

IAG260-01-2013
ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A FISURACIÓN DE MEZCLAS
BITUMINOSAS FABRICADAS CON POLVO DE NEUMÁTICO FUERA DE
USO
ESTUDO DO COMPORTAMENTO CONTRA FISSURAS DE MISTURAS
ASFÁLTICAS FEITAS COM BORRACHA DE PNEUS FORA DE USO

Fernando Moreno-Navarro; M^a Carmen Rubio-Gámez
LabIC.UGR, Universidad de Granada
Granada, España
fmoreno@ugr.es; mcrubio@ugr.es

Esther Tomás-Fortún; Fernando Valor-Hernández
Ciesm-Intevía
Madrid, España
esther.tomas@ciesm-intevia.es; fernando.valor@ciesm-intevia.es

Antonio Ramírez-Rodríguez
Sacyr
Madrid, España
aramirez@sacyr.com

Antonio Pérez-Lepe
Repsol
Madrid, España
aperezlepe@repsol.com

Resumen

El empleo de betunes modificados con polvo de neumático usado en la fabricación de mezclas bituminosas es una de las técnicas que mayor auge está teniendo en los últimos años en la ingeniería de carreteras. Dadas sus grandes ventajas económicas y ambientales, este tipo de ligantes pretende sustituir a los betunes modificados con polímeros utilizados habitualmente hasta la fecha. La aparición de fisuras debido a fenómenos de fatiga es una de las patologías más comunes en los firmes de carretera de todo el mundo. Debido a las mejoras de las propiedades mecánicas del betún aportadas tras la incorporación de polvo de neumático, las mezclas fabricadas con estos ligantes se postulan como una solución efectiva a dicho problema. En este artículo se lleva a cabo un análisis comparativo del comportamiento a fisuración por fatiga realizado sobre dos tipos de mezclas bituminosas comúnmente empleadas como soluciones anti-fisuras (Arena-Betún y SMA), fabricadas con betunes modificados con polvo de neumático y con polímeros. Para ello, se evalúa la propagación del daño a fisuración sufrido por cada material, a partir del estudio de su respuesta mecánica a flexo-tracción en 4 puntos, en el que además se emplea un dispositivo de toma de imágenes con sensor óptico de deformaciones. En base a los resultados obtenidos, podemos decir que la adición de PNFU por vía seca puede incrementar la

resistencia a la propagación de fisuras en mezclas bituminosas, no obstante es necesario adaptar su contenido al esqueleto mineral utilizado. Por su parte, las mezclas tipo SMA presentan una mayor resistencia al fenómeno de propagación de macro-grietas que las mezclas arena-betún. Finalmente, podemos decir que el betún modificado con polímeros es un ligante más efectivo que el betún de alta viscosidad con caucho para combatir fenómenos de fisuración en mezclas bituminosas.

Resumo

A utilização de fragmentos de borracha modificada de betumes utilizado no fabrico de misturas de betume é uma das técnicas que está a ter um maior aumento nos últimos anos em engenharia de auto-estrada. Dadas as suas grandes benefícios económicos e ambientais, este tipo de ligação se destina a substituir polímero betumes modificados utilizados até à data. O aparecimento de fissuras devido a fenómenos de fadiga é uma das doenças mais comuns em pavimentos rodoviários em todo o mundo. Devido às melhorias nas propriedades mecânicas do betume fornecidas após a incorporação de borracha fragmentada, misturas feitas com estes ligantes são sugeridos como uma solução eficaz para o problema. Este artigo realiza uma análise comparativa do comportamento de trincas por fadiga realizada em dois tipos de misturas asfálticas utilizadas como soluções anti-crack (Sand-Betume e SMA), feitas de betume modificado com borracha de pneus e de polímeros. Para este efeito, avalia a propagação de fendas de danos sofridos por cada material, a partir de um estudo da sua resposta à tracção mecânica à flexão em quatro pontos, que também utiliza um dispositivo de deformação com o sensor de imagem óptica. Com base nos resultados obtidos, pode-se dizer que, adicionando PNFU seco pode aumentar a resistência à propagação de fissuras em misturas de asfalto, no entanto o seu teor deve ser adaptado ao esqueleto mineral utilizado. Enquanto isso, as misturas de SMA são mais resistentes ao fenómeno de propagação de macro-fendas misturas de betume-areia. Finalmente, podemos dizer que o betume modificado com polímeros ligante é mais eficaz do que asfalto de alta viscosidade com borracha para combater fenómenos de craqueamento de misturas betuminosas.

