

ESTUDIO DEL USO DE LIGANTES MODIFICADOS EN MEZCLAS ANTIFISURAS

Ignacio Pérez
Vicente Pérez
Antonio García
CEPSA

Ignacio.perez@cepsa.com

Félix Pérez-Jiménez
Rodrigo Miró
Ramón Botella

Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio
Universidad Politécnica de Cataluña
edmundoperez@upc.edu

RESUMEN

La fisuración es uno de los deterioros más habituales en firmes con mezclas bituminosas muy envejecidas o con bases de ligantes hidráulicos. En los firmes flexibles la aparición de este tipo de deterioros viene asociada, normalmente, a la rotura por fatiga de alguna capa inferior del firme debido a las flexiones repetidas por el paso de vehículos pesados. Esta rotura se traduce en la aparición de grietas en las capas inferiores del firme que se transmiten a la superficie, cuarteándose y aumentando en abertura y extensión con el paso del tiempo.

Una de las soluciones a este problema que más éxito han tenido en los últimos años y en la que CEPSA tiene una dilatada experiencia es la utilización de una capa de mezcla antifisuras con alto contenido de ligante de altas prestaciones (con una alta modificación), lo que permite dar una solución eficaz en una capa de bajo espesor.

En el presente artículo se exponen los resultados del estudio sobre comportamiento a fatiga realizado sobre distintos ligantes y en mezclas de este tipo, analizando el comportamiento a fatiga de ligantes y mezclas mediante el ensayo EBADE, así como la resistencia a la fisuración de las mezclas con el ensayo Fénix.

De los resultados obtenidos se concluye que la utilización de betunes de altas prestaciones con un alto contenido de polímero y una alta viscosidad, se traduce en un mejor comportamiento de las mezclas antifisuras.

1. INTRODUCCIÓN

La fisuración es uno de los deterioros más habituales en firmes con mezclas bituminosas muy envejecidas o con bases de ligantes hidráulicos. En los firmes flexibles la aparición de este tipo de deterioros viene asociada, normalmente, a la rotura por fatiga de alguna capa inferior del firme debido a las flexiones repetidas por el paso de vehículos pesados. Esta rotura se traduce en la aparición de grietas en las capas inferiores del firme que se transmiten a la superficie, cuarteándose y aumentando en abertura y extensión con el paso del tiempo.

En el caso de los firmes ejecutados con ligantes hidráulicos, ya sean rígidos o semirígidos, la aparición de este deterioro se debe a la fisuración por retracción térmica, difícil de evitar, aunque suele controlarse mediante el uso de técnicas de prefisuración que permiten una aparición de fisuras más finas, rectilíneas y regularmente espaciadas, lo que las hace menos degradables.

La aparición de este tipo de deterioros suele dar lugar a una degradación de la capa de rodadura, debido al aumento de los esfuerzos que se van produciendo en los bordes de la grieta y que conducen a la consiguiente pérdida de seguridad y confort.

Con el tiempo, además, se produce una pérdida de estanqueidad del firme, con la consiguiente entrada de agua que puede dar lugar a la degradación tanto de la capa de rodadura, como de las capas inferiores, disminuyendo la vida útil del firme.

El desarrollo de betunes modificados de altas prestaciones, con unas propiedades muy superiores a las de los betunes modificados habituales, ha permitido el desarrollo de soluciones que presentan en una sola capa tanto la función antirreflexión de fisuras como la de rodadura.

Las primeras pruebas con este tipo de ligantes se realizaron en el año 2004 en la autopista A7 presentando en la actualidad un aspecto excelente. Se extendieron 6 cm de mezcla con un contenido de ligante del 6,2 % s/a y han presentado un excelente comportamiento hasta la fecha. Posteriormente se han venido realizando más obras reduciendo el espesor de la capa hasta los 5 cm sin notarse ninguna merma en el comportamiento de la mezcla (I. Pérez *et al*, 2009).



Figura 1. Firme fisurado antes y después del tratamiento con betunes modificados de altas prestaciones.

La uso de ligantes y soluciones de alto desempeño es una constante en autopistas concesionarias, conscientes claramente de la rentabilidad que implica invertir en durabilidad a largo plazo.

