

# Diseño de mezclas asfálticas a partir de la determinación de su resistencia a la fisuración y energía de fractura mediante el Ensayo Fénix

Félix Pérez, edmundoperez@upc.edu  
Rodrigo Miró, r.miro@upc.edu  
Adriana Martínez, adriana.martinez@upc.edu

Ramón Botella, ramon.botella@upc.edu  
Universidad Politécnica de Cataluña-BarcelonaTech

El diseño de las mezclas asfálticas tipo Asphalt Concrete se ha basado fundamentalmente en el ensayo Marshall; asegurar la resistencia a las deformaciones plásticas de la mezcla es un parámetro que siempre hay que tener en cuenta en su diseño. Pero hay otras propiedades también muy importantes que habría que considerar, como su resistencia a la fisuración y su energía de fractura. El tipo y contenido ligante son los que proporcionan a la mezcla su flexibilidad, ductilidad y resistencia a la fisuración; propiedades todas ellas muy importantes que sin embargo no se tienen en cuenta en el diseño.

En este artículo se analizan varios ensayos para determinar el efecto del tipo y contenido de betún sobre la resistencia y energía de fractura de una mezcla bituminosa tipo hormigón bituminoso. Los ensayos usados han sido: Marshall, tracción indirecta, módulo resiliente y Fénix.

El ensayo Fénix es un nuevo ensayo a tracción directa, implementado por el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, que permite determinar la energía de fractura de la mezcla y valorar su respuesta dúctil o frágil mediante un índice de tenacidad. Se incluyen, por último, los criterios a tener en cuenta en el uso de este nuevo ensayo para el diseño de mezclas bituminosas tipo Asphalt Concrete.

**Palabras clave:** Diseño de mezclas asfálticas, resistencia a la fisuración, energía de fractura, ensayo Fénix

The design of Asphalt Concrete type asphalt mixtures is mainly based on the Marshall test; ensure resistance to plastic deformation of the mixture is a parameter that must always be looked at on their design. But there are other very important properties that should be considered, as its cracking resistance and fracture energy. Type and binder content provide flexibility to the mixture, ductility and resistance to cracking; all of them very important properties. However they are not taken into account in the design. This paper discusses several tests in order to determine the effect of the type and content of bitumen on the strength and fracture energy of asphalt mix bituminous concrete type. The used tests were: Marshall, indirect tensile strength, resilient and Phoenix module. The Phoenix test is a new test to direct drive implemented by the Roads Laboratory of the Polytechnic University of Catalonia, which allows to determine the fracture energy mix and assess its ductile or brittle response by an index of toughness. They include, finally, the criteria to be considered in using this new assay for the design of asphalt mixtures Asphalt Concrete type.

**Keywords:** Design of asphalt mixes, cracking resistance, fracture energy, ensayo Fénix

# Diseño de mezclas asfálticas a partir de la determinación de su resistencia a la fisuración y energía de fractura mediante el Ensayo Fénix

## 1. Introducción

En el diseño y dosificación de las mezclas asfálticas deben considerarse diferentes propiedades; así como en un hormigón hidráulico prácticamente sólo se analiza su módulo y resistencia, en el caso de las mezclas asfálticas deben considerarse, además de su módulo y resistencia mecánica, su resistencia a la deformación y a la fisuración, así como su resistencia a la disgregación o a la acción del agua. Además, estas propiedades varían con la temperatura de ensayo. Por lo tanto, para poder considerar todas estas propiedades en el diseño de las mezclas, se tiene que recurrir a una amplia gama de ensayos, a partir de los que se estudia la variación de las propiedades de la mezcla en función de la temperatura y del 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, que se considera fundamental para esa mezcla en función de su ubicación y uso. Se fija la granulometría y el tipo de ligante, y se estudia la variación de esa propiedad con el contenido de betún; posteriormente, se evalúan las otras propiedades de la mezcla para la fórmula y dosificación seleccionada. El ensayo elegido como base del método de dosificación tiene una gran incidencia tanto en la calidad del procedimiento, como sobre las características de la mezcla diseñada, pues de alguna manera se está dando prioridad a las propiedades o características de la mezcla que este ensayo evalúa.

Así, el método Marshall, el método de diseño hasta hace poco tiempo empleado en España, se basaba 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, además de una deformación máxima de la mezcla, una deformación mínima 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 mez-

cla 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.