INTRODUCCIÓN

El estudio del comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas sigue siendo uno de los principales retos en el ámbito de la ingeniería de pavimentación. Esta patología, presente en firmes de todo el mundo, aunque en principio no impide la rodadura, a largo plazo termina provocando el fallo estructural del firme (Colombier, 1997). Por tanto, resulta necesario continuar estudiando el proceso de aparición y propagación de fisuras, de manera que se mejore la respuesta mecánica de este tipo de materiales.

En este sentido, desde esta investigación se ha contribuido con la puesta a punto de un prototipo de ensayo que permite optimizar el análisis de la fase de propagación. Para ello se ha utilizado un ensayo de flexo-tracción en 4 puntos, provisto de un sensor óptico de control de deformaciones y un sistema de grabación de imágenes. Dado que el estudio de las fases de micro y meso-fisuración de la fisura resulta muy complicado (por su aleatoriedad y dispersión tridimensional ; Florence, 2005), el ensayo utilizado se centra comportamiento del material durante la fase de propagación de la macro-fisura.

Por otra parte, dado que el empleo de polvo de neumáticos fuera de uso (PNFU) en la fabricación de mezclas bituminosas contribuye directamente con una mejora en su comportamiento mecánico ante procesos de fatiga y deformación (principales causantes de la aparición de fisuras) (Ruiz, 2010), y debido a las numerosas ventajas ambientales que presenta su, se ha decidido evaluar la influencia de la adición de este residuo en la respuesta a fisuración de mezclas bituminosas.

De esta forma, a partir del dispositivo de ensayo anteriormente comentado, desde esta investigación se ha llevado a cabo un estudio centrado en analizar el proceso de propagación de macro-fisuras en diferentes tipos de mezclas, fabricadas con diferentes ligantes (betún modificado con polímeros SBS y betún modificado con PNFU por vía húmeda), y con la adición de PNFU por vía seca. Para el análisis de los resultados se han combinado los datos obtenidos de las imágenes y los sensores de movimiento, con los valores de tensión y deformación registrados. Así, se ha llevado a cabo una correlación entre las imágenes obtenidas durante el proceso de propagación de la macro-fisura, y la energía disipada durante el ensayo. Este artículo muestra los principales logros de dicho trabajo de investigación.

METODOLOGÍA

Materiales

Durante el desarrollo de este estudio se analizaron dos de los tipos de mezclas más comunes utilizados como solución anti-fisuras en firmes de carretera, una arena-betún y una SMA (Stone Mastic Asphalt) (Cedex, 1992; Drüschner e Schäfer, 2005). Durante la fabricación de ambos tipos de mezcla, se emplearon áridos de la misma naturaleza tanto para la fracción fina como para la gruesa (caliza), y como filler se utilizó cemento. Por su parte, en cada uno de los tipos de mezclas se analizó el efecto de los dos tipos de ligantes a estudiar, uno modificado con polímeros (BM3b) y otro de alta viscosidad modificado con polvo de neumático por vía húmeda (BMAVC), así como de polvo de neumático adicionado por vía seca al 2% sobre el peso total de la mezcla. Las características de estos materiales vienen recogidas en las Tablas 1, 2 y 3.

Tabla 1: Características de los áridos utilizados en el estudio

Ensayo	Resultado
Índice de lajas (%)(UNE-EN 933-3)	2
Resistencia a la fragmentación (UNE-EN1097-2)	20
Caras de fractura (%)(UNE-EN 933-5)	100
Coeficiente de limpieza (Annex C, UNE 146130)	0,01
Equivalente de arena (UNE-EN 933-8)	72

Tabla 2: Características de los betunes analizados

Tipo de Betún	BM3b	BMAVC
Penetración (UNE-EN 1426) (mm)	54	55-70
Punto de reblandecimiento (UNE-EN 1427) (°C)	68.1	70.0
Temperatura de fragilidad Fraass (UNE-EN 12593) (°C)	-17	-15
Recuperación elástica a 25 °C (NLT 329) (%)	73	80

