

# EL ENSAYO FÉNIX: UNA METODOLOGÍA EFECTIVA PARA EVALUAR LA RESISTENCIA A LA FISURACIÓN EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

Hugo Bianchetto <sup>\*1</sup>, Félix Pérez-Jiménez <sup>2</sup>, Josep Amorós <sup>2</sup>, Rodrigo Miró <sup>2</sup>, Adriana Martínez <sup>2</sup>, Ramón Botella <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Avellaneda (UTN-FRA), Ramón Franco 5050, 1874 Villa Domínico, Argentina

<sup>2</sup> Universitat Politècnica de Catalunya, Campus Nord, Jordi Girona 1-3, 08034 Barcelona, España

\* [hbianchetto@fra.utn.edu.ar](mailto:hbianchetto@fra.utn.edu.ar)

## RESUMEN

El Ensayo Fénix es un procedimiento de laboratorio que consiste en someter media probeta cilíndrica de mezcla asfáltica a un esfuerzo de tracción directa con el objetivo de valorar la resistencia a la fisuración en mezclas asfálticas, brindando la posibilidad de considerar variables como tipo y composición de mezcla asfáltica, temperatura y los efectos del envejecimiento en el camino durante la vida de servicio.

Se trata de una metodología sencilla y fácil de realizar, puesto que contempla la utilización de probetas Marshall o incluso de testigos extraídos del pavimento y puede aplicarse tanto en el diseño de mezclas como en el control de ejecución de las mismas.

Se presenta en este artículo una guía sintética para facilitar la comprensión de este método. Inicialmente, se explican las técnicas de preparación de probetas y la forma de ejecutar el ensayo. Posteriormente, se detallan los diferentes parámetros que se pueden obtener del ensayo Fénix y la representación gráfica de los mismos. Finalmente, se exponen ejemplos de algunas de las aplicaciones posibles, como el diseño de mezclas de concreto asfáltico, de mezclas de granulometría discontinua (microaglomerados,

porosas), de mezclas semicalientes y de mezclas de alto módulo, además de diferentes tipologías de mezclas con la incorporación de material de reciclado (RAP).

**Palabras clave:** mezclas asfálticas, fisuración, Ensayo Fénix, procedimiento de ensayo, parámetros resistentes

## ABSTRACT

The Fénix Test is a laboratory procedure that consists of submitting a half cylindrical test specimen of asphalt mixture to a direct tensile stress with the objective of evaluating the cracking resistance of asphalt mixtures, providing the possibility of considering variables such as type and composition of asphalt mixture, temperature and the effects of aging on the road during the service life.

It is a simple and easy to perform methodology, since it includes the use of Marshall specimens or even samples extracted from the pavement and can be applied both for mixture design and quality control during the construction stage.

A synthetic guide is presented in this article to facilitate the understanding of this method.

Initially, the techniques of preparation of specimens and the way to perform the test are explained. Subsequently, the different parameters that can be obtained from the Fénix test and the graphic representation of them are detailed. Finally, examples of some of the possible applications are presented, such as the design of asphalt concrete mixtures, mixtures of

discontinuous granulometry (micro agglomerates, porous asphalt), semi-hot mixtures and of high modulus mixes, as well as different types of mixtures with the incorporation of recycled asphalt material (RAP).

**Keywords:** Asphalt mixtures, cracking, Fénix Test, test procedure, resistant parameters

## INTRODUCCIÓN

La fisuración constituye uno de las fallas más deletéreas de los pavimentos asfálticos. Se define como una fractura que se visualiza en la superficie del pavimento, ya sea en forma oblicua, transversal o paralela respecto del eje de la carretera, pudiendo localizarse en las huellas de canalización de tránsito, en el eje o cercan de los bordes del pavimento y presentando diferentes niveles de severidad.

Diseñar mezclas asfálticas resistentes a la fisuración es vital para lograr pavimentos durables, especialmente, según Miró *et al.* (2016), cuando se trata de obras localizadas en zonas donde la temperatura ambiente puede bajar, aumentando la rigidez de la mezcla.

La magnitud del daño y las causas que producen este fallo permiten definir el tipo de mantenimiento o de rehabilitación más apropiados. En sus primeros estadios, las fisuras aparecen de forma aislada, con longitudes cortas y anchos de separación pequeños; pero a medida que evolucionan por efecto de la repetición de esfuerzos (cargas o sollicitaciones térmicas), van magnificando sus dimensiones y comienzan a entramarse, hasta llegar a formar mallas cerradas de pequeños polígonos irregulares de ángulos agudos (fisuras “piel de cocodrilo”) o bien de secciones de mayor dimensión (“fisuras en bloque”).

Existen diferentes métodos de ensayo que permiten simular el origen y la propagación de las fisuras en los pavimentos asfálticos, posibilitando la evaluación de tales fenómenos ante las causas que los originan y el análisis de las variables que los condicionan (tránsito, clima, tiempo de servicio, tipo y composición de las mezclas que componen las capas bituminosas, entre otras), pero presentan el problema de su complejidad y su larga duración y, por tal motivo, esta propiedad no suele considerarse durante los procesos de diseño y de control de calidad; en efecto, la respuesta de las mezclas bituminosas a la fatiga se evalúa con ensayos cíclicos de cargas inferiores a las de rotura estática con un número muy elevado de repeticiones.

En concordancia con lo anterior y a modo de alternativa para evaluar la resistencia a fisuración de las mezclas bituminosas, se presenta el “Ensayo Fénix”, desarrollado en la Universitat Politècnica de Catalunya, España, el cual muestra una serie de ventajas técnicas y procedimentales entre las que se destacan la determinación de parámetros representativos del mecanismo de fisuración de materiales tenaces y la sencillez y la facilidad para su ejecución.

Precisamente, este trabajo propone ilustrar los conceptos generales del Ensayo Fénix, su campo de aplicación dentro de la Tecnología de las Mezclas Asfálticas, el proceso de preparación

de los especímenes (probetas o testigos) y el equipamiento necesario para la ejecución del ensayo, los datos que se logran y su procesamiento para determinar los parámetros representativos y efectuar los gráficos correspondientes, el análisis de los resultados y las conclusiones que se obtienen. Además, se presentan ejemplos de su utilización en diseño de mezclas para optimizar su resistencia a la fisuración.

## EL ENSAYO FÉNIX

### Fundamentos y propiedades que evalúa

El ensayo Fénix es un procedimiento experimental que sirve para valorar y tiene relación con ciertas propiedades de las mezclas (Pérez-Jiménez *et al.*, 2014). En esencia consiste en determinar el esfuerzo necesario para fisurar una probeta semicilíndrica aplicando un esfuerzo de tracción en su plano diametral, Figura 1. Tal sollicitación 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 desplazamiento del pistón de aplicación de carga 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 facilitar la zona de fisuración.

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

El proceso de rotura es una combinación de todas las energías liberadas durante la deformación del material y la fisuración (Li *et al.*, 2008); el Ensayo Fénix permite calcular la energía disipada durante el proceso. La evaluación de esta energía es una forma efectiva de medir la resistencia a la fisuración de mezclas de concreto asfáltico. En el ensayo se generan tensiones de tracción alrededor del área de fractura, utilizando el trabajo realizado para propagar la grieta a través del plano inducido (Pérez-Jiménez *et al.*, 2010).