A partir del año 2008, tras la normalización europea, el ensayo Marshall ha dejado de utilizarse, por lo que el diseño de las mezclas tipo Asphalt Concrete (densas, semidensas y gruesas) ha tenido que establecerse a partir de otros ensayos: además de los parámetros volumétricos, se introduce la aplicación del ensayo de tracción indirecta, dirigido fundamentalmente al estudio de la sensibilidad al agua de la mezcla, al comparar las resistencias antes y después de mantener las probetas sumergidas en agua [1]. De nuevo, el procedimiento de diseño no tiene en cuenta cómo el tipo y porcentaje de betún pueden afectar a propiedades mecánicas de la mezcla tan importantes como el módulo y la resistencia a la fisuración.

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 [2, 3, 4]. Este ensayo ya ha sido propuesto por los autores como ensayo complementario en el procedimiento de diseño de las mezclas tipo Asphalt Concrete, habiéndose establecido unos criterios de diseño, que fueron presentados en el marco de la IX Jornada Nacional Asefma 2014 [5].

El objetivo de este trabajo es corroborar la validez de estos criterios de diseño, analizando el efecto de diferentes tipos y contenidos de betún sobre los distintos parámetros obtenidos a partir del ensayo Fénix, comparando los resultados con los obtenidos a partir de los ensayos Marshall, tracción indirecta y módulo.

## 2. Ensayo Fénix. Propiedades evaluadas y criterios de diseño propuestos

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 con-

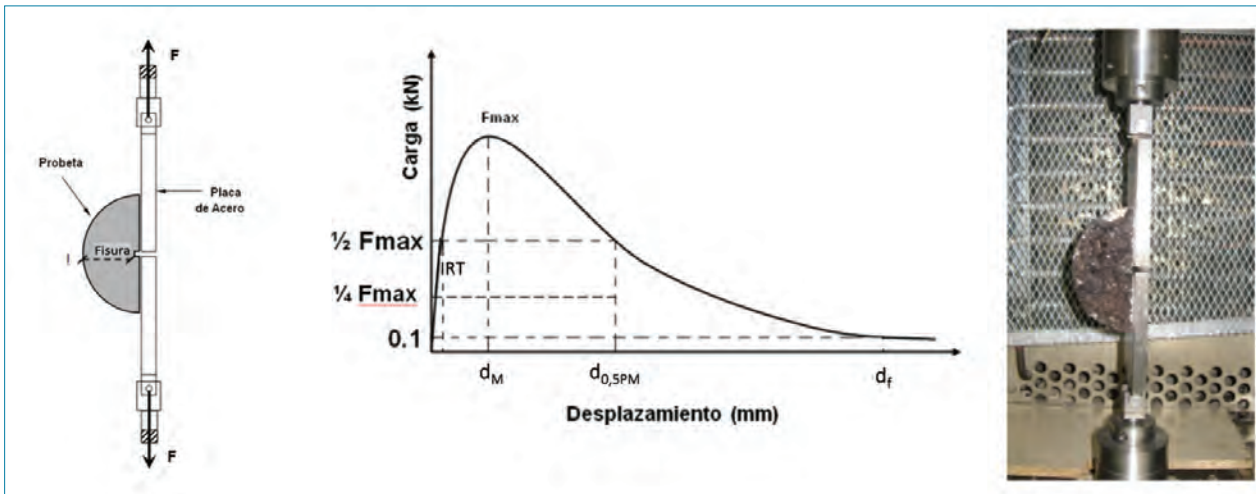


Figura 1. Esquema del ensayo Fénix y curva carga-desplazamiento obtenida.

siste 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 de desplazamiento constante del pistón de 1 mm/min. Durante el ensayo se registra el esfuerzo aplicado en función del desplazamiento. La probeta presenta una pequeña ranura entre las dos placas para inducir el inicio de la fisuración de la probeta.