Tabla 3: Granulometría del Polvo de neumático empleado en la vía seca

Polvo de Neumático Vía Seca							
Análisis Granulométrico (UNE-EN 933-1)	Tamices (mm)	1,5	1	0,5	0,25	0,125	0,063
	% que pasa	100	100	43	4	1	0,4

Las granulometrías empleadas para la fabricación de las mezclas Arena-Betún y SMA vienen recogidas en la Figura 1. En este sentido hemos de notar que los esqueletos minerales utilizados en las mezclas fabricadas con BMAVC, BM3b, y en la vía seca (BM3b+2%PNFU VS), fueron los mismos (la mezcla fabricada fue la misma, modificando únicamente el tipo de ligante y contenido de PNFU). Por su parte, la Tabla 4 recoge las principales características de las mezclas estudiadas diseñadas a partir de los ensayos de sensibilidad al agua y deformaciones plásticas.

Figura 1: Granulometría de las mezclas estudiadas

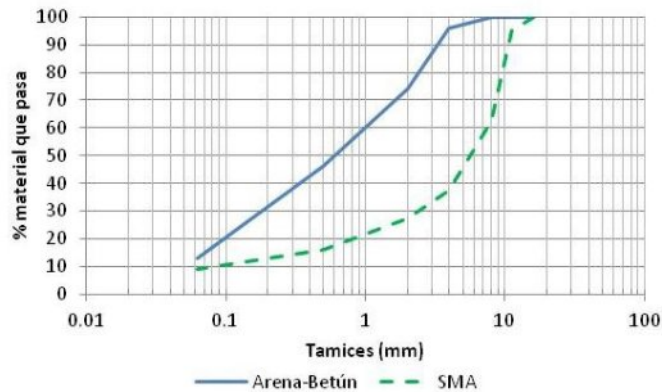


Tabla 4: Características de las mezclas estudiadas

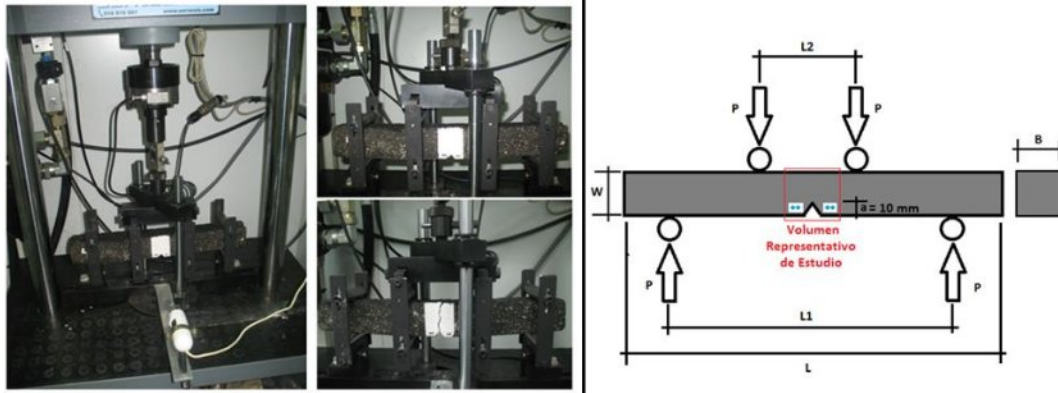
Mezcla	Contenido de ligante (%)	Densidad Aparente (Kg/m ³)	Densidad Máxima (Kg/m ³)	Huecos Aire (%)	Rigidez a 20 °C (MPa)
A-B BM3b	9	2344	2364	0,8	5885
A-B BMAVC	12	2363	2428	2,7	3690
A-B BM3b+2%PNFU VS	10,2	2297	2311	0,6	2766
SMA BM3b	5,5	2513	2632	4,5	6885
SMA BMAVC	5,5	2470	2582	4,3	4532
SMA BM3b+2%PNFU VS	6,7	2460	2537	3,0	6431