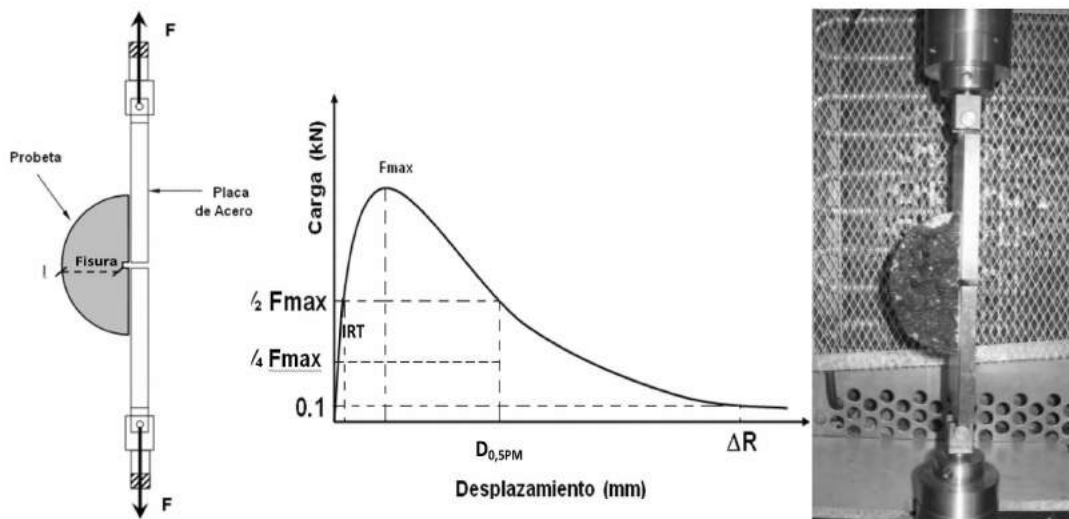


Figura 1. Esquema y fotografía del ensayo Fénix; curva carga-desplazamiento obtenida

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, cuando se aplica este ensayo y el de fatiga de tres puntos en probetas fabricadas con el mismo tipo de mezcla, tal como se ha observado en los ensayos realizados en el Laboratorio de Caminos de la Universitat Politècnica de Catalunya para el desarrollo de este procedimiento y su correlación con los ensayos de fatiga (Valdez, G., 2012), donde se verificó una relación lineal entre ambos parámetros.

$$IRT = \frac{F_{50} - F_{25}}{(d_{50} - d_{25})} = \frac{0,25 F_{max}}{(d_{50} - d_{25})} \quad (1)$$

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

$d_{50}$ : desplazamiento en el 50% de la carga máxima, en mm (también:  $d_{0,5PM}$ )

$d_{25}$ : desplazamiento en el 25% de la carga máxima, en mm ((también:  $d_{0,25PM}$ )

Los valores de IRT presentados en este estudio se han obtenido a partir de la ecuación (1). Sin embargo, actualmente el IRT se valora a partir de la expresión (2):

$$IRT = \frac{F_{50} - F_{25}}{(d_{50} - d_{25})} \cdot \frac{1}{S} = \frac{0,25 F_{max}}{(d_{50} - d_{25})} \cdot \frac{1}{S} \quad (2)$$

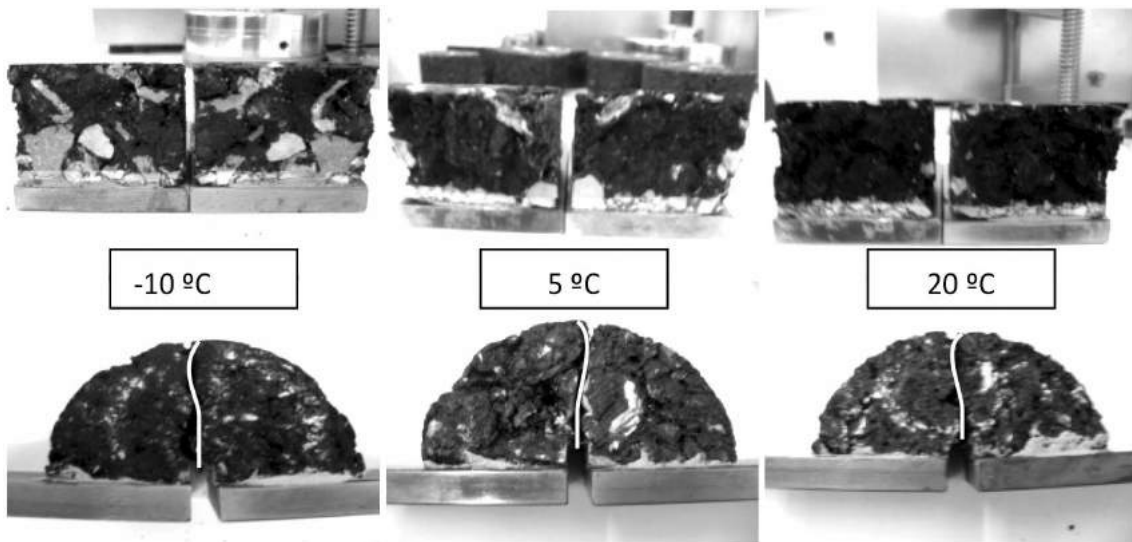
donde: S es la superficie de rotura, en m<sup>2</sup>

Por otra parte, la resistencia máxima de la curva carga-desplazamiento estaría asociada con la cohesión proporcionada por el mástico (filler+asfalto) a la mezcla; ecuación (3).

$$T_{max} = \frac{F_{max}}{S} \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

donde:  $T_{max}$ : tensión máxima, en MPa

Se observa que a temperaturas bajas, cuando la cohesión proporcionada por el ligante asfáltico es muy alta, la fisuración y el plano de fallo tienen lugar a través de las partículas pétreas, mientras que a temperaturas más altas, menor resistencia del ligante, esta fisuración tiene lugar a través del mástico que recubre las partículas, Figura 2.



**Figura 2.** Superficies de fractura para mezcla G-20 a diferentes temperaturas de ensayo

También la cohesión de la mezcla estaría relacionada con la energía empleada por la máquina para la rotura total de la probeta. Esta energía disipada  $G_D$  se correspondería con la integral del área bajo la curva de carga-desplazamiento respecto de la superficie de fractura; cuanto mayor es  $G_D$ , mayor es la resistencia a la fisuración de la mezcla; ecuación (4). 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 representa la respuesta dúctil de la mezcla bituminosa. Para el diseño de mezclas resistentes a la fisuración es importante no sólo una alta energía disipada sino, además, que ésta también se manifieste después de la carga máxima, lo cual 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.

$$G_D = \frac{\int_0^{df} F(x).dx}{S} \quad (\text{J/m}^2) \quad (4)$$

donde:

$G_D$ : energía disipada, en  $\text{J/m}^2$

$F$ : fuerza en función del desplazamiento, en N

$x$ : desplazamiento, en m

$S$ : superficie de fractura, en  $\text{m}^2$

$df$ : desplazamiento final del ensayo, en m

Con el fin de valorar la ductilidad de la mezcla, se definió un Índice de Tenacidad, que es función del área de la curva post-pico y del desplazamiento hasta reducir la carga al 50% de la máxima; ecuación (5).