Al analizar la curva carga-desplazamiento resultante del ensayo, se pueden definir distintos parámetros relacionados 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 carga-desplazamiento entre el 25 y el 50% de la carga máxima. Este parámetro se relaciona muy bien con el módulo dinámico de la mezcla.

$$IRT = \frac{F_{50} - F_{25}}{d_{50} - d_{25}} \quad (1)$$

donde

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

F<sub>50</sub>: 50% de la carga máxima, en kN

F<sub>25</sub>: 25% de la carga máxima, en kN

d<sub>50</sub>: desplazamiento en el 50% de la carga máxima, en mm

d<sub>25</sub>: desplazamiento en el 25% de la carga máxima, en mm

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

$$T_{\max} = F_{\max} S \quad (2)$$

donde

T<sub>max</sub>: tensión máxima, en MPa

F<sub>max</sub>: carga máxima, en kN

S: superficie de fractura, en m<sup>2</sup>

Relacionada también con la cohesión de la mezcla está la energía empleada por la máquina para la fisuración total de la probeta, energía de fractura. Esta energía se corresponde con la integral del área bajo la curva de carga-desplazamiento, dividida por la superficie de fractura. Cuanto mayor es la energía de fractura, G<sub>D</sub>, 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.

$$G_D = \int_0^{d_f} F(x) \cdot dx \cdot S \quad (3)$$

donde,

G<sub>D</sub>: energía de fractura, en J/m<sup>2</sup>

F: fuerza en función de la desplazamiento, en N

# Diseño de mezclas asfálticas a partir de la determinación de su resistencia a la fisuración y energía de fractura mediante el Ensayo Fénix

x: desplazamiento, en m

S: superficie de fractura, en m<sup>2</sup>

df: desplazamiento 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 sólo se necesita una alta energía de fractura, 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.

$$IT = d_M \int F(x).dx \cdot S \cdot (d_{0.5PM} - d_M) \quad (4)$$

donde

IT: índice de tenacidad, en (J/m<sup>2</sup>).mm

F: fuerza aplicada en función del desplazamiento, en N

S: superficie de fractura, en m<sup>2</sup>

d<sub>M</sub>: desplazamiento correspondiente a la F<sub>max</sub>, en m

d<sub>0.5PM</sub>: desplazamiento en la parte descendente correspondiente al 0.5 de la F<sub>max</sub>, en mm

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

A partir del estudio de diferentes mezclas densas, semidensas y gruesas, se han establecido unos criterios de diseño para las mezclas AC, Tabla 1, basados fundamentalmente en la tenacidad de la mezcla, evaluada a partir del IT y de la d<sub>0.5PM</sub>, proponiendo al mismo tiempo un mínimo para el IRT y la energía de fractura G<sub>D</sub>, ya que, en principio, tener un elevado índice de rigidez o una elevada energía de fractura será beneficioso para la mezcla, siempre que ésta mantenga un índice de tenacidad mínimo.

En resumen, se propone un método de diseño basado en las características volumétricas de la mezcla y en los paráme-

Tabla 1. Criterios de diseño propuestos para las mezclas AC (Pérez-Jiménez, F. et al., 2014 [5]).

Huecos (%)		> 4
IRT (kN/mm)		> 2.5
GD (J/m <sup>2</sup> )		> 200
IT (J/m <sup>2</sup> ).mm	Admisible	> 75
	Recomendable	> 150
	Mezclas dúctiles	> 200
d <sub>0.5PM</sub> (mm)	Admisible	> 0.4
	Recomendable	> 0.8
	Mezclas dúctiles	> 1.0

tros obtenidos en el ensayo Fénix a 20°C, que 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.

Estos criterios pretenden garantizar la resistencia a la deformación de la mezcla, asegurando un mínimo porcentaje de huecos y rigidez, así como una energía, tenacidad y deformación de rotura mínimas, para asegurar la resistencia a la fisuración. Esto permitirá seleccionar mezclas tenaces y resistentes a la fisuración, incluso con módulos elevados.

### 3. Validación de los criterios de diseño. Efecto del tipo y contenido de betún

A continuación se presentan los resultados obtenidos con el ensayo Fénix sobre una mezcla semidensa tipo AC16S (Orden FOM/2523/2014, Ministerio de Fomento [1]), con granulometría centrada en huso, Tabla 2, fabricada con árido calizo, y tres diferentes betunes: un betún de penetración 50/70, un betún mejorado con caucho (BC 50/70) y un betún de baja penetración o betún de alto módulo (15/25). Las características básicas de los betunes se recogen en la Tabla 3.

Las probetas se han fabricado con diferentes contenidos de betún (3, 4, 5 y 6% sobre peso de mezcla) en el compactador giratorio, utilizando 100 giros, con una presión de 0.6 MPa y un ángulo interno de 0.82°. Se ha utilizado una temperatura de compactación específica para cada betún, de acuerdo a sus características: entre 150 y 155°C para el 50/70, entre 155 y 160°C para el BC 50/70, y entre 160 y

Tabla 2. Granulometría de la mezcla AC16S.