Por otro lado, la aplicación de los ensayos Fénix y EBADE permite, de una forma más sencilla que el ensayo de fatiga actual (UNE12697-24), evaluar el comportamiento de diferentes mezclas en variables tan fundamentales para el desempeño del pavimento como la fatiga y la resistencia a la fisuración, pocas veces tenidas en cuenta en realidad en el diseño de mezclas asfálticas.

En el presente trabajo se exponen los resultados del estudio sobre el comportamiento a fatiga realizado sobre distintos ligantes (un betún modificado con polímero de altas prestaciones, un betún modificado con polímeros convencional y un betún caucho de alta viscosidad) y en mezclas de este tipo analizando el comportamiento a fatiga de ligantes y mezclas mediante el ensayo EBADE, así como la resistencia a la fisuración de las mezclas con el ensayo Fénix.

2. METODOLOGIA DE ENSAYO

Para analizar el comportamiento de los materiales analizados (betunes y mezclas) se emplearon tres tipos de ensayo: el ensayo EBADE (Ensayo de Barrido de Deformaciones) en sus dos modalidades adaptadas a betunes y mezclas, y el ensayo Fénix en mezclas.

El EBADE es un ensayo uniaxial de tracción-compresión en el cual se somete a la probeta a una amplitud de deformación que aumenta cada 5.000 ciclos. Por razones obvias los niveles de deformación aplicados a betunes y mezclas son diferentes. En betunes, durante los primeros 5.000 ciclos se aplica una amplitud de deformación de

$760 \cdot 10^{-6}$ mm/mm y cada 5.000 ciclos la deformación se incrementa en el mismo valor. La modalidad de ensayo en mezclas sigue el mismo procedimiento, pero en este caso la deformación inicial, y el incremento de deformación cada 5.000 ciclos es de $25 \cdot 10^{-6}$ mm/mm. Ambos se realizan a una frecuencia de 10 Hz.

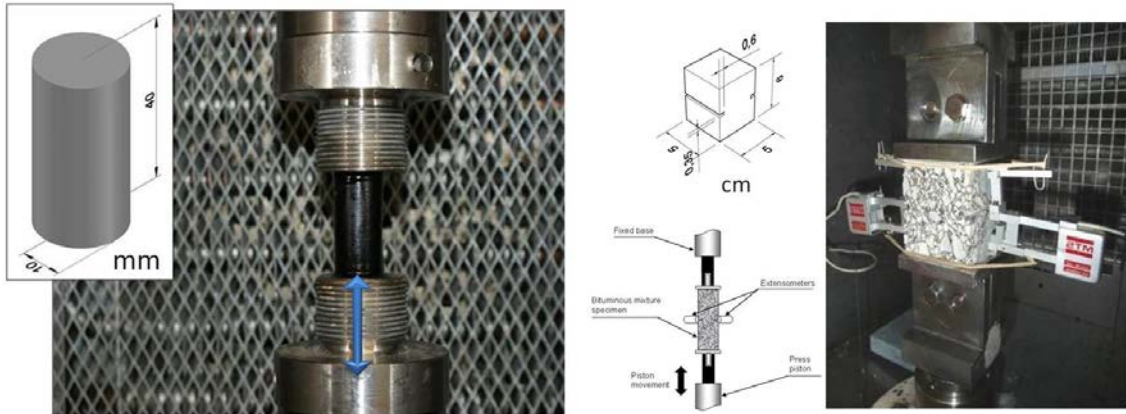


Figura 2. Montaje experimental del ensayo EBADE en betunes y mezclas (F. Pérez-Jiménez *et al*, 2011; R. Botella *et al*, 2012).

Del ensayo se obtienen las curvas de evolución de la amplitud de tensión, del módulo complejo y de la densidad de energía disipada (área del ciclo de histéresis que se forma en el plano tensión-deformación). A partir de estas curvas se obtiene el módulo complejo inicial, que indica la rigidez del material, y la deformación de fallo, que muestra qué deformación puede alcanzar el material antes de fallar por completo. Este último parámetro proporciona una medida de la ductilidad. Estos dos aspectos de los materiales bituminosos tienen tendencias opuestas, cuando uno aumenta el otro disminuye, y en el diseño de estos materiales, los técnicos deben intentar maximizar ambos, encontrando un equilibrio entre ellos. De esta forma, la representación del módulo inicial frente a la deformación de fallo proporciona una visión general del comportamiento del material.