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

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

Otros parámetros mecánicos de la mezcla como: carga máxima a tracción, F<sub>máx</sub>, desplazamiento a carga máxima, ΔF<sub>máx</sub>, y desplazamiento de rotura, ΔR, pueden ser determinados de la curva resultante carga – desplazamiento.

Los resultados de los estudios efectuados mostraron que el ensayo Fénix, aun siendo experimental, permite valorar la resistencia a la fisuración de la mezcla. El ensayo puede realizarse a diferentes temperaturas para evaluar la susceptibilidad térmica de mezclas bituminosas o comprobar la respuesta a bajas temperaturas.

Además, este ensayo es muy sensible a las diferentes variaciones que puede tener lugar en la composición de la mezcla, como su tipología, su contenido de ligante o el tipo de asfalto empleado. La Figura 3 ilustra esta última situación para una mezcla tipo AC semidensa fabricada con diferentes asfaltos y ensayada a una temperatura de 20 °C.

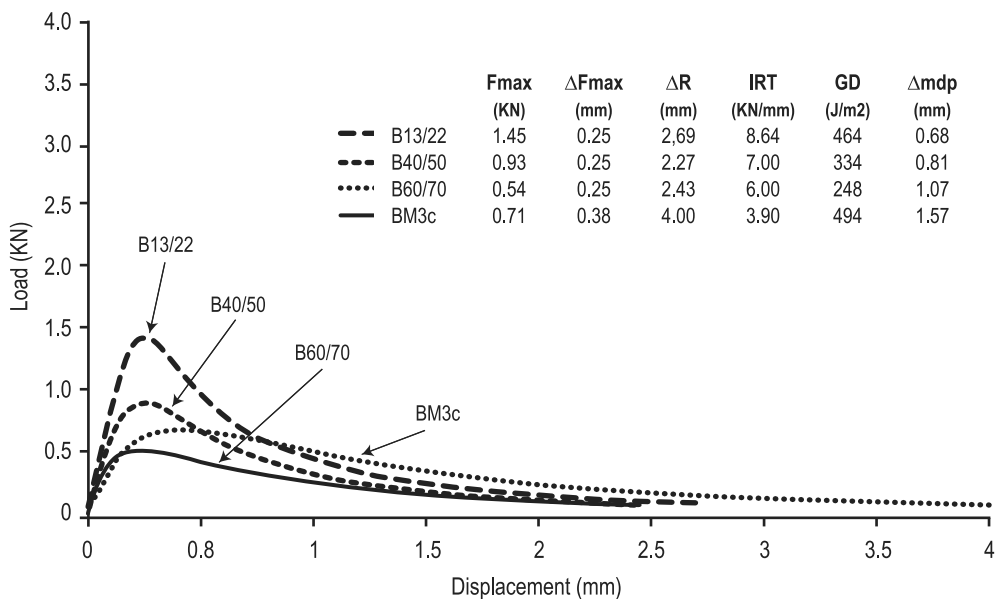


Figura 3. Curvas carga-desplazamiento para una mezcla con diferentes tipos de ligante.

Se observa en la gráfica que, con un tipo de ligante duro (B13/22), la mezcla resulta muy rígida, con elevado Índice de Rigidez a Tracción y una rotura menos dúctil; pero al usar el tipo de ligante más blando (B60/70) o modificado (BM3c), es posible conseguir mezclas menos rígidas y, sobre todo, más dúctiles y tenaces.

### Preparación de probetas o testigos para la realización del Ensayo Fénix

El procedimiento del ensayo Fénix consiste en someter media probeta cilíndrica (de 63,5 mm de altura y 101,6 mm de diámetro) fabricada mediante el procedimiento Marshall o bien mediante el compactador giratorio, o un testigo calado extraído del pavimento construido, con una fisura inducida de  $5 \pm 1$  mm de profundidad, a un esfuerzo de tracción con una velocidad de desplazamiento constante a la temperatura deseada.

#### Elementos empleados

- Sierra de corte.
- Soportes o placas metálicas de acero según las dimensiones especificadas.
- Plancha de acero refrentada.
- Pletina metálica para la separación de la ranura.
- Resina epoxi tipo mortero de dos componentes cuyas características permita una buena adherencia en metal, hormigón o asfaltos y que se pueda manipular durante al menos unos veinte minutos, es decir, que no sea de fraguado rápido.
- Espátulas.
- Placa calefactora capaz de proporcionar  $150^{\circ}$  C.

En todo momento se deben extremar las normas de seguridad correspondientes.

#### Proceso de preparación

##### 1. Corte y medición de las probetas

Una vez fabricada la probeta en laboratorio con la mezcla asfáltica en estudio o extraído y acondicionado el testigo del pavimento a evaluar (la Figura 4 muestra una probeta Marshall), se toman las dimensiones de altura (h), diámetro (d) y peso (P), para calcular la densidad por el procedimiento que determine la norma de ensayo (en Argentina, es la Norma de la Dirección Nacional de Vialidad VN-E12).

En el siguiente paso se corta por la mitad la probeta asentándola por una de las bases de forma de crear dos semicírculos (Figura 5). Para efectuar el corte, en este caso, se emplea una sierra circular refrigerada por agua con regulación de la altura del disco y carro móvil.



**Figura 4.** Probeta Marshall



**Figura 5.** Corte de la probeta por la mitad

Una vez separada en dos mitades, se le provoca una ranura transversal justo por la mitad de la cara aserrada (Figuras 6 y 7) con una profundidad de unos 5 (mm). Para ello se coloca el disco de la sierra a la altura deseada teniendo en cuenta las dimensiones de la probeta.



**Figura 6.** Entalladura de la probeta semicilíndrica



**Figura 7.** Probetas preparadas para ensayo

Se secan las probetas obtenidas (con papel absorbente) y se mide la distancia total ( $D_t$ ) de la altura del semicírculo (radio de la probeta) y la distancia de la ranura ( $D_r$ ) (Figuras 8 y 9). La diferencia entre estas dos mediciones será igual a la profundidad de la ranura.



**Figura 8.** Medición de  $D_t$



**Figura 9.** Medición de  $D_r$

## 2. Pegado sobre soportes metálicos.

Sobre una superficie plana y limpia se colocan los soportes metálicos enfrentados uno contra el otro, intercalando entre ambos la pletina que servirá de guía con la ranura de la probeta.

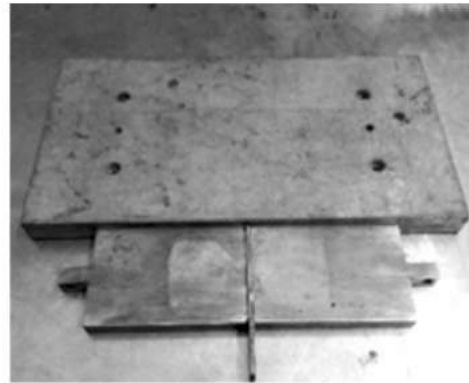
Previamente, dichos soportes deben estar completamente limpios para obtener una adherencia óptima con la resina. Para ello se procede a un lijado suave (Figura 10) sobre el plano de la placa



que apoyará la probeta y a continuación se limpian con un paño impregnado de un disolvente no aceitoso. Para asegurar que los soportes metálicos permanezcan de forma simétrica uno frente el otro sin desviaciones, se colocan de manera que hagan contacto, por uno de los lados, contra una plancha refrentada de acero (Figura 11).