Tamiz (mm)	22	16	8	4	2	0.5	0.25	0.063
% Pasa	100	95	67.5	42.5	31	16	11	5

Tabla 3. Características de los betunes utilizados.

Betún	Unidad	Norma	B 50/70	BC 50/70	B 15/25
Penetración a 25°C	0.1 mm	UNE EN 1426	65	61	20
Punto de reblandecimiento A&B	°C	UNE EN 1427	50.2	53.6	66.5
IP		NLT-181	-0.49	0.2	0.26
Recuperación elástica	%	NLT-329	-	28	-

165°C para el 15/25. El ensayo se ha realizado a una temperatura de 20°C.

Como el contenido de huecos tiende a disminuir al aumentar el contenido de betún, el porcentaje mínimo exigido condiciona, para cualquiera de los betunes utilizados, el contenido máximo de betún que puede utilizarse, Figura 2.

En cuanto a los parámetros Fénix se observa que las mezclas analizadas tienen, en general, suficiente rigidez y suficiente energía de fractura, especialmente la fabricada con el betún de baja penetración que presenta valores muy elevados tanto de IRT, como de  $G_D$ , Figuras 3 y 4. Sólo en el caso de utilizar betunes más deformables, el IRT podría condicionar el contenido máximo a utilizar y la  $G_D$  el contenido mínimo.

En relación a la tenacidad, atendiendo al criterio establecido para este parámetro, pueden diferenciarse claramente los comportamientos de cada mezcla, Figura 5. En principio,

todas las mezclas, para cualquier tipo y contenido de betún, cumplirían con el valor mínimo admisible. Pero si se desea obtener una mezcla dúctil, se observa que para el betún 50/70 prácticamente se conseguiría con cualquiera de los

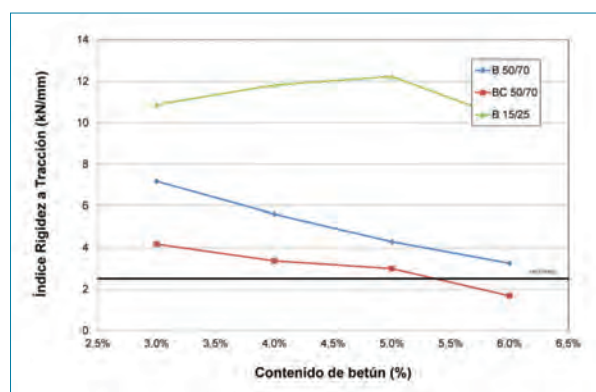


Figura 3. Variación del Índice de Rigidez a Tracción con el tipo y contenido de betún.

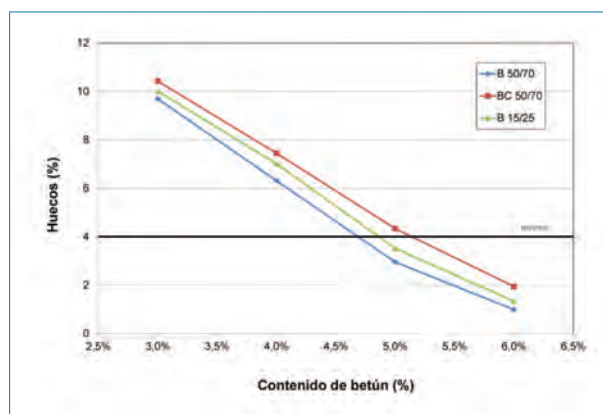


Figura 2. Variación del contenido de huecos con el tipo y contenido de betún.

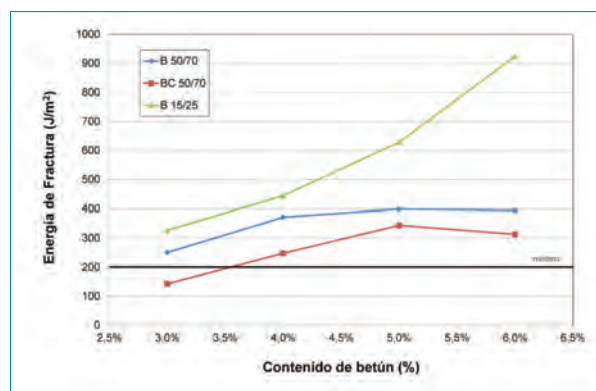


Figura 4. Variación de la Energía de Fractura con el tipo y contenido de betún.