El ensayo Fénix, es un ensayo de fractura a tracción directa que proporciona una medida cuantitativa de la resistencia a fisuración de la mezcla bituminosa. Este ensayo proporciona varios parámetros:

- Índice de Rigidez a Tracción (IRT): Consiste en el pendiente de la primera mitad de la subida de la curva tensión-desplazamiento y proporciona una medida de la rigidez del material.
- Energía de Fractura (GF): Se trata del área bajo la curva tensión-desplazamiento y cuantifica la energía disipada en el proceso de rotura total del material.

- Índice de tenacidad (IT): Se calcula multiplicando el área bajo la curva tensión-desplazamiento a partir del pico de carga por la distancia en mm desde el pico hasta que la carga ha caído un 50% del máximo. Este parámetro proporciona una medida cuantitativa de la ductilidad del material.

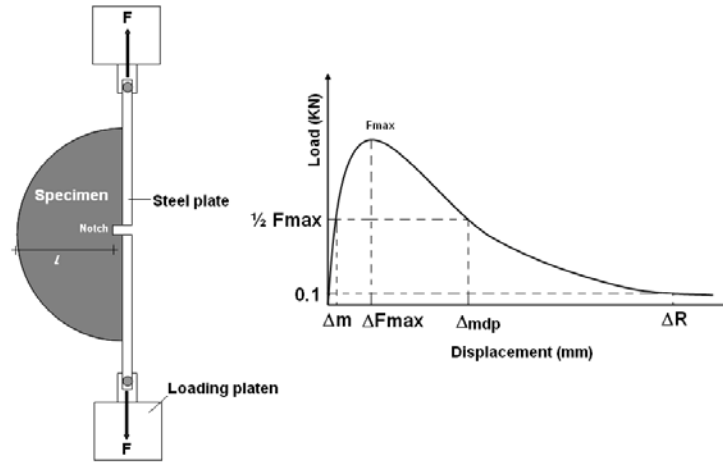


Figura 3. Esquema y ejemplo de curva resultado del ensayo Fénix (F. Pérez-Jiménez *et al*, 2010).

De nuevo, como en el ensayo EBADE, la representación del IRT frente a la GF o la IT otorga una visión general de las características de la mezcla y puede servir para comparar comportamientos entre diferentes mezclas con diferentes propiedades.

3. ESTUDIO DE BETUNES

El estudio se realizó sobre tres betunes diferentes cuyas propiedades se recogen en la Tabla 1.

- Betún modificado con polímero de altas prestaciones, PMB 45/80-75 (RAF AV)
- Betún modificado con polímero convencional, PMB 45/80-65 (BM3c)
- Betún caucho de alta viscosidad (BMAVC 2)

Tabla 1. Propiedades de los betunes utilizados en el estudio.

| CARACTERÍSTICA | Unidad | RAF AV | BM3c | BMAVC 2 |
|--------------------------------|--------|--------|------|---------|
| Penetración (25 °C; 100 g; 5s) | 0,1 mm | 55 | 54 | 37 |
| Punto de reblandecimiento | °C | 85,2 | 67,2 | 76,9 |
| Recuperación elástica a 25 °C | % | 98 | 88 | 84 |

Sobre estos ligantes se realizaron ensayos EBADE (10 Hz y 10, 3 y -5°C) a razón de 3 probetas por ligante y temperatura de ensayo. Para las tres probetas ensayadas se obtienen tres tipos de curvas: la evolución de la amplitud de tensión, del módulo y de la densidad de energía disipada. De los resultados obtenidos para las tres probetas se obtiene la curva promedio que representa el comportamiento del ligante a la temperatura de ensayo dada.

A partir de estos resultados se obtienen dos parámetros que serán los más importantes a la hora de caracterizar el comportamiento a fatiga de los ligantes: el módulo inicial y la deformación de fallo.

El módulo inicial se determina como el promedio de los módulos calculados en cada ciclo del primer escalón de deformación. Mientras que la deformación de fallo se define como la amplitud de deformación a la cual experimenta un descenso súbito de esta variable.

