altas, menor resistencia del betún, esta fisuración tiene lugar a través del mástico que recubre las partículas, figura 3.

Relacionada también con la cohesión de la mezcla estaría la energía empleada por la máquina para la fisuración total de la probeta, energía disipada.

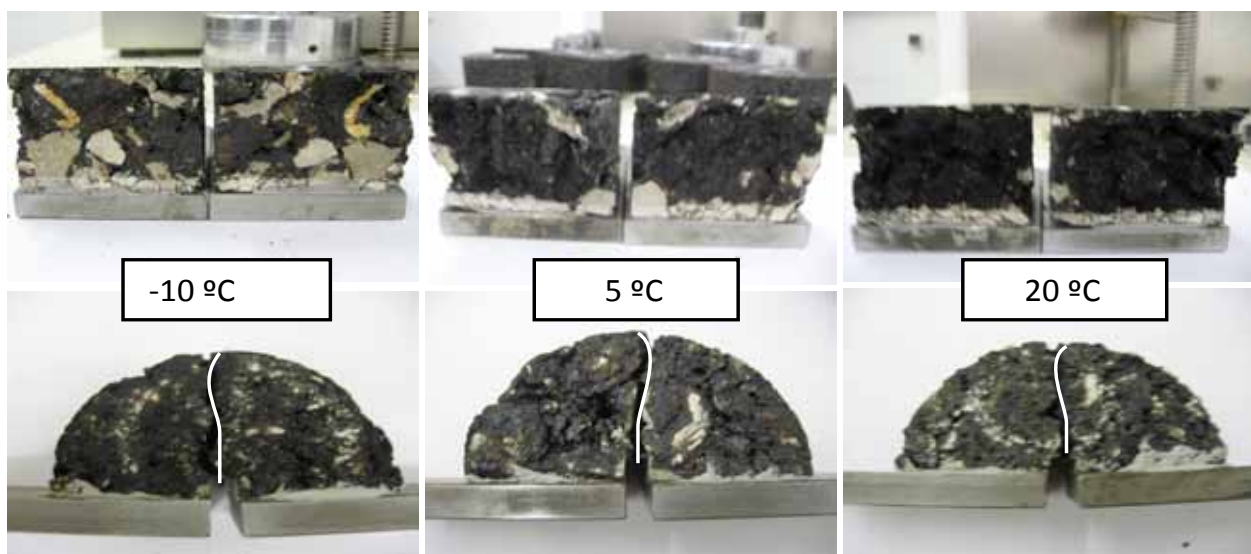


Figura 3. Superficies de fractura para mezcla G-20 a diferentes temperaturas de ensayo.

Esta energía se correspondería con la integral del área bajo la curva de esfuerzo-deformación, dividido por la superficie de fractura. Cuanto mayor es la energía disipada, G_D , mayor es la resistencia a la fisuración de la mezcla. Este parámetro resulta más interesante a la hora de valorar la cohesión de la mezcla que el de la resistencia máxima, pues tiene en cuenta todo el proceso de rotura del material tras la carga máxima, que en los materiales bituminosos es de gran importancia.

$$G_D = \frac{\int_0^{df} F(x) \cdot dx}{S} \quad (\text{J/m}^2)$$

donde:

G_D : energía disipada, en J/m^2

F : fuerza en función de la deformación, en N

x : deformación, en m

S : superficie de fractura, en m^2

df : deformación final del ensayo, en m

Es precisamente esta respuesta dúctil de la mezcla bituminosa la que interesa tener en cuenta en el diseño de mezclas resistentes a la fisuración. No necesitamos sólo una alta energía disipada, sino que, además, ésta provenga en su mayoría de la zona de rotura de la probeta, después de la carga máxima. Esto indicaría que la mezcla es capaz de alcanzar una mayor deformación hasta su rotura, manteniendo parte de su resistencia desde que se inicia su fallo hasta que éste realmente se produce. Con el fin de valorar el comportamiento más o menos dúctil de la mezcla se ha definido un índice de tenacidad en donde se multiplica el área de la curva postpico por el desplazamiento realizado por la prensa hasta reducir la carga al 50% de la máxima.

$$IT = \frac{\int_{d_M}^{d_{0,5M}} F(x) \cdot dx}{S} * (d_{0,5M} - d_M)$$

donde:

IT : índice de tenacidad, en $(\text{J/m}^2) \cdot \text{mm}$

F : fuerza aplicada en función de la deformación, en N

S : superficie de fractura, en m^2

d_M : deformación correspondiente a la F_{max} , en m

$d_{0,5PM}$: deformación en la parte descendente correspondiente al 0,5 de la F_{max} , en mm

Como parámetro alternativo al Índice de Tenacidad se usa también la deformación correspondiente al 50% de la carga máxima en la zona postpico para valorar también la ductilidad y tenacidad de la mezcla.

Ensayos realizados en el Laboratorio de Caminos durante el desarrollo del ensayo Fénix [3], han mostrado la correlación entre este índice de tenacidad ó la deformación en el 50% de la carga máxima con los coeficientes de las leyes de fatiga de las mezclas bituminosas.

$$\log N = a - b \log \epsilon$$

Cuanto mayor es el IT , o la deformación al 50% de la carga máxima, mayor es el valor de a y por tanto mayor será la vida de fatiga para una misma deformación de rotura, figura 4. Por otra parte, en este mismo trabajo se ha obtenido también una excelente correlación entre el IRT del ensayo Fénix y el coeficiente b de la ley de fatiga, figura 5. Cuanto mayor es el IRT más rígida es la mezcla y menor es su pendiente en el ensayo de fatiga.