**Figura 10.** Lijado superficie de apoyo de soporte



**Figura 11.** Disposición de los soportes

Se prepara la cantidad necesaria de resina epoxi mezclando manualmente con una espátula sobre un cartón desechable. Se extiende la resina (Figura 12) aplicando un espesor de 2 mm aproximadamente sobre la cara aserrada de la probeta en cantidad suficiente para que cubra toda la superficie excepto una franja de 5 mm a ambos lados de la ranura; así se evita que la resina se introduzca en la ranura al presionar la probeta contra el soporte metálico.



**Figura 12.** Preparación de resina epoxy

Se coloca la probeta centrada sobre las placas metálicas haciendo coincidir la entalla con la pletina que sirve de guía y se la presiona de forma uniforme hasta que la resina rebasa por los laterales (Figura 13). Se sujeta la parte de la pletina que sobresale y se extrae despacio, evitando de ejercer movimiento alguno a las placas metálicas y a la probeta, sosteniéndola a ésta si fuera preciso (Figura 14).



**Figura 13.** Pegado de probeta sobre soporte



**Figura 14.** Extracción de la pletina

El siguiente paso es dejar secar el tiempo necesario hasta que endurezca la resina, momento a partir del cual se puede manipular el conjunto para trasladarlo a la cámara climática. El ensayo se puede llevar a cabo a las 48 horas desde que se aplicó la resina epoxi y al menos debe permanecer 4 horas a la temperatura de ensayo antes de iniciarse.

### 3. Montaje del conjunto en la prensa de ensayo

Se coloca en la máquina de ensayo el conjunto preparado con la probeta por uno de los extremos insertando un pasador y se aproxima hasta hacer coincidir el orificio en el otro cabezal colocando también el otro pasador (Figura 15).

Durante el proceso de montaje del conjunto en la prensa, hay que evitar de transmitir cualquier tipo de tensión o compresión brusca a la probeta, donde no se deberían soportar valores por encima de los 5 kgf.

Una vez que se haya estabilizado la temperatura deseada, se inicia el ensayo sometiendo a la probeta a una tensión controlada por desplazamiento a la velocidad de 1 (mm/min) hasta llevarla a rotura (Figura 16).



**Figura 15.** Colocación de probeta para el ensayo



**Figura 16.** Ejecución del ensayo

#### 4. Recuperación de los soportes metálicos

Una vez finalizado el ensayo, se desmonta de la prensa el conjunto y se coloca sobre una plancha calefactora, aplicando una temperatura de unos 140°C durante el tiempo necesario hasta conseguir reblandecer la resina adherida entre el soporte metálico y la probeta. Con la ayuda de una espátula se separa la resina y desechamos la probeta, recuperando de nuevo los soportes para poder realizar un próximo pegado de probetas, una vez se hayan enfriado.

## INVESTIGACIONES Y APLICACIONES REALIZADAS CON EL ENSAYO FÉNIX

Desde su presentación ante la comunidad tecnológica se han desarrollado varias investigaciones con este ensayo; aquí se exhiben algunas de las más representativas.

### Diseño de mezclas bituminosas tipo “concreto asfáltico”

El Pliego de Especificaciones Técnicas PG-3 español, en su Artículo 542 (2014) define como mezcla bituminosa en caliente tipo “hormigón bituminoso” (en Argentina, “concreto asfáltico”) la combinación de un ligante hidrocarbonado, áridos (incluido el polvo mineral) con granulometría continua y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante. Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los áridos (excepto, eventualmente, el polvo mineral de aportación) y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la del ambiente.

En la Universitat Politècnica de Catalunya se han analizado los resultados de la aplicación del Ensayo Fénix a 20 °C a una serie de mezclas de granulometría densa, semidensa y gruesa, fabricadas con asfaltos convencionales de penetración (B 60/70 y B 40/50). Se trata de 19 mezclas que fueron empleadas en la fabricación de diferentes tramos de ensayo, a los que se aplicó el Ensayo Fénix sobre probetas fabricadas a 120 y 155°C, en principio para analizar el efecto de la temperatura de compactación sobre las propiedades mecánicas de la mezcla, pero sus resultados se han analizado con el fin de establecer unas especificaciones de diseño (Pérez-Jiménez *et al.*, 2014, *ibid.*, p.2).

El análisis de resultados de estas mezclas se ha separado en función del tipo de asfalto usado y de la temperatura de compactación. En la Figura 17 se recogen los resultados de uno de los parámetros evaluados (IRT; los restantes eran IT y  $G_D$ ) para las 15 mezclas ensayadas con ligante B 60/70, con temperaturas de compactación de 120°C y 155°C (Muñoz Oliver, 2013). Al comparar, se observó que el aumento de la temperatura de compactación motivó un aumento de la rigidez de la mezcla, IRT de 5,45 kN/mm a 7,12 kN/mm. También aumentó la energía disipada de 309,58 a 385,23 J/m<sup>2</sup>. Sin embargo, el índice de tenacidad IT disminuyó levemente. La misma tendencia se observó en las mezclas fabricadas con B 40/50.