Tabla 1. Valores numéricos obtenidos en los ensayos EBADE en betunes.

| Ligante | Temperatura (°C) | Módulo inicial (MPa) | Deformación de fallo |
|---------|------------------|----------------------|----------------------|
| RAF AV | 10 | 67 | 1.60E-02 |
| | 3 | 108 | 1.60E-02 |
| | -5 | 258 | 1.60E-02 |
| BM3c | 10 | 92 | 1.60E-02 |
| | 3 | 177 | 1.52E-02 |
| | -5 | 361 | 1.37E-02 |
| BMAVC 2 | 10 | 96 | 1.60E-02 |
| | 3 | 157 | 1.60E-02 |
| | -5 | 306 | 1.60E-02 |

Empleando este procedimiento se ha elaborado la Tabla 2. Dos de los ligantes, el RAF AV y el BMAVC 2, presentaron ductilidades tan elevadas que fue imposible determinar su deformación de fallo en los ensayos EBADE, incluso a -5°C. Por lo tanto, los valores que se muestran en la Tabla 2 y la Figura 4 de la deformación de fallo son una cota inferior de su valor real.

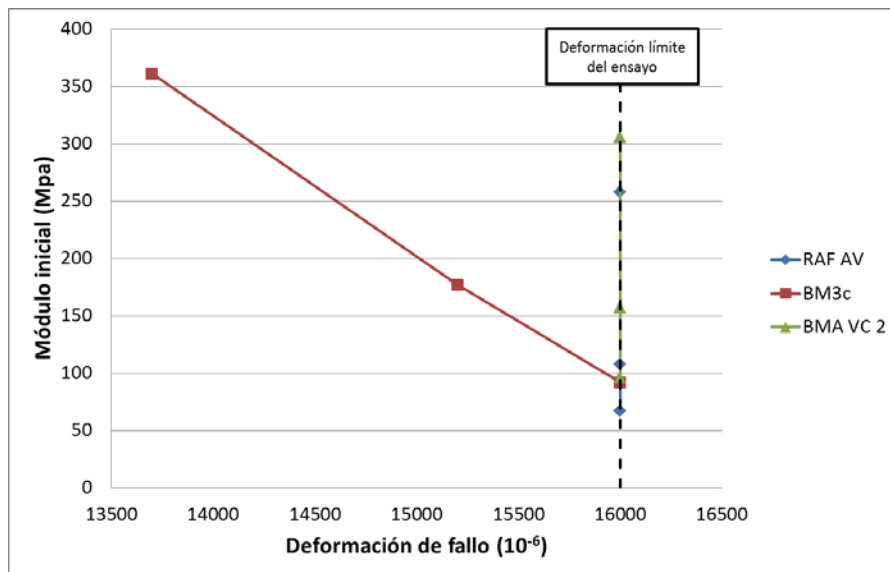


Figura 4. Deformación de fallo vs. Módulo inicial para los ligantes de alto módulo.

Este tipo de gráficos permite comparar el comportamiento de varios ligantes, a diferentes temperaturas, teniendo en cuenta tanto su ductilidad como su rigidez.

El ligante BM3c fue el único para el que se pudo apreciar un ligero descenso de la deformación de fallo con la temperatura. Este ligante fue el que experimentó una mayor rigidización, por ser el que más aumento de módulo presentó al bajar la temperatura de ensayo. Esto implica que, de los tres ligantes estudiados, el BM3c fue el más susceptible a la temperatura. Por contra, el RAF AV fue el que presentó un menor módulo a las tres temperaturas lo que demuestra su mayor ductilidad y menor sensibilidad al descenso de la temperatura. A priori, esto indicaría que es el ligante más adecuado para minimizar y/o retardar la aparición de fisuras en la capa superior del firme, ya sea por retracción térmica, como por reflexión de fisuras existentes en la capa inferior.