Todos estos resultados muestran que el ensayo Fénix, aún tratándose de un ensayo experimental, permite valorar la propiedad de la mezcla relacionada con la resistencia a la fisuración, tanto en el caso de esfuerzos térmicos, mezclas frágiles a bajas temperaturas, como con la fisuración por fatiga producida por la repetida aplicación de las cargas del tráfico.

Además, este ensayo es muy sensible a las diferentes variaciones que puede tener lugar en la composición de la mezcla, como puede ser su tipología, figura 6, el tipo de betún, figura 7, o el contenido de ligante, figura 8 [4].

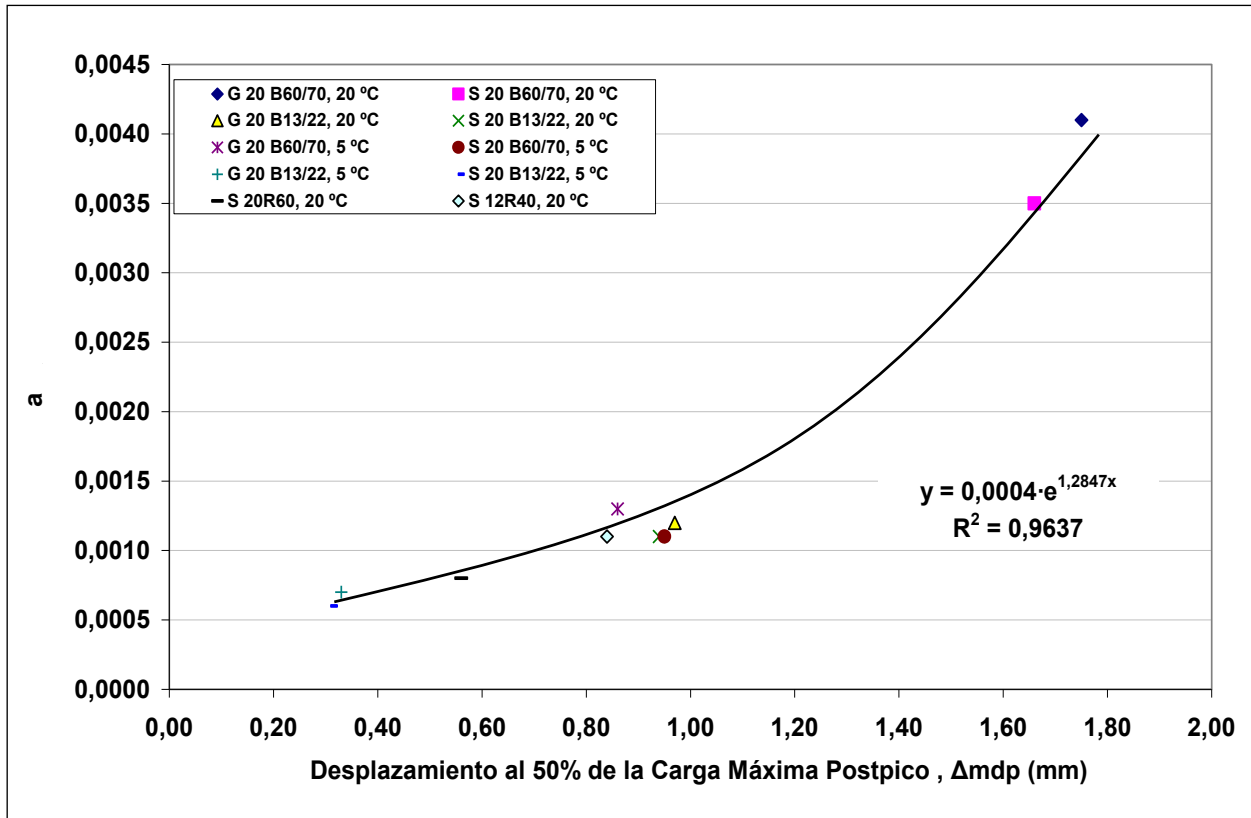


Figura 4. Correlación entre el desplazamiento al 50% de la carga máxima post-pico del ensayo Fénix y el parámetro a de la ley de fatiga en ensayo de 3 puntos.