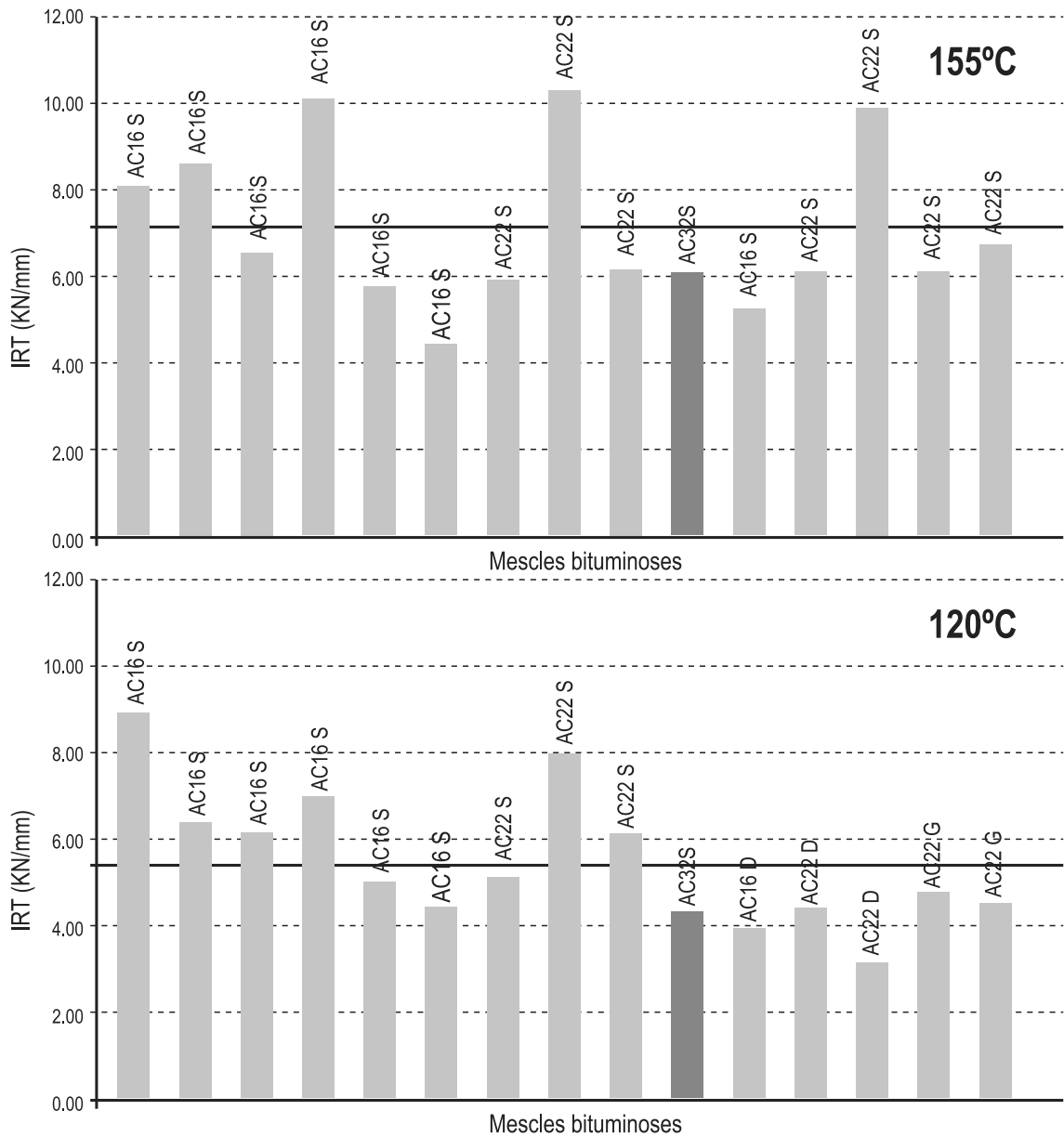


Figura 17. IRT, asfalto B 60/70, temperaturas 120°C y 155°C

Teniendo en cuenta estos y otros resultados obtenidos, se han establecido unos criterios de diseño para las mezclas de concreto asfáltico basados fundamentalmente en su respuesta frente a los mecanismos de fisuración (Tabla 1), proponiendo al mismo tiempo mezclas que aseguren umbrales mínimos de IRT y de energía disipada debido a 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.

Vacíos (%)		> 4
IRT (kN/mm)		> 2,5
$G_D$ (J/m <sup>2</sup> )		> 200
IT (J/m <sup>2</sup> ).mm	Admisible	> 75
	Recomendable	> 150
	Mezclas dúctiles	> 200
$d_{0,SPM}$ (mm)	Admisible	> 0,4
	Recomendable	> 0,8
	Mezclas dúctiles	>1,0

**Tabla 1.** Criterios de diseño para mezclas tipo concreto asfáltico, a partir del Ensayo Fénix a 20°C

### Diseño de mezcla semidensa. Efecto del tipo y el contenido de asfalto

Sobre una mezcla semidensa tipo AC16S (Orden FOM/2523/2014, Ministerio de Fomento, España) fabricada con árido calizo, se estudió la influencia del tipo y contenido de ligante en la respuesta de la mezcla en el Ensayo Fénix.

Se analizaron tres asfaltos diferentes: uno convencional o “de penetración” B50/70, un asfalto mejorado con caucho (BC50/70) y un asfalto de baja penetración o de alto módulo (B15/25). Las características básicas de los betunes se recogen en la Tabla 2. Las probetas se fabricaron con diferentes contenidos de ligante (3, 4, 5 y 6% en peso de mezcla) en el compactador giratorio (100 giros, con una presión de 0.6 MPa y un ángulo interno de 0.82°). El ensayo se realizó a una temperatura de 20°C.

Asfalto	Unidad	Norma	B50/70	BC50/70	B15/25
Penetración a 25°C	0.1 mm	UNE EN 1426	65	61	20
Punto de Ablandamiento A&B	°C	UNE EN 1427	50.2	53.6	66.5
Índice de Penetración		NLT-181	- 0.49	0.20	0.26
Recuperación elástica	%	NLT-329	-	28	-

**Tabla 2.** Características de los asfaltos utilizados

Los resultados obtenidos en relación a los parámetros Fénix se recogen en la Figura 18.

Se observa que, en general, las mezclas analizadas tienen elevada rigidez y energía disipada, especialmente la fabricada con el ligante de alto módulo que presenta valores muy altos tanto de IRT como de  $G_D$ . Sólo en el caso de utilizar ligantes más deformables, el IRT podría condicionar el contenido máximo a utilizar y la  $G_D$  el contenido mínimo. En relación a la tenacidad y de acuerdo al criterio establecido, se diferencian claramente los comportamientos; si bien en todos los casos se cumple con el valor mínimo admisible, se observa que para el asfalto 50/70 prácticamente se consigue con cualquiera de los porcentajes utilizados, pero si se utiliza el asfalto de alto módulo el contenido debería ser, como mínimo, del 5.0%. Es decir, con el asfalto convencional se obtendría una mezcla dúctil con cualquier porcentaje, mientras que para un ligante más duro, que rigidiza más la mezcla, el porcentaje debería ser bastante alto.

Las tendencias observadas en el desplazamiento de rotura al 50% de la carga máxima ponen de manifiesto, aún mejor que el IT, las diferencias entre los asfaltos ensayados. Aunque se conseguirían mezclas admisibles para cualquier contenido de todos los betunes utilizados, se pone claramente de manifiesto que con el asfalto de alto módulo sería imposible conseguir una mezcla dúctil, excepto si se utilizara un porcentaje superior al 6.0%.