## Diseño de mezclas asfálticas a partir de la determinación de su resistencia a la fisuración y energía de fractura mediante el Ensayo Fénix

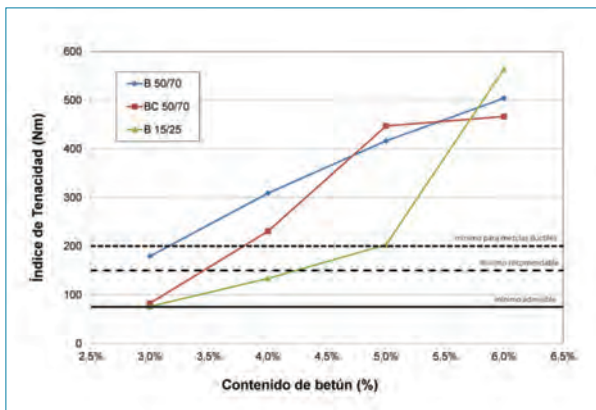


Figura 5. Variación del Índice de Tenacidad con el tipo y contenido de betún.

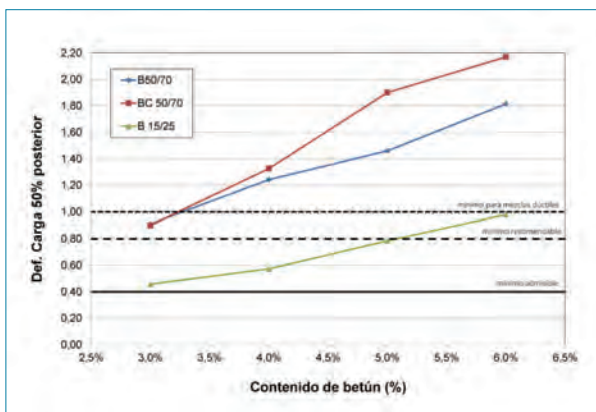


Figura 6. Variación de la Deformación al 50% de la carga post-pico con el tipo y contenido de betún

contenidos de betún utilizados; en cambio, si se utiliza el betún de baja penetración, el contenido de betún debería ser, como mínimo, del 5,0%. Es decir, con el betún convencional se obtendría una mezcla dúctil con cualquier porcentaje de betún, mientras que para un betún más duro, que rigidiza más la mezcla, el porcentaje debería ser bastante más alto.

Las tendencias observadas en la deformación de rotura al 50% de la carga máxima ponen de manifiesto, aún mejor que el IT, las diferencias entre los betunes ensayados, Figura 6. Aunque se conseguirían mezclas admisibles para cualquier contenido de cualquiera de los betunes utilizados, la figura pone claramente de manifiesto que con el betún de baja penetración sería imposible conseguir una mezcla dúctil, excepto si se utilizara un contenido de betún muy elevado, superior al 6,0%; en cambio, para los otros dos betunes, esta condición de la mezcla se podría alcanzar con un contenido de betún bastante más bajo.

En las figuras anteriores se pone claramente de manifiesto cómo los parámetros de tenacidad o de deformación de rotura condicionan el contenido mínimo de betún, especialmente si se desea obtener mezclas dúctiles, mientras que el contenido de huecos (y posiblemente en algún caso, también la rigidez) condiciona el contenido máximo de betún a utilizar.

Así, las curvas para el betún B50/70, indican que para obtener una mezcla dúctil el contenido de betún debería estar entre 3,2 y 4,7%, mientras que para el betún mejorado con caucho BC50/70, el contenido de betún debería ser ligeramente superior, entre 3,9 y 5,1%. El contenido óptimo de betún en cada caso correspondería a los valores más altos del intervalo, ya que éstos permitirían alcanzar la mayor energía de fractura posible y la mayor tenacidad de la mezcla.

En el caso del betún de baja penetración, mucho más rígido que los anteriores (la curva correspondiente al IRT es mucho más alta), sólo para el contenido del 6% la mezcla sería suficientemente dúctil, aunque para ese contenido de betún la mezcla se cerraría considerablemente. No obstante, en estas mezclas se considera admisible un menor porcentaje de huecos, ya que resisten mejor las deformaciones por rodadura a altas temperaturas.

En cambio, si para mezcla con el betún de baja penetración, en lugar de considerar las especificaciones para mezclas dúctiles (ya que claramente no se trata de una mezcla de este tipo), se consideran las especificaciones recomendables para el IT y la d0.5PM, se observa que la mezcla con un contenido de betún del 5%, cumpliría con el requerimiento de huecos, pero sería menos dúctil.