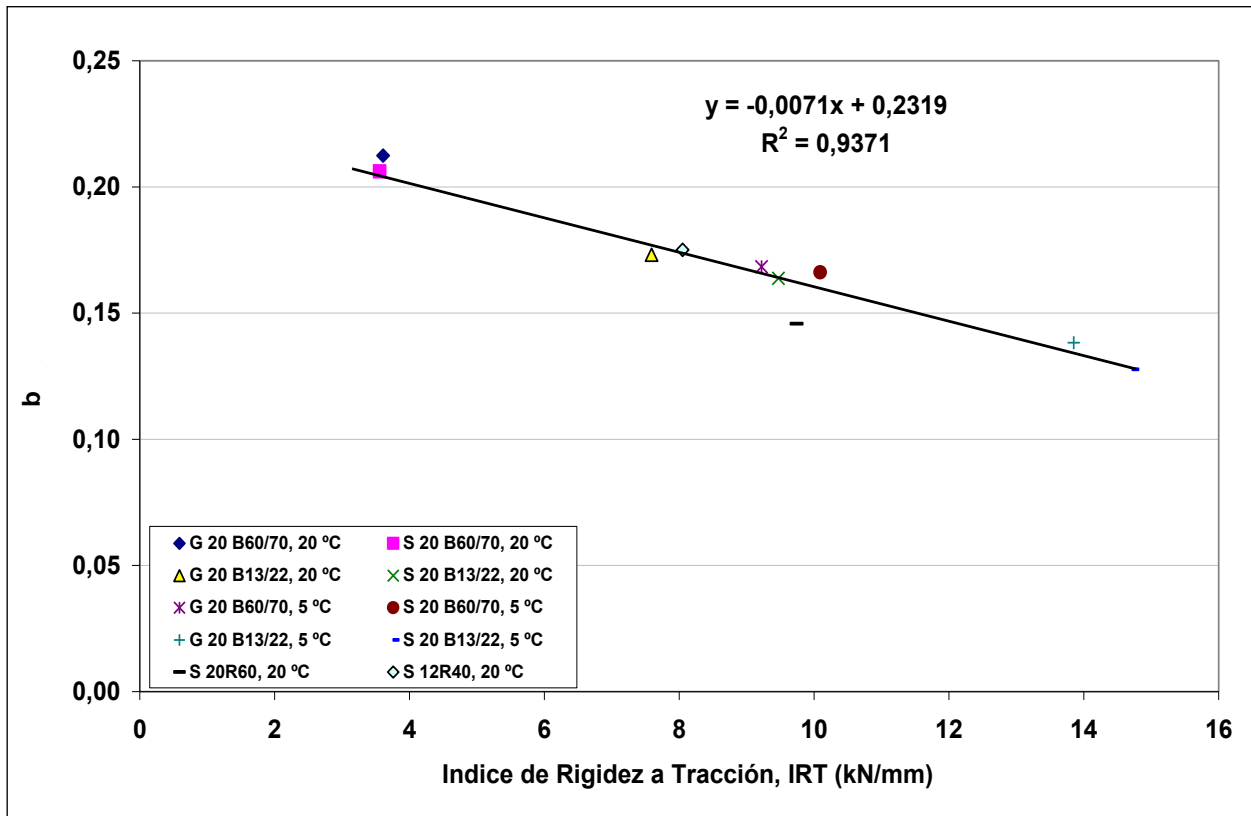


Figura 5. Correlación entre índice de rigidez a tracción del ensayo Fénix y el coeficiente b de la ley de fatiga.

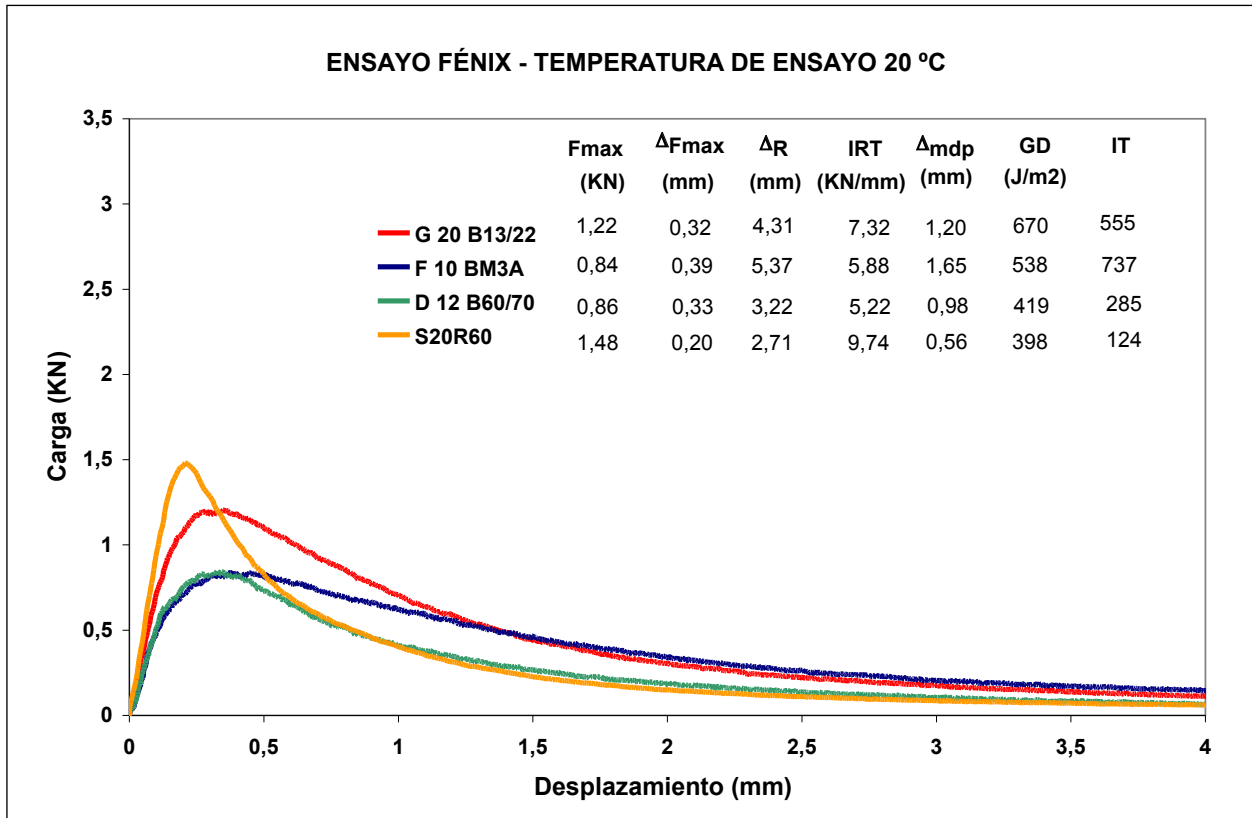


Figura 6. Curva carga-desplazamiento del ensayo Fénix para diferentes tipos de mezclas bituminosas.