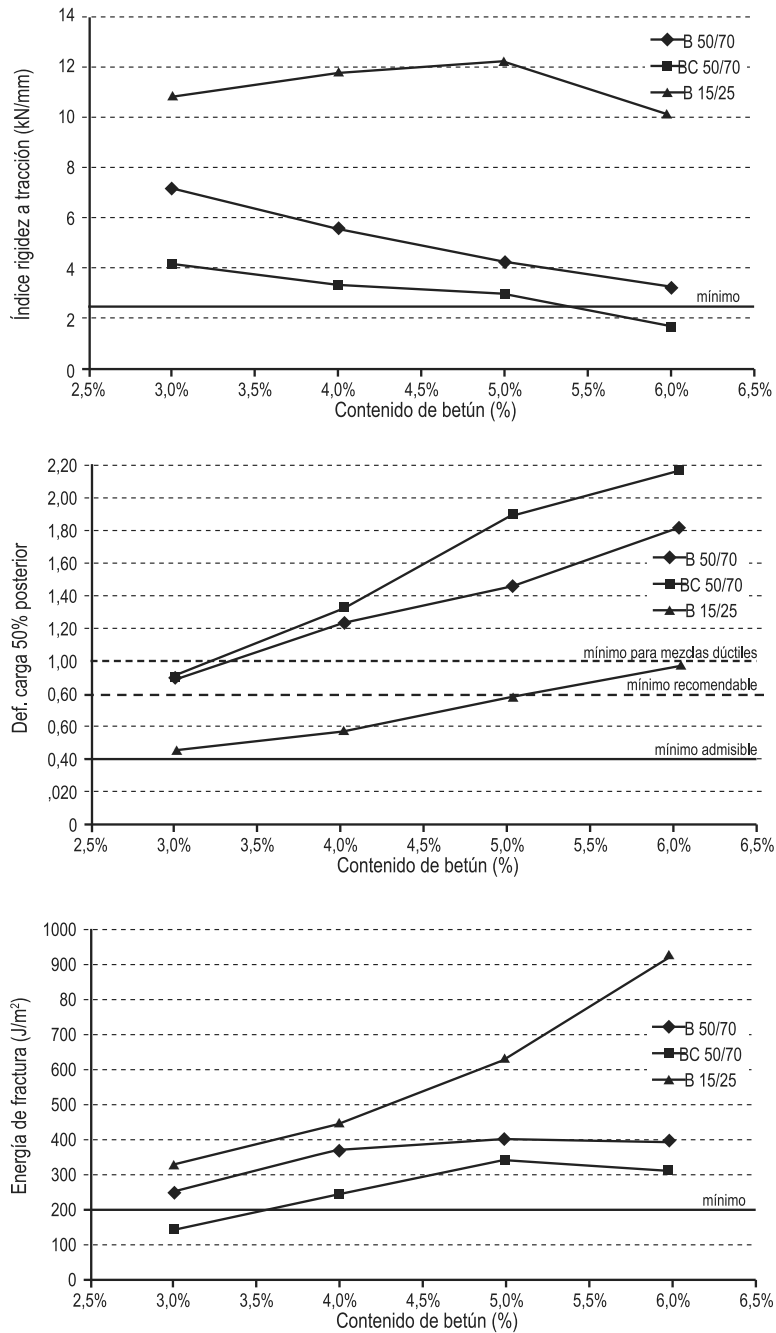


Figura 18. Variación de los parámetros Fénix con el tipo y contenido de asfalto

## Caracterización de mezclas recicladas en caliente

Se analiza si los criterios propuestos permiten poner de manifiesto la diferente calidad de una mezcla reciclada en caliente cuando se fabrica bajo diferentes condiciones.

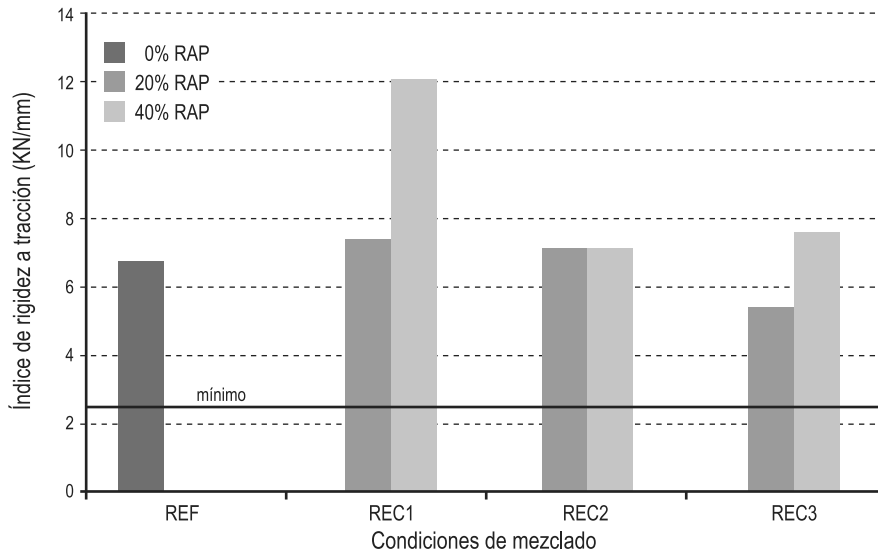
Se han considerado tres mezclas diferentes. La primera, una mezcla tipo concreto asfáltico semidensa tamaño máximo 22 mm “AC22S” (Orden FOM/2523/2014), con la granulometría que se recoge en la Tabla 3, fabricada con árido calizo nuevo y un 4.25 % de asfalto de penetración B50/70, que constituye la mezcla de referencia (sin reciclado, “REF”). Las otras dos son mezclas recicladas fabricadas, con 20% y 40% respectivamente de material procedente del fresado de mezclas envejecidas (RAP) y áridos de aportación, de forma que se obtuviera una granulometría lo más próxima posible a la de la mezcla de referencia. El RAP contenía un 3.5% de asfalto, muy envejecido (Penetración = 7); por ello, las mezclas recicladas se fabricaron con un asfalto B70/100, más blando que el utilizado con la mezcla de referencia, con porcentajes del 3.6% y del 2.9% respectivamente, para conseguir el mismo contenido de ligante total que el utilizado en la mezcla sin reciclado.

Tamiz (mm)	22	16	8	2	0.5	0.25	0.063
% Pasa	100	84	62	27	13	10	5

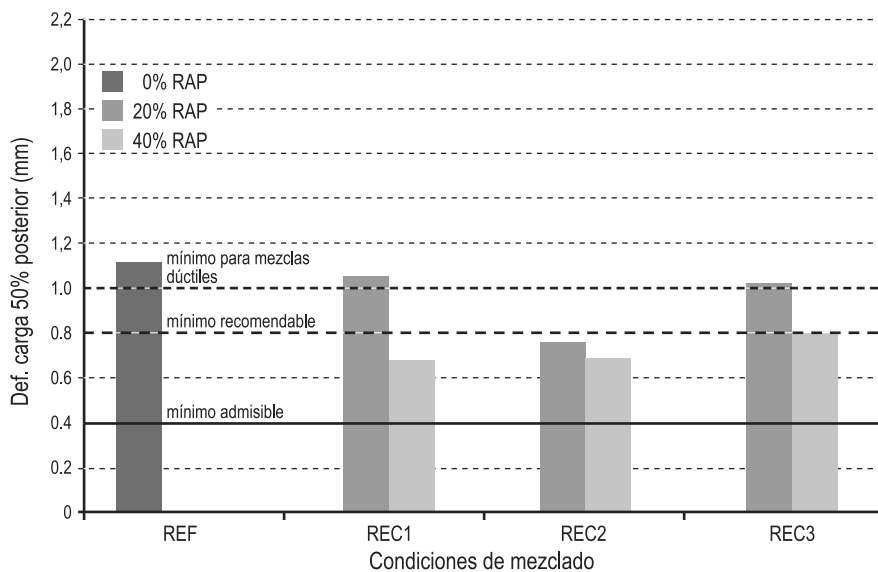
**Tabla 3.** Granulometría de la mezcla AC16S

Al fabricar las mezclas en laboratorio se han simulado las diferentes condiciones que pueden darse durante la elaboración en obra, dependiendo del tipo de planta que se utilice. En tal sentido, se ha considerado que el árido de aportación y el RAP puedan estar a temperaturas diferentes antes de su mezclado, dependiendo: si el RAP es precalentado (“REC1”, condición que se daría en plantas discontinuas con dos tambores o en plantas continuas con tambor concéntrico tipo double-barrel); si se introduce en el mezclador a temperatura ambiente sin calentamiento previo (“REC2”); e incluso si se introduce en el mezclador sin calentar pero sobrecalentando los áridos nuevos para favorecer el intercambio de calor con el RAP (“REC3”).