Además, el ensayo Fénix puede realizarse a distintas temperaturas, por lo que es posible tener una idea mucho más amplia del comportamiento de la mezcla, especialmente si el ensayo se realiza a bajas temperaturas, en las que el fenómeno de la fisuración puede ser más crítico.

En las Figuras 7 a 9 se presentan los resultados obtenidos para una mezcla AC16D fabricada con un betún B50/70 (5% de betún s.m.), ensayada a 20, 5, -5 y -15°C. Al disminuir la temperatura, se observa un aumento de la rigidez de la mezcla, mientras que la energía de fractura muestra un máximo en torno a los 5°C. Por su parte, la tenacidad tiende a disminuir al disminuir la temperatura, pudiéndose apreciar si esta disminución es más o menos rápida, por lo que este último parámetro, junto con los criterios establecidos, permite tener una idea de la temperatura a la que la mezcla dejará de tener una tenacidad admisible.

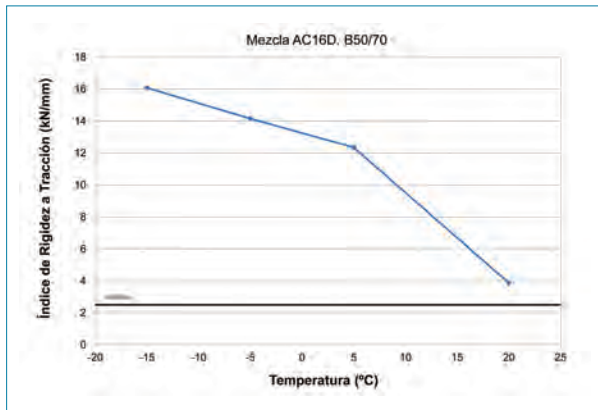


Figura 7. Variación del Índice de Rigidez a Tracción con la temperatura. B50/70.

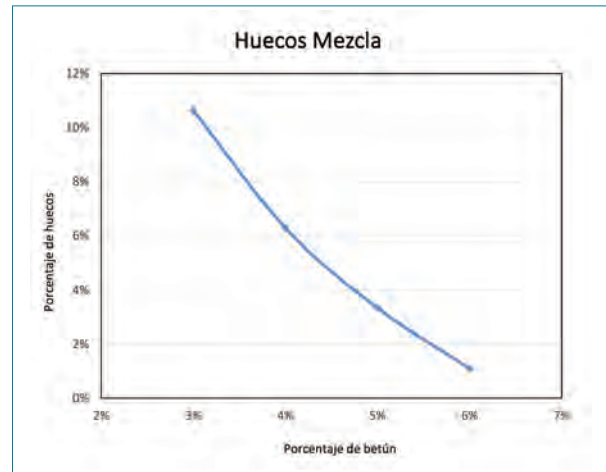


Figura 10. Variación del contenido de huecos con el contenido de betún,

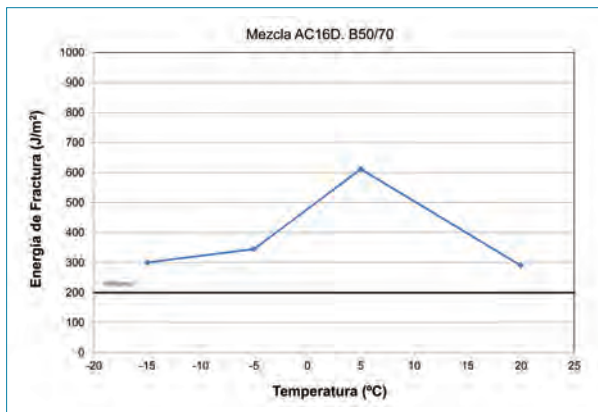


Figura 8. Variación de la Energía de Fractura con la temperatura. B50/70

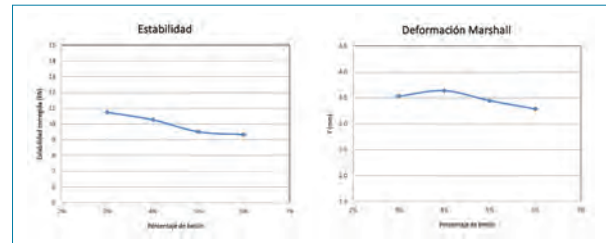


Figura 11. Variación de la estabilidad y deformación Marshall con el contenido de betún.