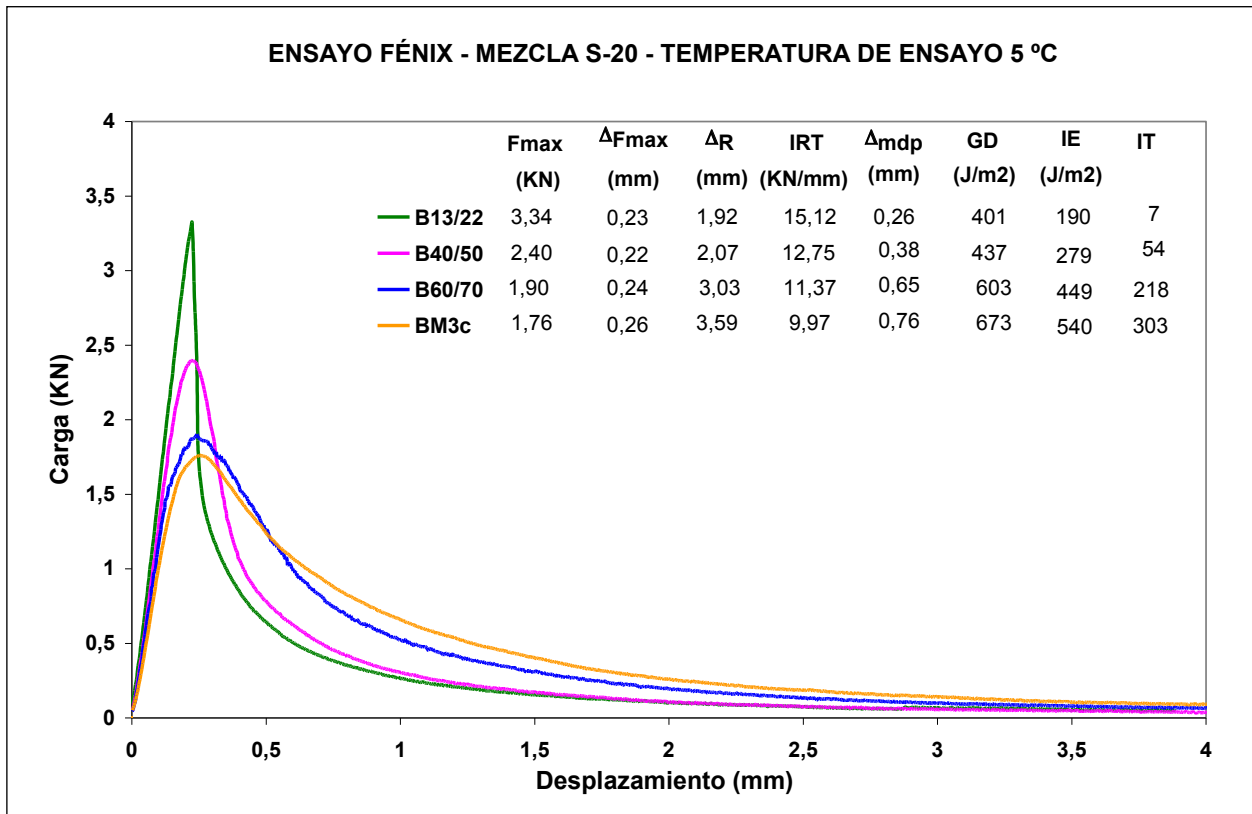


Figura 7. Curvas carga-desplazamiento del ensayo Fénix para una mezcla bituminosa con diferentes tipos de betunes.

En la figura 6 pueden verse las diferencias de comportamiento entre una mezcla relativamente rígida fabricada con un 60% de material reciclado, S20R60, frente a una mezcla dúctil fabricada con un betún modificado, F10 BM3c. La primera presenta un alto índice de rigidez, 9,74 kN/mm, y un bajo índice de tenacidad, 124, mientras que la mezcla F10 BM3c presenta una menor rigidez, 5,88 kN/mm y una alta tenacidad, 737. También es interesante remarcar en este gráfico, que con un betún duro, B13/22, pueda fabricarse una mezcla de una rigidez alta, 7,32 kN/mm, pero manteniendo también una alta tenacidad, 555.

El ensayo puede realizarse a diferentes temperaturas para evaluar, por ejemplo, la susceptibilidad térmica de mezclas bituminosas, o comprobar la respuesta a bajas temperaturas. En la figura 7 se recoge el efecto del tipo de betún en una mezcla tipo AC semidensa, ensayada a 10°C. Se observa la rotura frágil de las mezclas fabricadas con betunes más duros, B13/22 y B40/50, que presentan un alto valor de rigidez a tracción y un bajo índice de tenacidad, 7 y 54. Por el contrario, la mezcla fabricada con el betún 60/70 y, sobre todo, la mezcla con BM3c, presentan un índice

de rigidez alto, 11,37 y 8,97 kN/mm, y también una elevada ductilidad, como muestra su índice de tenacidad, 218 y 300, respectivamente.

En estos resultados también se puede observar el aumento de la magnitud de la deformación al 50% de la carga máxima, en la parte descendente, (curva post-pico). Este valor varía entre un 0,26 para la mezcla con betún 13/22 y 0,76 para la mezcla con betún BM3c. Este parámetro, Δ_{mdp} , es también un indicativo de la ductilidad y tenacidad de la mezcla, y puede ser empleado también para caracterizar su comportamiento y tipo de rotura.

Por último, en la figura 8, se ha representado el efecto del contenido de betún en la respuesta de una mezcla tipo AC gruesa a 5°C. Esta mezcla ha sido fabricada con un betún duro B13/22 y con contenidos bajos de betún puede resultar muy rígida, elevado índice de rigidez a tracción y rotura frágil. Pero aumentando el contenido de betún, 5,5%, podemos conseguir mezclas menos rígidas y, sobre todo, dúctiles y tenaces, con índice de tenacidad de 200 y deformación de rotura de 0,57 mm.