Plan de Ensayos

Las pruebas realizadas para la evaluación del comportamiento mecánico a macro-fisuración por fatiga de las mezclas estudiadas ha sido el ensayo de flexo-tracción en cuatro puntos con probetas prismáticas de dimensiones 410 x 50 x 50 mm. El equipo de ensayo utilizado está provisto de un sistema de captación de imágenes de alta resolución, y un sensor óptico para el control de deformaciones, que permiten analizar el proceso de fractura de la probeta. De esta forma, dentro del volumen representativo del material se tomarán los valores de fuerza y deformación aplicados

durante cada ciclo de ensayo, así como la propagación de la macro-fisura aparecida. Además, en la zona de aparición de la macro-fisura se colocarán dos indicadores de movimiento (a ambos lados de la macro-fisura y en su zona inferior), que mediante el empleo del sensor óptico, permitirá medir las deformaciones producidas en sus labios (Figura 2 izq.).

Figura 2: Dispositivo de ensayo (izq.), esquema de las características del ensayo realizado (dcha.)



Las probetas han sido provistas de una entalla triangular situada en su zona central (de 1 mm de altura y 1 mm de base), de manera que se induce la aparición de la macro-fisura en la zona del volumen representativo del material controlado por la cámara (Figura 2 dcha.). El criterio de fallo utilizado para la finalización del ensayo ha sido una longitud de macro-fisura de 25 mm, ya que una vez rebasado dicho valor, la propagación de la grieta deja de ser estable (perdiendo trazabilidad en el comportamiento), y la probeta rompe de forma brusca a sección completa. El control de la propagación de la macro-fisura se lleva a cabo mediante el análisis de las imágenes captadas, realizando mediciones digitales de la propagación de la grieta (para facilitar esta tarea la zona del volumen representativo a estudiar se pinta de blanco).

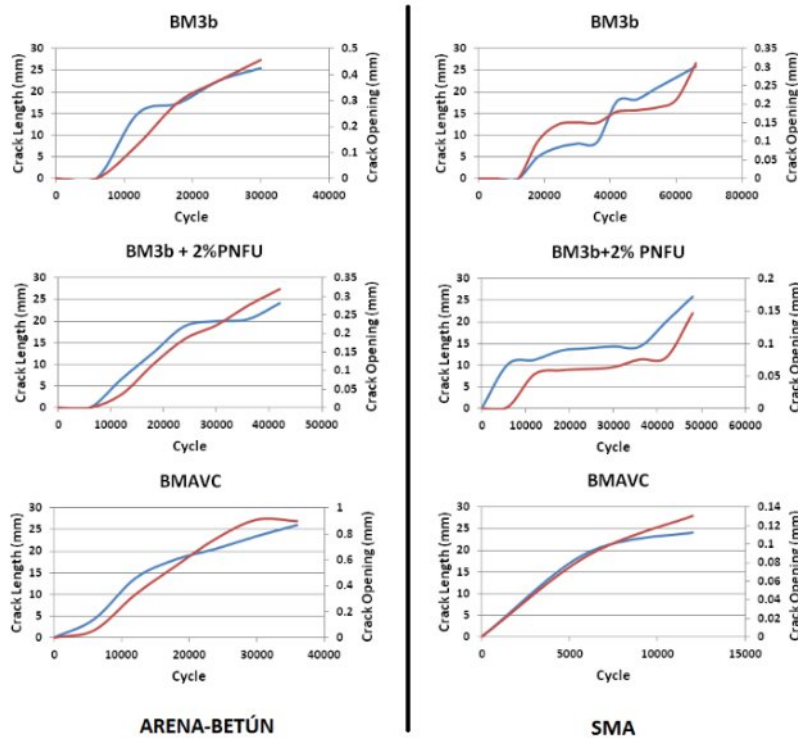
Para poder realizar un estudio homogéneo de la respuesta de los materiales ensayados ante el proceso de fisuración, el ensayo se realiza en el interior de una cámara climática. Las condiciones de ensayo utilizadas para la evaluación de los materiales fueron de 0,5 mm de amplitud de carga, con una frecuencia de 10 Hz, a una temperatura constante de 20 °C. Además, para una evaluación más realista del comportamiento de la mezcla, teniendo en cuenta el efecto de “healing” producido durante los procesos de fatiga de los materiales (Bonnaure et al., 1982; Kim et al., 2003), se introdujeron periodos de descanso durante las cargas cíclicas sinusoidales aplicadas durante el ensayo. De esta forma, las cargas utilizadas en los ensayos consistieron en la aplicación de 1500 ciclos de carga, aplicando un periodo de descanso de 150 segundos (el mismo tiempo que tarda en aplicar los 1500 ciclos).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Arena-Betún