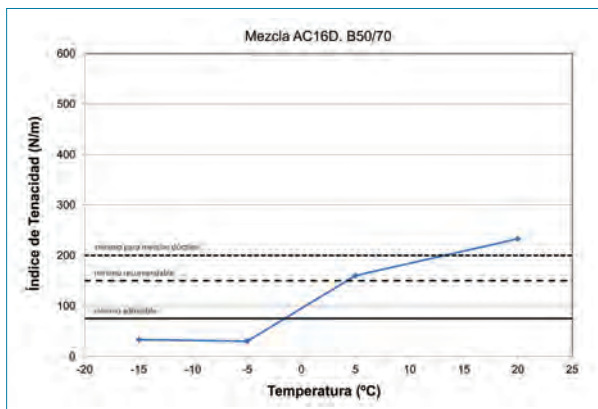


Figura 9. Variación del Índice de Tenacidad con la temperatura. B50/70.

#### 4. Comparación con otros procedimientos de diseño

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos Marshall, tracción indirecta y módulo diná-

mico, sobre la misma mezcla AC16S, fabricada en las mismas condiciones, utilizando únicamente el betún de penetración 50/70, Figuras 10 a 13.

Aunque en este caso, tanto la variación de la estabilidad como de la deformación Marshall, Figura 11, son poco sensibles a la variación del contenido de betún, puede observarse que sólo con un contenido de betún por debajo del 4% la estabilidad sería superior a los 10 kN especificados para una mezcla AC16 S destinada a tráfico ligero (Orden FOM/891/2004 [6]).

Si se representa el módulo Marshall (el cociente entre la estabilidad y la deformación Marshall) en función del contenido de betún, para los dos métodos de compactación utilizados, Figura 12, se puede obtener una primera idea de cómo varía la rigidez de la mezcla. Esta tendencia prácticamente coincide con la obtenida para el módulo de rigidez, determinado a partir de la norma UNE-EN 12697-26.

Actualmente, el ensayo de tracción indirecta se utiliza para evaluar la sensibilidad al agua de la mezcla. La Orden FOM/2523/2014 especifica que, para una mezcla AC16S, la resistencia conservada a tracción indirecta, a 15°C, debe ser

# Diseño de mezclas asfálticas a partir de la determinación de su resistencia a la fisuración y energía de fractura mediante el Ensayo Fénix

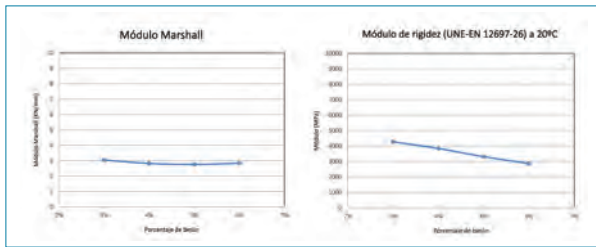


Figura 12. Variación del módulo Marshall y módulo de rigidez con el contenido de betún.

superior al 85%. En este caso la especificación se cumple sobradamente para cualquier contenido de betún, indicando que la mezcla no presenta problemas de adhesividad árido-ligante. No obstante, si se analiza la variación de los valores de resistencia con el contenido de betún, se observa que entre el 4.5 y el 5.0 % de betún, se obtienen los valores más altos, Figura 13.

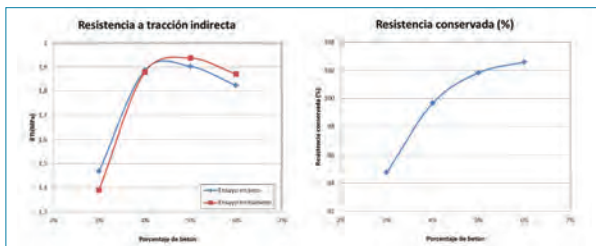


Figura 13. Variación de la resistencia a tracción indirecta (en seco y en húmedo) y de la resistencia conservada con el contenido de betún

Esto pone de manifiesto cómo los criterios relativos al ensayo Marshall priorizan la resistencia a las deformaciones plásticas de la mezcla, proporcionando contenidos óptimos de betún relativamente bajos; en cambio, cuando se incorporan criterios relativos a la resistencia a la fisuración, bien sea a partir de la resistencia a tracción indirecta o bien a partir de los parámetros del ensayo Fénix, el porcentaje óptimo de betún tiende a ser algo superior.