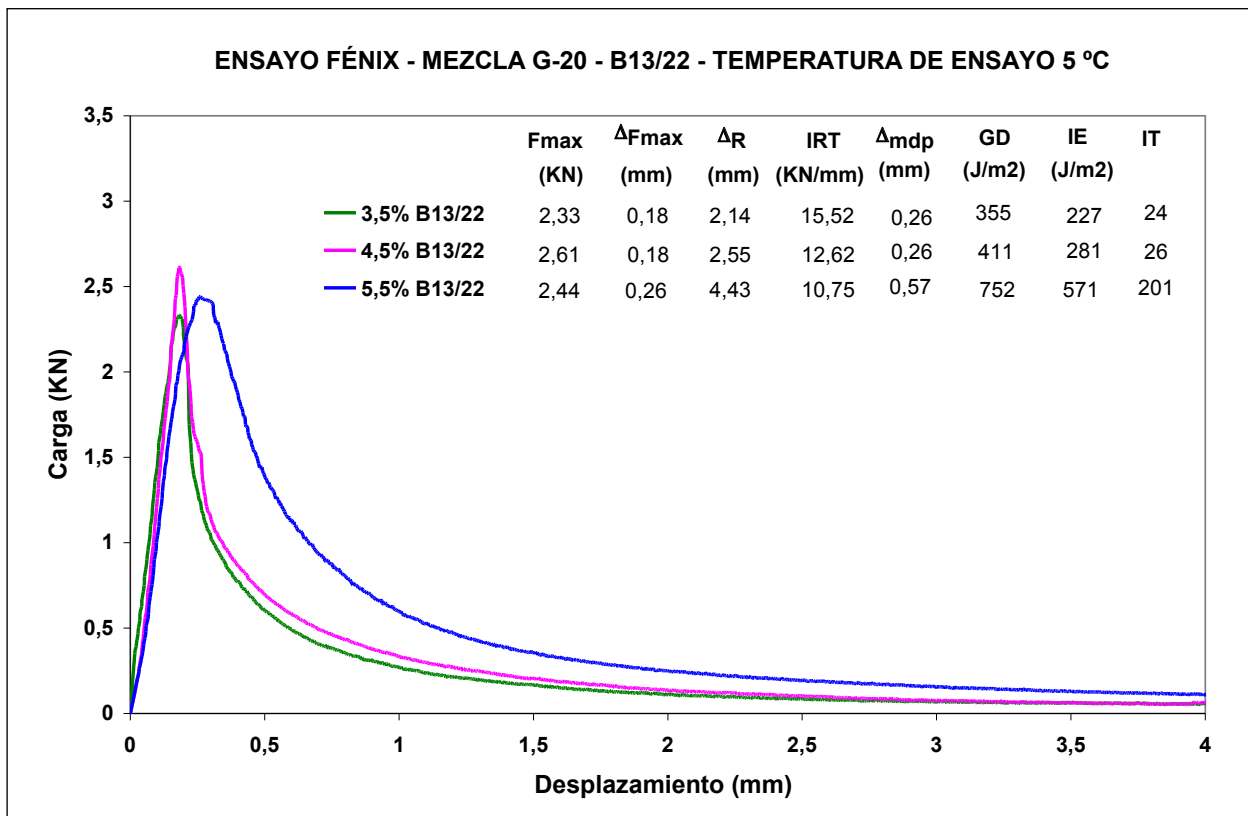


Figura 8. Curvas carga-desplazamiento del ensayo Fénix para una mezcla con diferentes contenidos de betún.

APLICACIÓN DEL ENSAYO FÉNIX AL DISEÑO DE MEZCLAS BITUMINOSAS AC. CRITERIO DE DISEÑO

En la aplicación de un ensayo al diseño de una mezcla bituminosa hemos de conocer los valores que toma ese ensayo cuando lo aplicamos a la caracterización de un tipo de mezcla bituminosa y qué resultados se pueden considerar buenos y adecuados para su uso y cuáles indican que una mezcla no va a presentar una buena respuesta y ha de ser rechazada. Con el fin de establecer unas especificaciones para el uso de este ensayo en la dosificación de mezclas bituminosas tipo AC del artículo 542 del PG-3 se han analizado los resul-

tados de la aplicación de este ensayo a una serie de mezclas de granulometría densa, semidensa y gruesa, fabricadas con betunes de penetración B 60/70 y 40/50.

En concreto se trata de 19 mezclas que fueron empleadas en la fabricación de diferentes tramos de ensayo durante la ejecución del proyecto Fénix, a los que se aplicó el ensayo Fénix sobre probetas fabricadas a 120 y 155°C. Estas probetas fueron fabricadas en principio para analizar el efecto de la temperatura de compactación sobre las propiedades mecánicas de la mezcla, pero sus resultados son analizados aquí con el fin de establecer unas especificaciones de diseño.