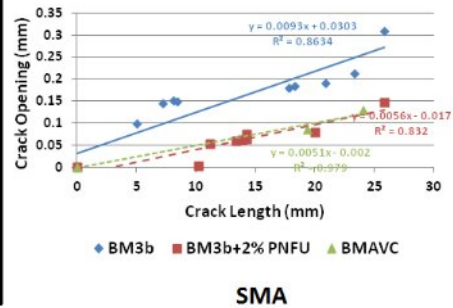
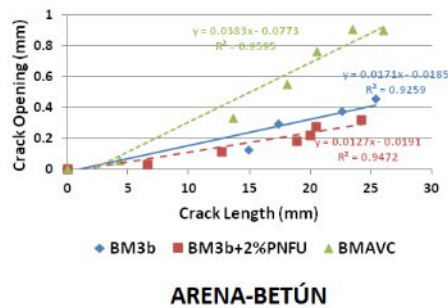
La Figura 3izq. muestra los resultados obtenidos en términos de longitud y apertura de fisura para la mezcla arena-betún fabricada con los betunes BM3b, BM3b+2%PNFU VS y BMAVC.

Figura 3: Resultados de propagación de macro-fisura y apertura de grieta para las mezclas arena-betún (izq.) y SMA (dcha.)



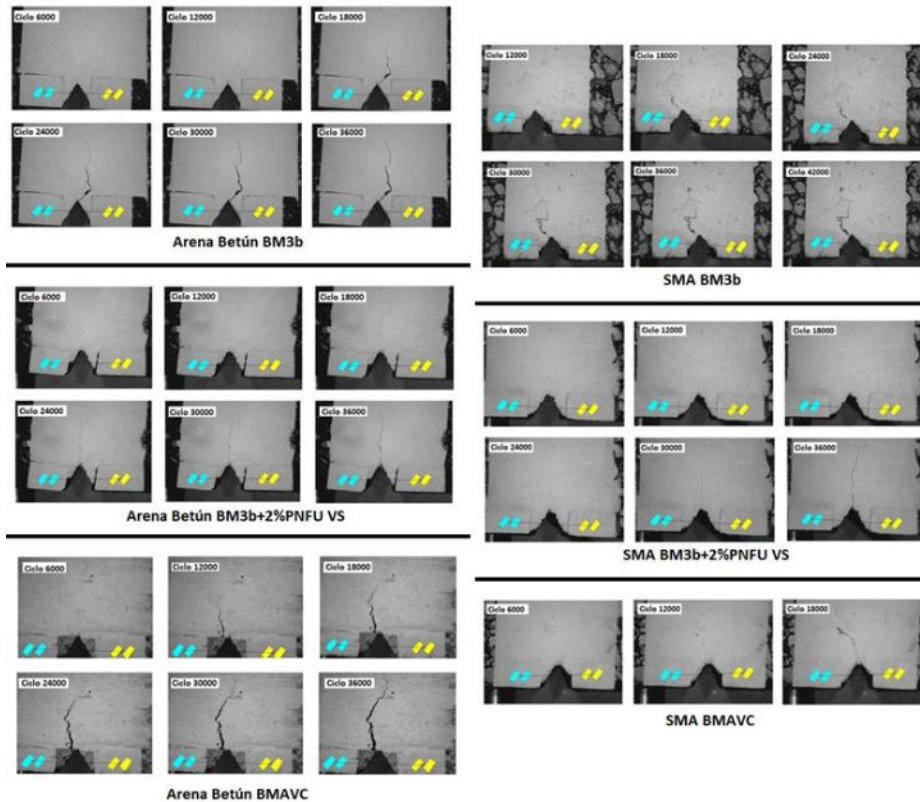
Como se puede observar, existe correspondencia entre dichas medidas de manera que para la temperatura estudiada la propagación del daño a macro-fisuración tiene una relación directa con las deformaciones generadas en la boca de la fisura debida a las tensiones sufridas (Figura 4izq.). En todos los casos, existe una fuerte relación lineal entre la longitud de la grieta y el ancho de la misma, independientemente del tipo de ligante empleado (de manera que conforme aumenta la separación de los labios de la grieta, de la misma forma lo hace la propagación vertical de la fisura). No obstante, los datos obtenidos mediante el sensor óptico muestran que la abertura de los labios de la macro-fisura es variable en función del tipo de ligante empleado. En este sentido podemos decir, que para las mismas condiciones de carga, el ancho de fisura sufrido por la mezcla fabricada con BMAVC es mayor que el de la mezcla BM3b y que el de la mezcla BM3b+2%PNFU VS.