Los resultados obtenidos en los parámetros Fénix IRT y  $G_D$  se recogen en la Figura 19 a y b.



**Figura 19 a.** Variación de IRT, diferentes condiciones de mezclado, con 0%, 20% y 40% de RAP



**Figura 19 b.** Variación de  $d_{0,5PM}$  diferentes condiciones de mezclado, con 0%, 20% y 40% de RAP

Los parámetros del ensayo Fénix revelan un claro aumento de la rigidez de la mezcla cuando el RAP se incorpora caliente, tanto más cuanto mayor es el contenido de RAP utilizado, pero que disminuye cuando el RAP se introduce a temperatura ambiente, es decir, si las condiciones de mezclado no son adecuadas, especialmente con contenidos de RAP elevados. La energía disipada  $G_D$  (no se muestra en la Figura 19 a) se comporta de un modo parecido a la de IRT, presentando las mezclas recicladas una muy buena relación entre estos dos parámetros.



Pero sin duda, los factores que ponen mejor de manifiesto el efecto de las condiciones de mezclado son el índice de tenacidad IT y, especialmente, el desplazamiento de rotura ( $d_{0.5PM}$ ), que evalúan si la rotura de la mezcla es más o menos dúctil. En la Figura 19 b se ve la variación de éste último parámetro: la mezcla reciclada con el 20% de RAP precalentado (condición REC1), a pesar de tener un desplazamiento de rotura ligeramente inferior a la mezcla convencional no reciclada, todavía cumpliría con el criterio para mezclas dúctiles ( $d_{0.5PM} > 1$  mm), pero cuando el contenido de RAP sube hasta el 40%, la mezcla ya no es dúctil y no cumpliría el valor recomendable; en cambio, si el RAP se introduce sin precalentar (REC2), ni siquiera la mezcla con el contenido de RAP más bajo cumpliría. El sobrecalentamiento de los áridos naturales (REC3) permitiría mejorar las condiciones de mezclado y las mezclas obtenidas recuperarían el desplazamiento de rotura a valores similares a los obtenidos con las condiciones REC1.

En resumen, el ensayo Fénix resulta ser suficientemente sensible para poner de manifiesto el efecto que tiene la temperatura a la que se mezclan los componentes (áridos y RAP) durante la fabricación de las mezclas recicladas, sobre su respuesta mecánica. Cuando se precalienta el RAP, la mezcla reciclada es más rígida que la mezcla convencional y en consecuencia tiene una mayor energía disipada, pero su desplazamiento de rotura (ductilidad) disminuye, especialmente cuando el contenido de RAP es elevado. Pero si el RAP se introduce sin calentamiento previo la compactación obtenida es peor y la rigidez, tenacidad y desplazamiento de rotura disminuyen considerablemente. No obstante, el sobrecalentamiento de los áridos naturales para compensar la baja temperatura inicial del RAP, permitiría recuperar parcialmente estas últimas propiedades.

### **Caracterización de mezclas recicladas templadas**

Se evaluó el comportamiento de distintas mezclas recicladas templadas, que se fabricaron con diferentes porcentajes (70 y 100%) de RAP procedente del fresado de una mezcla tipo AC, que tenía un porcentaje de asfalto del 4.46% respecto de la masa de áridos. Se utilizaron distintas emulsiones (aproximadamente 60% de residuo asfáltico), fabricadas a partir de diferentes asfaltos (duro, blando, modificado), y una aditivada.

El aporte de emulsión a la mezcla se estableció para obtener un contenido alto de asfalto final en la mezcla, de más del 6.0% sobre áridos.

Las mezclas se fabricaron a una temperatura de 100°C y fueron compactadas a 80°C. Las mezclas con el 100% de RAP se compactaron en el compactador giratorio utilizando 65 giros, una presión de 0.6 MPa y un ángulo de 0.82°. En cambio, las mezclas fabricadas con el 70% de RAP fueron compactadas con 135 giros.

El ensayo se realizó a diferentes temperaturas, 20°C, 5°C, -5°C y -15°C. Los resultados obtenidos fueron comparados con los obtenidos sobre una mezcla convencional en caliente, tipo AC16S, fabricada a partir de un betún B50/70.

En la Figura 20 se recogen los resultados de IRT y de Energía Disipada  $G_D$ , los que reflejan el excelente comportamiento de este tipo de mezclas. Al disminuir la temperatura, se produce un aumento de la rigidez para cualquiera de las mezclas, mientras que la energía disipada muestra un máximo en torno a los 5°C para todas las mezclas, siendo el comportamiento de las mezclas recicladas templadas muy similar al de la mezcla en caliente.

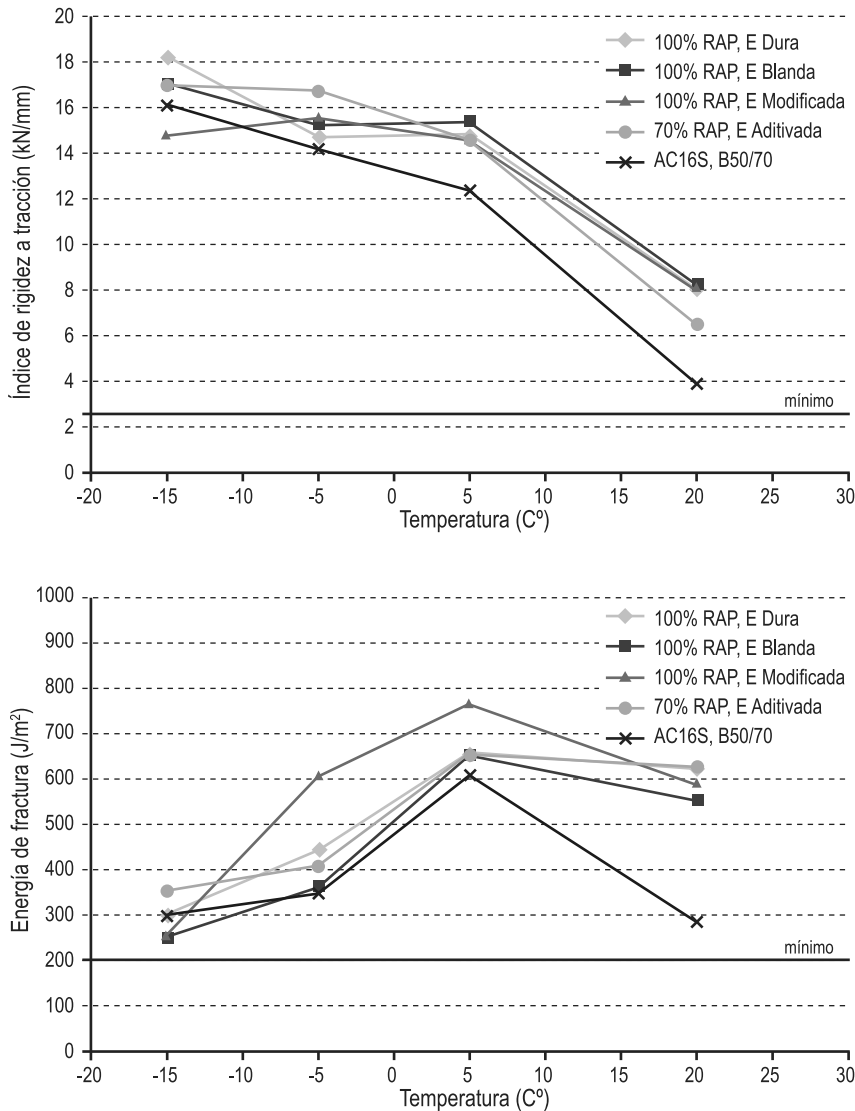


Figura 20. Variación de parámetros Fénix con la temperatura. Mezclas recicladas templadas

### Otras investigaciones en base al Ensayo Fénix efectuadas y en ejecución

Se han realizado otros estudios y evaluaciones a partir del ensayo Fénix, de sus parámetros y sus criterios de análisis.