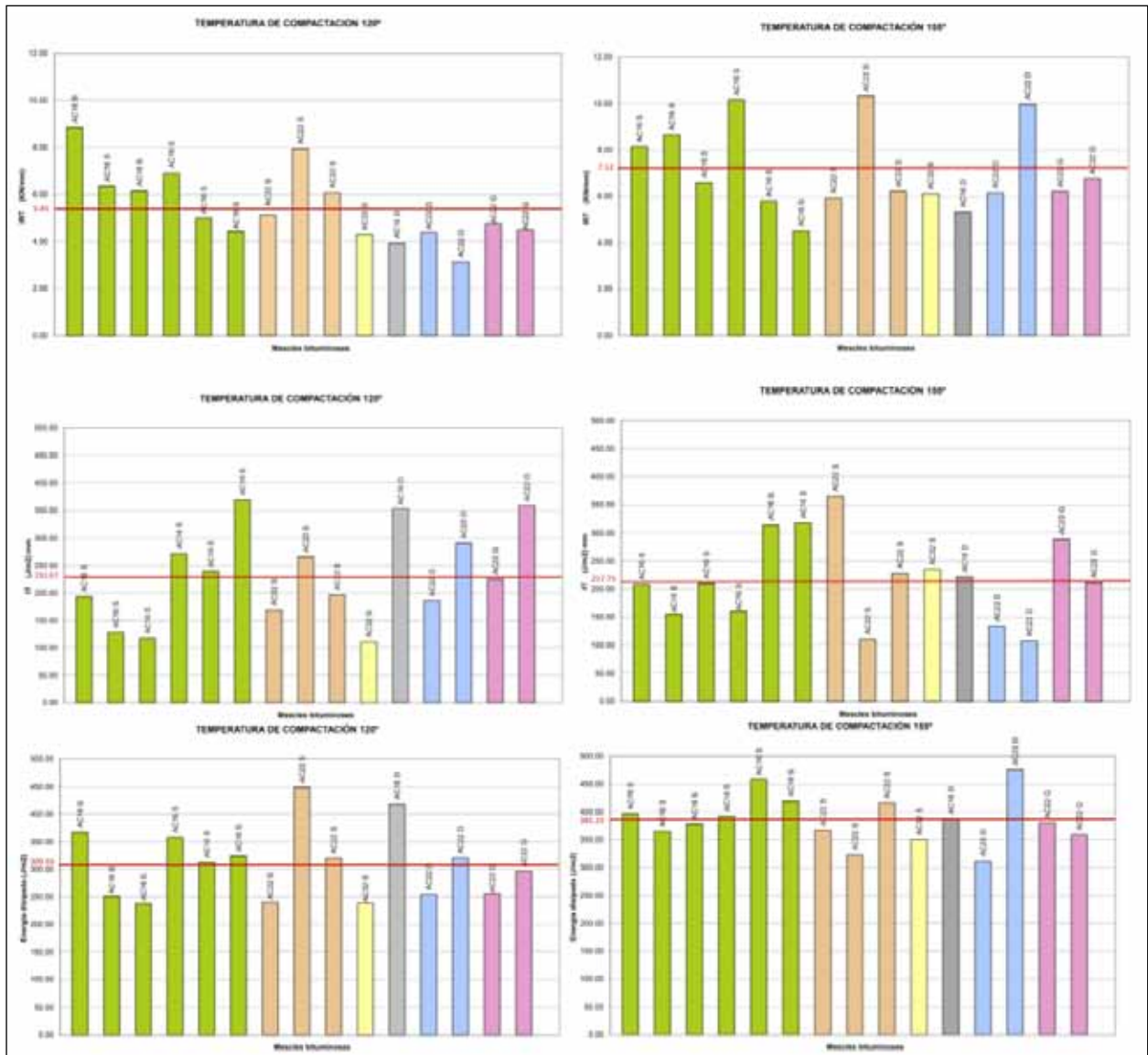


Figura 9. Índice de rigidez a tracción, índice de tenacidad y energía disipada del ensayo Fénix. Temperaturas 120 y 155°C, betún 60/70.

En el análisis de estas mezclas, se han separado sus resultados en función del tipo de betún usado y de la temperatura de compactación. En la figura 9 se han recogido los resultados de los tres parámetros evaluados (IRT, IT y G_D) para las 15 mezclas ensayadas con betún 60/70, teniendo en cuenta la temperatura de compactación, 120 y 155°C. Al comparar estos resultados se observa que el aumentar la temperatura de compactación supone un aumento de la rigidez de la mezcla, el valor medio del IRT pasa de 5,45 kN/mm a 7,12 kN/mm [5]. También aumenta la energía disipada de 309,58 a 385,23 J/mm². Sin embargo, el índice de ductilidad disminuye lige-

ramente. La misma tendencia se observa en las mezclas fabricadas con betún B 40/50, figura 10.

En esta figura puede también observarse cómo el aumento de la temperatura de compactación tiene un efecto prácticamente siempre positivo sobre el índice de rigidez de la mezcla, aumenta el módulo de rigidez de todas las mezclas ensayadas y en algunos casos, de forma muy notable. Sin embargo, no se observa el mismo efecto sobre la energía disipada y sobre el índice de compacidad. Al aumentar la temperatura de compactación hay mezclas que aumentan su energía disipada y su índice de tenacidad y hay otros casos en que la mezcla se vuelve