Figura 4: Relación entre apertura de grieta y propagación de macro-fisura en las mezclas arena-betún (izq.) y SMA (dcha.)



Cabe destacar que las mezclas que ofrecen un peor comportamiento a fisuración, para la misma longitud de grieta tienen asociado una mayor abertura. En este sentido, tal y como puede observarse en la Figura 5, las grietas producidas en la arena-betón fabricada con BMAVC son más gruesas, y por tanto el proceso de fisuración provoca un mayor deterioro en este material.

Figura 5: Imágenes del desarrollo de la macro-fisura en las mezclas ensayadas

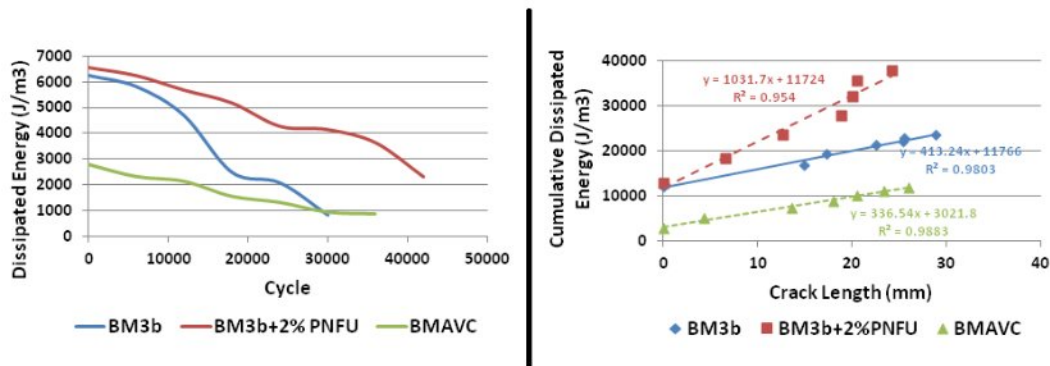


El hecho de que el BMAVC alcance mayores grosores de fisura puede ser debido a la presencia del PNFU (por vía húmeda) en la matriz del betón, la cual provoque discontinuidades y falta de cohesión, de manera que se comporte de forma más débil ante el fenómeno de fisuración. Este hecho ha podido influir directamente en que la mezcla fabricada con este ligante sea la que menor resistencia a fisuración ha mostrado. El contenido de polímeros del BM3b mejora la cohesión interna del ligante de manera que el grosor de la macro-fisura aparecida en las mezclas fabricadas con él, es considerablemente inferior a las del BMAVC. Por su parte, la adición de PNFU por vía

seca puede mejorar el comportamiento elástico del conjunto de la mezcla, de forma que retarde el desarrollo del proceso de fisuración.

Analizando la energía disipada por el material durante los ciclos de ensayo, se puede observar que en el caso de la arena-betún fabricada con BM3b es necesaria una mayor cantidad de energía para formar y propagar la fisura que en el de la fabricada con BMAVC (Figura 6 izq.). Este hecho refleja que el material fabricado con BM3b es más resistente a la propagación de la fisura (al ser un betún más resistente necesita más energía para provocar la propagación de la fisura y por tanto más fuerza, ya que se trata de un ensayo a deformación controlada). Por su parte, la adición de PNFU por vía seca a la mezcla aumenta su elasticidad disminuyendo, haciendo necesario incrementar la cantidad de energía a introducir para provocar el mismo nivel de daño en el material.

Figura 6: Relación entre apertura de grieta y propagación de macro-fisura en las mezclas arena-betún (izq.) y SMA (dcha.)