Además de las investigaciones mencionadas referidas a mezclas con RAP, se realizaron otras experiencias (Valdés *et al.*, 2011) con mezclas semidensas con elevado porcentaje de material reciclado, específicamente 40% y 60%. Los resultados revelaron que es posible incorporar altos porcentajes de RAP mediante la propia caracterización del material de reciclado con muestras de acopio del mismo; que estas mezclas ofrecen un comportamiento similar al de las mezclas de alto módulo, en particular en los parámetros que identifican al Ensayo Fénix y su *performance* a fatiga; y que comparadas con mezclas convencionales con asfalto 60/70, tienen un desempeño superior en cuanto a resistencia a fatiga.

También se evaluaron mezclas de alto módulo con variados porcentajes de RAP (Miró *et al.*, 2011). Se llegó a la conclusión que es factible diseñar mezclas de alto módulo con proporciones importantes de RAP, hasta del 50% si se dispone de plantas asfálticas cuyas instalaciones permitan precalentar el material reciclado; en caso contrario, con plantas convencionales, el porcentaje quedaría limitado al 30% como máximo.

Actualmente se está desarrollando un trabajo interinstitucional internacional entre la Universitat Politècnica de Catalunya y la Facultad Regional Avellaneda de la Universidad Tecnológica Nacional acerca del efecto de la adición del filleres comerciales activos (cal y carbonato cálcico, en diferentes proporciones) sobre la resistencia al envejecimiento del mástico bituminoso de las mezclas asfálticas, mediante el análisis con Ensayo Fénix a 5 y 20°C. Tales experiencias continúan una línea de investigación de larga data que comenzó con la Tesis Doctoral de Bianchetto (2005) y con otros estudios contemporáneos a la misma (Miró *et al.*, 2005), además de experiencias posteriores en la temática (Bianchetto, 2016) que significaron nada menos que la exigencia de la Dirección Nacional de Vialidad de incorporar cal en las mezclas asfálticas de tipo superior respetando un valor mínimo del 1% en peso de la mezcla y un máximo determinado por el Ensayo de Concentración Crítica (Ruiz, 1947; Ruiz, 1960). Actualmente se están procesando los parámetros logrados a fin de su próxima divulgación.

## CONCLUSIONES

En todos los casos estudiados, 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, actualmente no evaluada de forma directa.

Para que las mezclas posean un adecuado comportamiento, es necesario que cumplan con determinados valores de los parámetros que se obtienen del Ensayo Fénix ( $IRT$ ,  $IT$ ,  $G_D$ ,  $d_{0.5PM}$ ).

Como método de evaluación, el Ensayo Fénix demuestra además una gran versatilidad, pues permite analizar el efecto de gran cantidad de variables y estudiar el desempeño de mezclas de diversa tipología.

Finalmente, debe destacarse la sencillez y la facilidad de implementación de esta metodología, toda vez que contempla la utilización de probetas Marshall o incluso de testigos extraídos del pavimento y puede aplicarse tanto para la formulación de mezclas como para predecir o evaluar los deterioros de pavimentos existentes

## REFERENCIAS

MIRÓ, R., PÉREZ-JIMÉNEZ, F., MARTÍNEZ, A., BOTELLA, R. "Criterios de diseño para diferentes tipos de mezclas bituminosas basados en el Ensayo Fénix". XI Jornada Nacional de ASEFMA, Madrid, España, 2016.

PÉREZ-JIMÉNEZ, F., VALDÉS, G., MUÑOZ, M., MIRÓ, R., MARTÍNEZ, A., BOTELLA, R., AMORÓS PARRAS, J. "Criterios y especificaciones para el uso del Ensayo Fénix en el diseño de mezclas bituminosas tipo AC". IX Jornada Nacional de ASEFMA, Madrid, España, 2014.

VALDÉS VIDAL, G. "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.

LI, X., BRAHAM, A., MARASTEANU, M., BUTTLAR, W., WILLIAMS, R. "Effect of Factors Affecting Fracture Energy of Asphalt Concrete at Low Temperature". Road Materials and Pavement Design, Vol. 9, pp. 397-416, 2008.

PÉREZ-JIMÉNEZ, F., VALDÉS VIDAL, G., MIRÓ RECASENS, R., MARTÍNEZ REGUERO, A., BOTELLA NIETO, R. "Fénix Test Development of a New Test Procedure for Evaluating Cracking Resistance in Bituminous Mixtures". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Issue Number: 2181, Transportation Research Board, ISSN: 0361-1981, Washington D.C., EEUU, 2010.

Pliego de Especificaciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), Ministerio de Fomento, Madrid, España. Art. 542, última actualización 2014.

VALDÉS, G., PÉREZ-JIMÉNEZ, F., MIRÓ, R., MARTÍNEZ, A., BOTELLA, R. "Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP)". Construction and Building Materials 25, 1289-1297, Ed. Elsevier, 2011.

MUÑOZ OLIVER, M. "Aplicación del ensayo Fénix para el diseño de mezclas bituminosas resistentes a la fisuración". Tesis de Máster de Ing. Civil, Universitat Politècnica de Catalunya-BarcelonaTech, 2013.

MIRÓ R., VALDÉS, G., MARTÍNEZ, A., SEGURA, P., RODRIGUEZ, C. "Evaluation of high modulus mixture behaviour with high reclaimed asphalt pavement (RAP) percentages for sustainable road construction". Construction and Building Materials 25, 3854-3862, Ed. Elsevier, 2011.

BIANCHETTO, H. "Criterios de diseño de mezclas bituminosas para pavimentos tendientes a optimizar su resistencia al envejecimiento. Influencia del tipo de ligante y del relleno mineral". Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, 2005.

MIRÓ, R.; MARTÍNEZ, A.; PÉREZ JIMÉNEZ, F., BIANCHETTO, H. "Effect of Filler on Aging Potential of Asphalt Mixture". Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board. Issue Number 1901, Transportation Research Board ISSN: 0361-1981, Washington D.C., EE.UU., 2005.

BIANCHETTO, H. "Especificaciones técnicas sobre la incorporación de cal en las mezclas asfálticas para capas superiores: análisis crítico y propuesta". XVII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito y XXXVIII Reunión del Asfalto, Córdoba, Argentina, octubre de 2016.

RUIZ, C. "Sobre las propiedades mecánicas del sistema filler-betún". Segunda Reunión Anual de la CPA, Argentina, pp. 25-52, 1947.

RUIZ, C. "Concentración crítica de filler, su origen y significado en la dosificación de mezclas abiertas". Dirección de Vialidad Provincia de Buenos Aires, Argentina, Publicación N°11, 1960.