## 5. Conclusiones

El objetivo de este trabajo ha sido comprobar la validez de los criterios de diseño establecidos sobre los diferentes parámetros obtenidos a partir de un nuevo ensayo a tracción directa,

el ensayo Fénix. Estos criterios permiten garantizar la resistencia a la deformación de la mezcla, asegurando un mínimo porcentaje de huecos y una mínima rigidez, al mismo tiempo que exigen una energía, tenacidad y deformación de rotura mínimas, para asegurar su resistencia a la fisuración, propiedad ésta última actualmente no considerada en la etapa de diseño de las mezclas.

Para ello se ha analizado el efecto de diferentes tipos y contenidos de betún de una mezcla semidensa tipo hormigón bituminoso sobre los parámetros obtenidos a partir del ensayo Fénix. Los betunes utilizados han sido un betún de penetración 50/70, un betún mejorado con caucho (BC 50/70) y un betún de baja penetración (15/25). Los resultados obtenidos permiten validar el procedimiento propuesto para la dosificación de este tipo de mezclas, al mismo tiempo que se pone de manifiesto que los criterios establecidos serían perfectamente admisibles para las mezclas ensayadas.

Si además, el ensayo se realiza a diferentes temperaturas, es posible tener una idea mucho más amplia del comportamiento de las mezclas, especialmente si el ensayo se realiza a bajas temperaturas, en las que el fenómeno de la fisuración puede ser más crítico, pudiéndose determinar hasta qué temperatura, al ir disminuyendo ésta, las mezclas mantendrán un comportamiento suficientemente dúctil.

Al comparar los resultados con los obtenidos a partir de los ensayos Marshall, tracción indirecta y módulo, se pone de manifiesto cómo los criterios relativos al ensayo Marshall priorizan la resistencia a las deformaciones plásticas de la mezcla, proporcionando contenidos óptimos de betún relativamente bajos, mientras que cuando se incorporan criterios relativos a la resistencia a la fisuración, a partir de los parámetros del ensayo Fénix, el porcentaje óptimo de betún tiende a ser algo superior.

En cualquier caso, los resultados obtenidos han puesto de manifiesto la bondad y sensibilidad del ensayo Fénix cuando se utiliza tanto en la etapa de diseño de las mezclas, como en la caracterización de su comportamiento, especialmente en relación a una propiedad tan importante como la resistencia a la fisuración de las mezclas; por tanto, el ensayo podría ser incorporado como ensayo complementario en el procedimiento de diseño de las mezclas para evaluar esta propiedad, especialmente a bajas temperaturas, que actualmente no es evaluada de una forma directa.



## 6. Referencias

- [1] Artículo 542: mezclas bituminosas tipo hormigón bituminoso. Orden FOM/2523/2014.
- [2] F. Pérez-Jiménez, G. Valdés, R. Miró, A. Martínez y R. Botella, "Fénix. Test Development of a new test procedure for evaluating cracking resistance in bituminous mixtures", Transportation Research Record, Journal of Transportation Research Board, nº 2181, pp. 36-43, 2010.
- [3] Pérez-Jiménez, F.; Botella, R.; Martínez, A. y Miró, R. "Analysis of the mechanical behaviour of bituminous mixtures at low temperatures". Construction and building materials, Vol. 46, pp. 193-202, 2013.
- [4] Miro, R.; Martínez, A.; Pérez-Jiménez, F. y Botella, R. "Analysis of cracking resistance of bituminous mixtures using Fenix test". Construction and building materials, Vol 59, pp. 32-38, 2014.
- [5] Pérez-Jiménez, F.; Valdés, G.; Muñoz, M.; Miró, R.; Martínez, A.; Botella, R. y Amorós, J. "Criterios y especificaciones para el uso del ensayo Fénix en el diseño de mezclas bituminosas tipo AC". IX Jornada Nacional ASEFMA 2014. Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas (ASEFMA), Madrid, 2014.
- [6] Artículo 542: mezclas bituminosas en caliente. ORDEN FOM/891/2004.

#48

## AFIRMACIONES ASFÁLTICAS

**“La tecnología de espumación de betun reduce costes, al permitir mayor tasa de reutilización del RAP con menor consumo de energía y generación de emisiones” (Art. Mezclas bituminosas recicladas semicalientes con espuma de betún, número 21)**

#HECHOS\_ECONÓMICOS