Además, existe una fuerte correlación lineal entre la cantidad de energía disipada acumulada a lo largo del ensayo con respecto a la longitud de propagación de macro-fisura (Figura 7 dcha.). Así, podemos decir que la energía disipada se encuentra íntimamente relacionada con el daño producido en el material, y por tanto se trata de un enfoque muy útil a la hora de optimizar el diseño anti-fisuras de mezclas bituminosas. La cantidad de energía necesaria para provocar el inicio de la macro fisura en las mezclas fabricadas con BM3b, es superior a la necesaria para provocar el inicio en la arena betún BMAVC. En este sentido se ratifica que la resistencia al inicio de macro-fisuración es mayor en el caso de los betunes modificados con polímeros, que en los betunes modificados con caucho. Por su parte, también se observa el efecto beneficioso de la adición de PNFU por vía seca a la mezcla, de forma que incrementa la cantidad de energía necesaria para provocar el mismo nivel de daño en el material. Así, la adición de PNFU por vía seca, más que contribuir a retrasar el desarrollo de la macro-fisura, lo que contribuye es a retrasar el proceso de propagación de la misma.

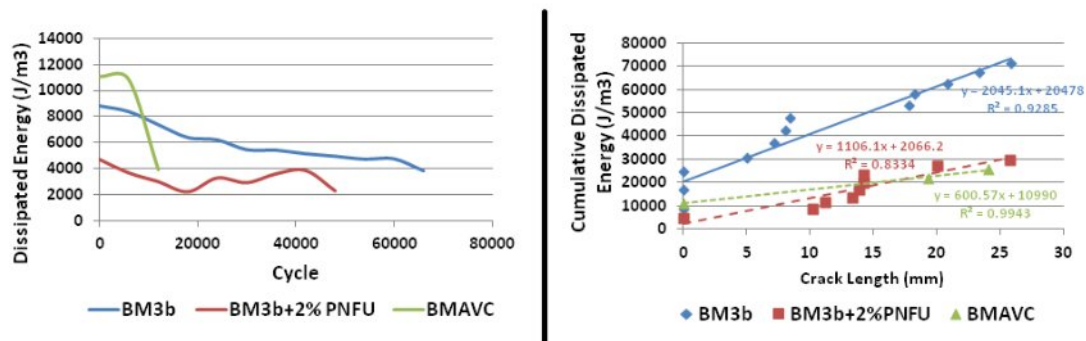
SMA

Tal y como ocurriera en el caso anterior, la abertura de macro-grieta tiene una fuerte relación lineal con la longitud de propagación, de manera que puede afirmarse que ambos aspectos se encuentran relacionados (Figuras 3 dcha. y 4 dcha.). A pesar de ello, en este caso la mezcla que

mayor resistencia ofrece es la que posee una abertura de grieta superior, y por tanto se demuestra que el ancho de grieta no está directamente relacionado con la propagación del daño en el material (Figura 5).

En términos de energía disipada, de nuevo se corrobora que la energía disipada durante el proceso de fisuración va disminuyendo (Figura 7 izq.). Esto es debido a que el consumo de energía en la formación de la grieta es superior que durante su etapa de propagación estable. Por su parte, de nuevo se observa una fuerte relación entre la energía disipada acumulada y la propagación de la grieta a través de los materiales (figura 7 dcha.). La energía necesaria para provocar el inicio y desarrollo de la fisura en el caso de la mezcla SMA con BM3b es mayor, por lo que dicho material será más resistente ante este fenómeno. Al adicionar un 2% de PNFU la resistencia de la mezcla decrece y se comporta de manera muy similar a la fabricada con BMAVC.

Figura 7: Resultados de energía disipada (izq.) y su relación con la propagación de macro-fisura (dcha.) en las mezclas SMA



Llevando a cabo un análisis detallado a través de la energía disipada por cada material, se puede observar como el BM3b se muestra más resistente al proceso de propagación de fisuras que el BMAVC. Por su parte, analizando el comportamiento de los dos tipos de mezclas estudiadas, se puede afirmar que la mezcla tipo SMA tiene una mejor respuesta ante este fenómeno (para un mismo nivel de daño, la cantidad de energía necesaria para el desarrollo y propagación de la fisura se incrementa).