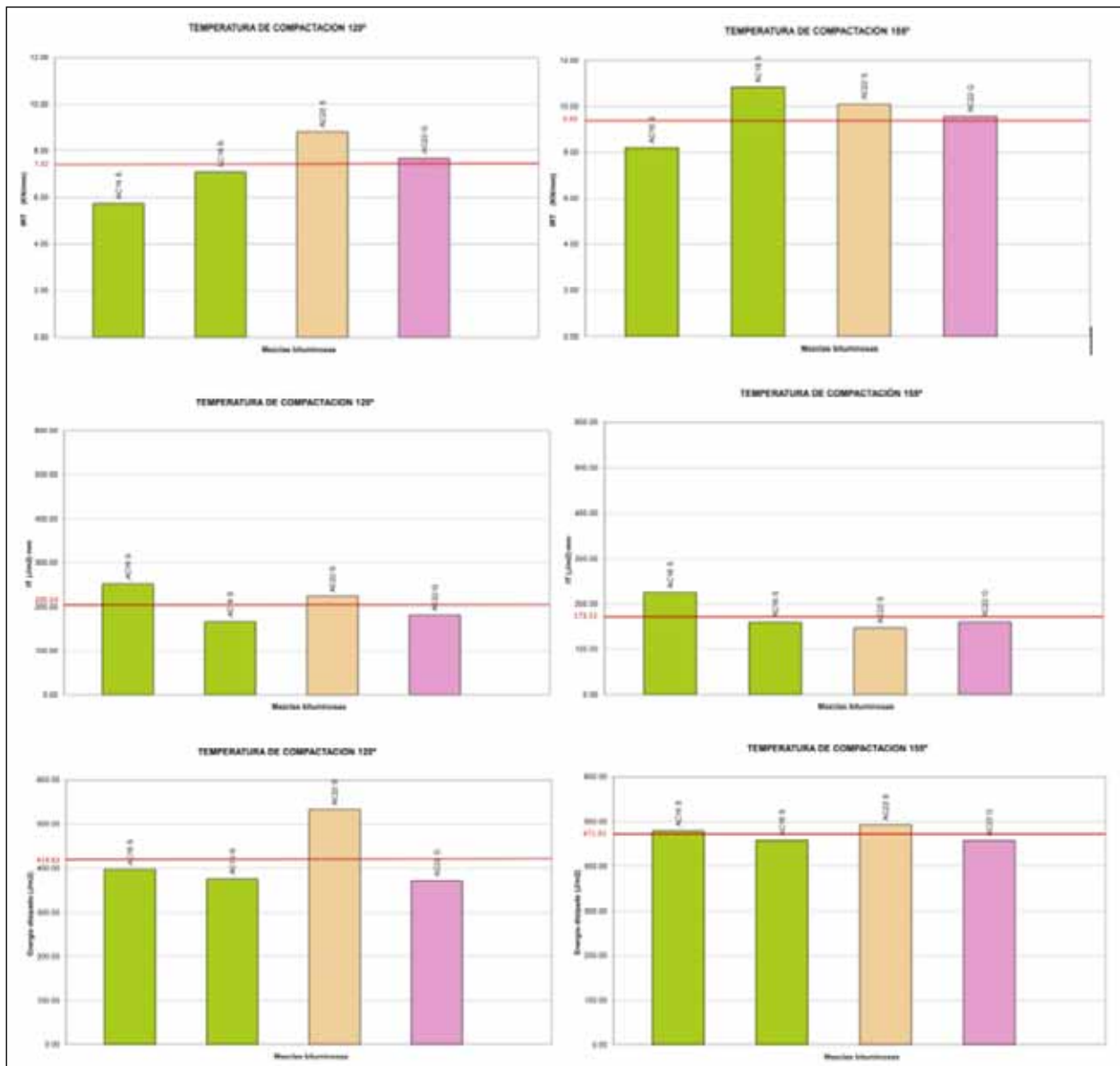


Figura 10. Índice de rigidez a tracción, índice de tenacidad y energía disipada del ensayo Fénix. Temperaturas 120 y 155°C, betún 40/50.

más frágil y menos tenaz. Esto hace que la energía disipada varíe muy poco de media y que el índice de tenacidad medio incluso descienda.

También se ha representado en la figura 11a la relación del índice de rigidez a tracción con la energía disipada G_D . Se observa que en el caso del betún B60/70, la energía tiende a aumentar ligeramente con el índice de rigidez a tracción. Mientras que con el betún más duro, B 40/50, se observa una caída de la energía disipada con el índice de rigidez. Es decir que al aumentar con el betún más duro la rigidez de la mezcla se puede llegar a obtener mezclas más frágiles.

Al relacionar el índice de tenacidad con el índice de rigidez, figura 11b, se observa una fuerte caída de este a medida que aumenta la rigidez de la mezcla, tanto para el betún B60/70 como para el B 40/50. También se observa que existe una gran diferencia entre mezclas de similares rigedeces, respecto a su

índice de tenacidad. Podemos tener mezclas con un módulo de rigidez de 6 kN/mm e índices de tenacidad entre 120 y 360 (J/m²).mm. Es precisamente esta diferencia de respuesta puesta de manifiesto en este ensayo, la que hemos de considerar a la hora de establecer unos criterios de diseño. Con un mismo módulo de rigidez podemos tener mezclas rígidas y frágiles o mezclas dúctiles y tenaces. Deberíamos usar mezclas de este último tipo para mejorar la respuesta del pavimento frente a los mecanismos de fisuración.

Teniendo en cuenta estos resultados, se han establecido unos criterios de diseño de las mezclas AC, basados fundamentalmente en esta propiedad, proponiendo al mismo tiempo mezclas con un mínimo IRT y energía disipada. Puesto que, en principio, tener un elevado índice de rigidez o una elevada energía disipada será beneficioso para la mezcla, siempre que ésta mantenga un índice de tenacidad mínimo.