Por su parte, dado que la adición de PNFU al 2% por vía seca no parece tener el mismo efecto positivo sobre el comportamiento del material en un tipo de material y otro, se decidió realizar una prueba incrementando el contenido de PNFU por vía seca hasta el 6% en el caso de la mezcla SMA. En dicha prueba se comprobó que la resistencia a fisuración de la mezcla aumentaba considerablemente, sin llegar a aparecer fisura alguna después de más de 90.000 ciclos. En base a ello, podemos afirmar que la adición de PNFU por vía seca es positiva, pero que la cantidad de éste deberá ajustarse en función a su tamaño y al tipo de esqueleto mineral utilizado en la mezcla.

CONCLUSIONES

En el presente artículo se recogen los resultados del estudio del comportamiento a fisuración de dos tipos de mezclas bituminosas (arena-betún y SMA) fabricadas con un PNFU por vía húmeda y seca. Las conclusiones extraídas de los resultados expuestos en este documento son:

- Existe una correlación del comportamiento a fisuración de las mezclas entre los datos visuales tomados mediante los sensores ópticos y la cámara, y la energía disipada durante el ensayo. Así, la evaluación del estado de daño de este tipo de materiales y su posterior diseño mecánico, puede ser basado en estudios de energía disipada. Por su parte, también existe una relación considerable entre la abertura de los labios de grieta y la propagación vertical de ésta. En función del material dicha relación variará, de forma que cuanto más cohesiva es la mezcla, menor es la abertura de los labios de la fisura y más fina es la macro-grieta propagada.
- Llevando a cabo un análisis detallado a través de la energía disipada por cada material, se puede observar como el BM3b se muestra más resistente al proceso de propagación de fisuras que el BMAVC. A pesar de que el comportamiento a fisuración de las mezclas fabricadas con el betún modificado con polvo de neumático es de orden similar, en base a los resultados obtenidos en términos de energía disipada podemos afirmar que el daño sufrido por este tipo de mezclas es superior que en el caso del BM3b.
- La adición de PNFU por vía seca puede mejorar el comportamiento elástico de la mezcla provocando la aparición de fisuras de menor grosor e incrementando la resistencia de la mezcla a la propagación de fisuras. A pesar de ello, es necesario adaptar el contenido de este material en función del tipo de esqueleto mineral utilizado y de las características del mismo.
- Por su parte, analizando el comportamiento de los dos tipos de mezclas estudiadas, según los resultados del estudio realizado la mezcla tipo SMA tiene una mejor respuesta ante este fenómeno (para un mismo nivel de daño, la cantidad de energía necesaria para el desarrollo y propagación de la fisura se incrementa).

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la financiación recibida para la realización de este estudio que forma parte del proyecto de I+D “DESARROLLO Y DEMOSTRACIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA LA APLICACIÓN DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO EN FIRMES DE CARRETERA RESISTENTES A LA PROPAGACIÓN DE GRIETAS”, referencia IDI-20091076, financiado por el CDTI-Ministerio de Ciencia e Innovación de España.

REFERENCIAS

- Bonnaure, F. P., Huibers, A. H. J. J., Boonders, A. (1982). A laboratory investigation of the influence of rest periods on the fatigue characteristics of bituminous mixes. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist, Vol. 51, pp. 104-128.
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX (1992). Jornadas sobre Reflexión de Grietas en Carreteras. Madrid.

- Colombier, G. (1997). Cracking in pavements: nature and origin of cracks. Prevention of Reflective Cracking in Pavements – RILEM Report 18. Edited by Vanelstraete A. et Franckien L., pp. 1-15.
- Drüschner, L., Schäfer, V. (2005). Stone Mastic Asphalt. Asphalt Guide, German Asphalt Association.
- Florence, C. (2005). Étude expérimentale de la fissuration reflective et la modelisation de la resistance de structures cellulaires. These. Ecole National des Ponts et Chaussées.
- Kim, Y. R., Little, D. N., Lytton, R. L. (2003). Fatigue and healing characterization of asphalt mixtures.” Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 15 (1), (2003), pp. 75-83.
- Ruiz, A. (2010). Mezclas con caucho de neumáticos. Curso de Mezclas Bituminosas: dosificación, fabricación, puesta en obra y control de calidad. Barcelona.