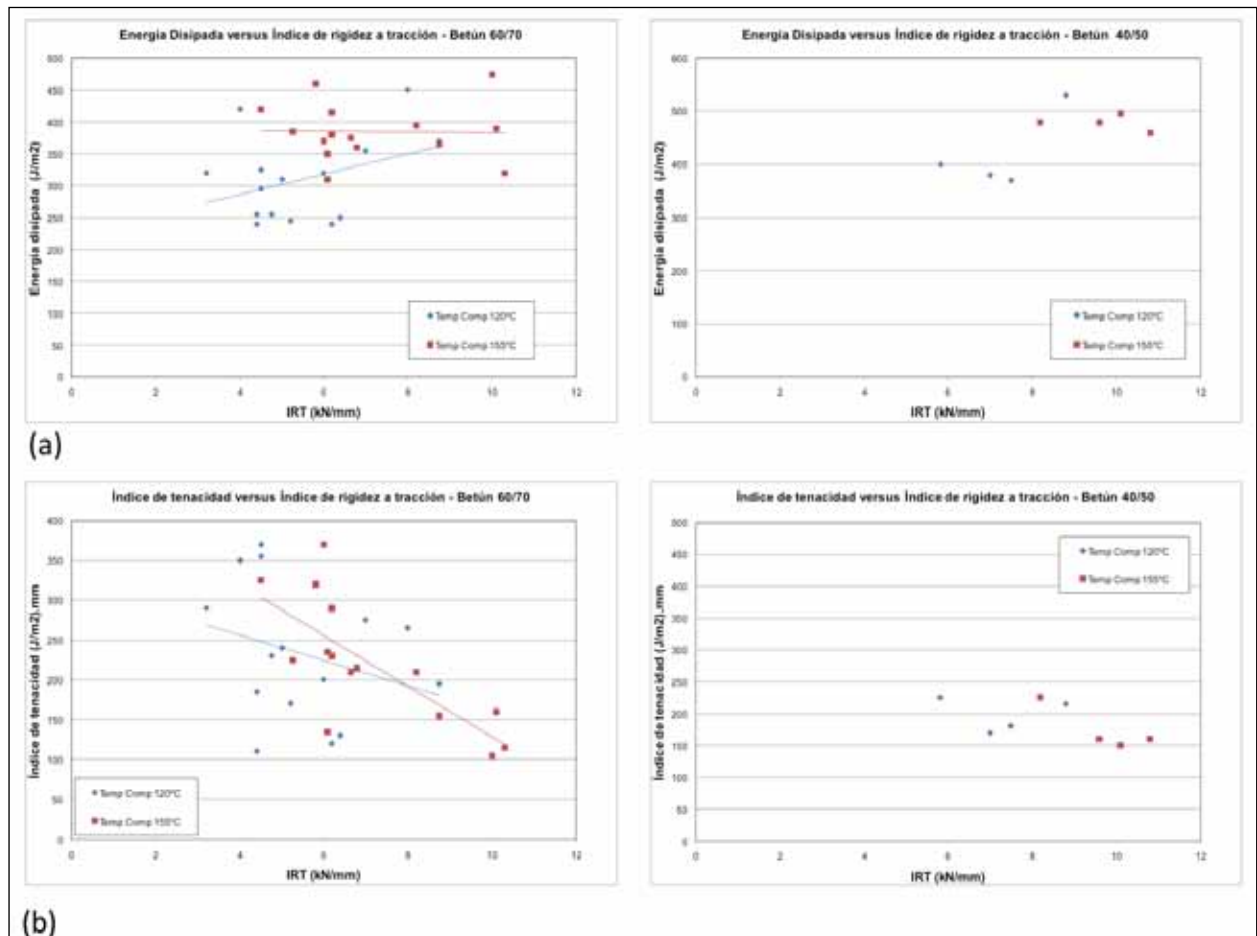


Figura 11. (a) Relación entre el índice de rigidez a tracción y la energía disipada. (b) Relación entre el índice de tenacidad y el índice de rigidez a tracción.

Tabla 2. Criterios de diseño propuestos para las mezclas AC.

		Penetración betún	
		60/70	40/50
Huecos (%)		> 4	> 4
IRT (kN/mm)		> 2,5	> 3,0
G _D (J/m ²)		>200	>300
IT (J/m ²).mm	Admisible	> 75	> 50
	Recomendable	> 150	> 100
	Mezclas dúctiles	>200	>175
D _{0,5PM} (mm)	Admisible	> 0,4	> 0,4
	Recomendable	> 0,8	> 0,6
	Mezclas dúctiles	>1,0	> 0,8

En resumen, tenemos un método de diseño basado en las características volumétricas de la mezcla y en los parámetros obtenidos en el ensayo Fénix a 20°C, que nos permite evaluar las mezclas desde el punto de vista de su compacidad e indirectamente sobre su estabilidad y resistencia a las deformaciones plásticas y de forma más directa, mediante el ensayo Fénix, sobre su tenacidad y resistencia a la fisuración. Podemos tener en cuenta al mismo tiempo el porcentaje de huecos, el módulo de la mezcla, su energía disipada y su índice de tenacidad. Esto nos ayudará a seleccionar mezclas tenaces y resistentes a la fisuración, incluso con módulos elevados.

CONCLUSIONES

El ensayo Fénix permite evaluar la tenacidad y energía disipada en la fractura de las mezclas bituminosas. Es un ensayo sencillo y flexible que permite detectar el efecto que la composición y la naturaleza de los componentes de la mezcla tienen en su comportamiento, en especial sobre su módulo de rigidez, su energía disipada y su tenacidad. Por ello se ha tomado como base para el diseño de un nue-

vo procedimiento de dosificación en que se unen los parámetros volumétricos de la mezcla y su resistencia a la fisuración.

Se incluye para las mezclas tipo AC del PG-3 las especificaciones y criterios de diseño que se han de tener en cuenta para conseguir mezclas dúctiles y resistentes a la fisuración. En esta propuesta se tiene en cuenta la dureza y penetración del betún pero, en principio, es válida tanto para betunes de penetración como modificados.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas de Superpave. Asphalt Institute, Federal Highway Administration, 1996.
- [2] Influencia de los betunes en las deformaciones plásticas de las mezclas bituminosas. Monografía CEDEX, ISBN 84-7790-378-6, Madrid, 2002.
- [3] Valdés Vidal, Gonzalo. Evaluación del proceso de fisuración en las mezclas bituminosas mediante el desarrollo de un nuevo ensayo experimental: ensayo Fénix. Tesis doctoral Universitat Politècnica de Catalunya-BarcelonaTech, 2012.
- [4] Proyecto Fénix, Publicaciones, <http://www.proyectofenix.es>, acceso 28 de abril de 2014.
- [5] Muñoz Oliver, Marina. Aplicación del ensayo Fénix para el diseño de mezclas bituminosas resistentes a la fisuración. Tesis de Máster de Ingeniería Civil, Universitat Politècnica de Catalunya-BarcelonaTech, 2013.