A continuación se muestran las curvas de estos ensayos a temperatura de 10°C y 10Hz:

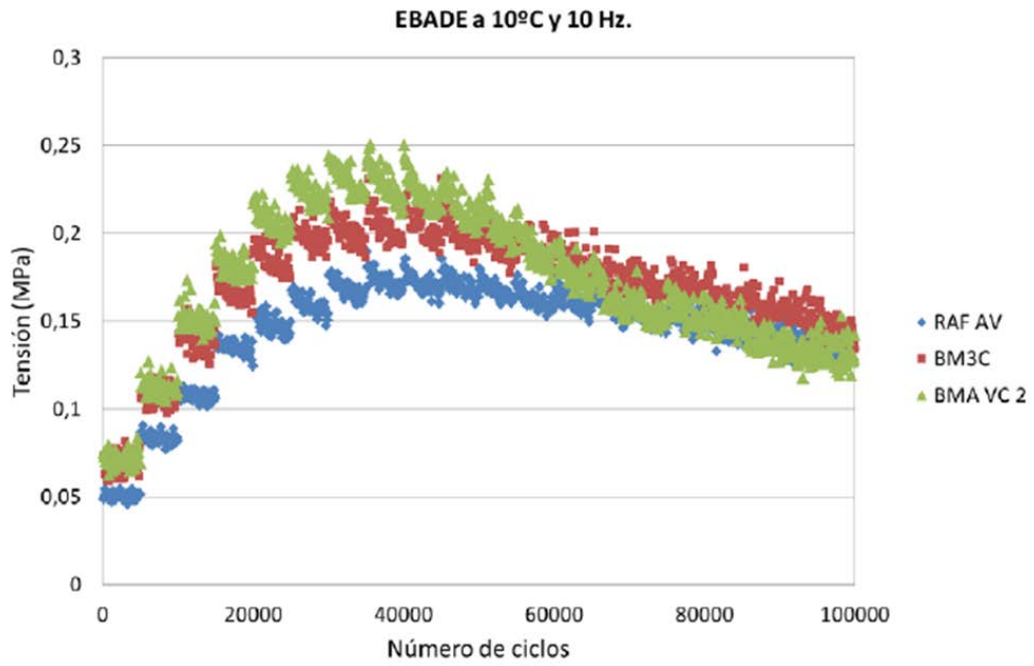


Figura 5. Tensiones Vs número de Ciclos. EBADE a 10°C

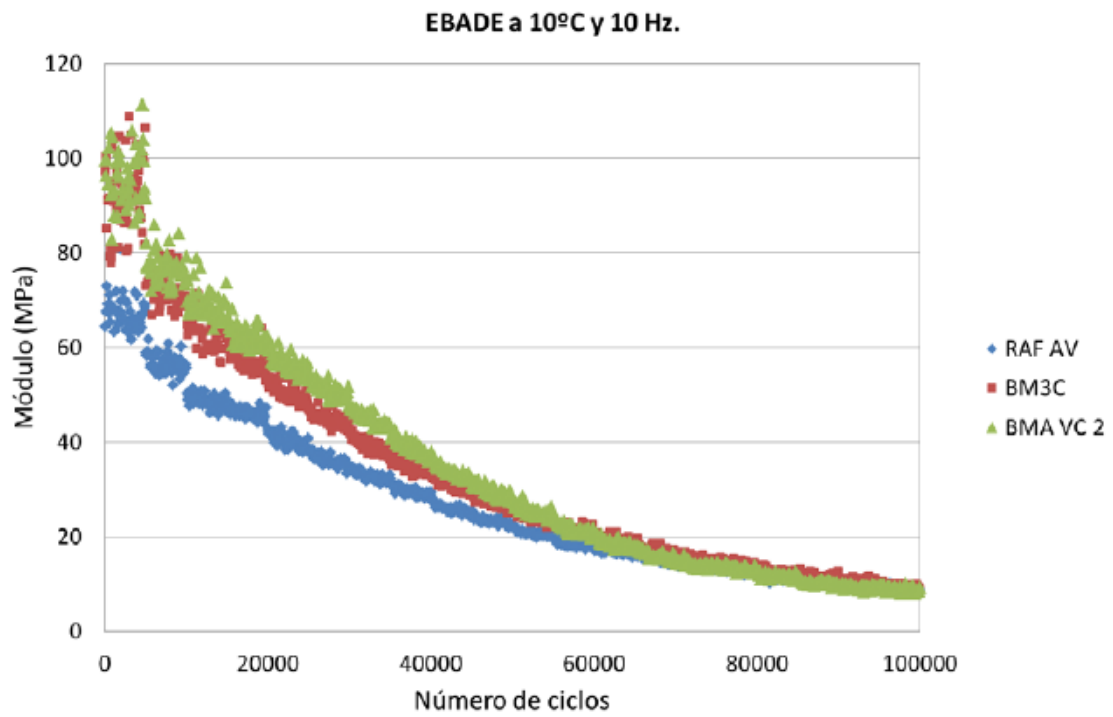


Figura 6. Evolución del Módulo Vs número de Ciclos. EBADE a 10°C

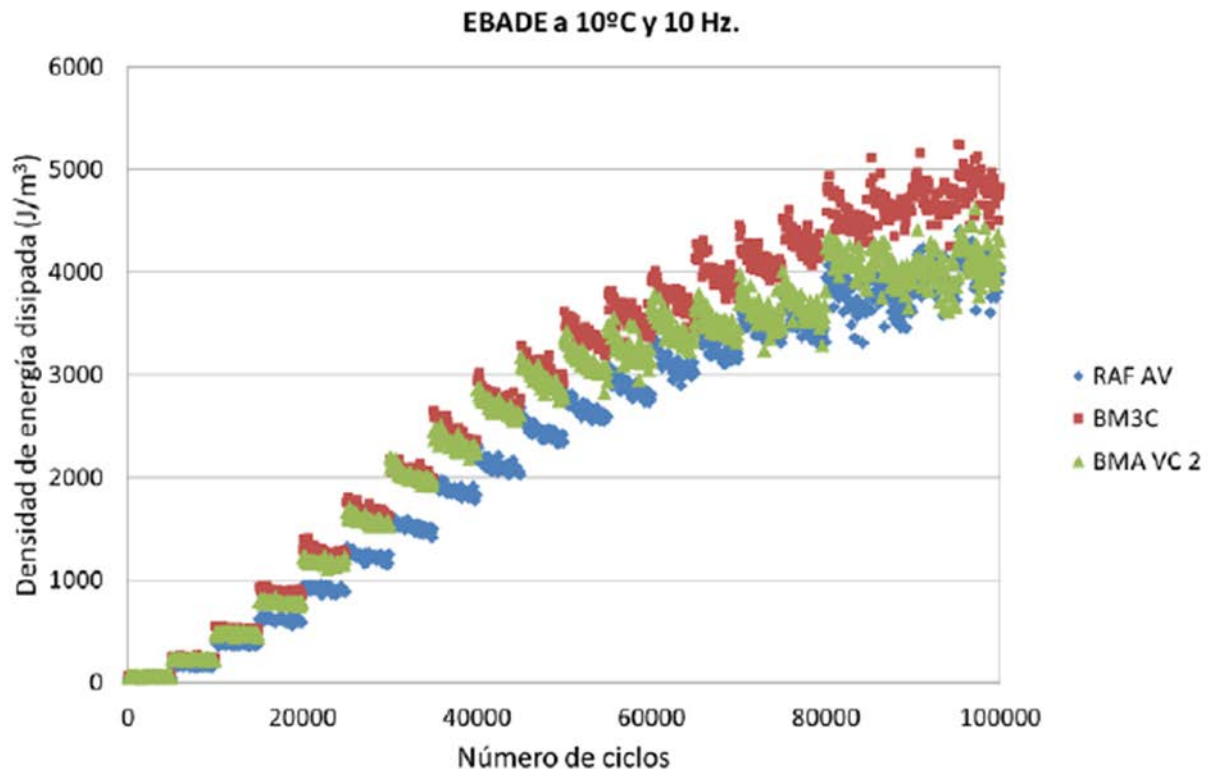


Figura 7. Densidad de energía disipada Vs número de Ciclos. EBADE a 10°C

4. ESTUDIO DE MEZCLAS

Una vez analizado el comportamiento a fatiga de los ligantes, se fabricaron mezclas con estos tres ligantes. Se estudió el comportamiento a fatiga de estas mezclas mediante el ensayo EBADE (10 Hz y 10, 3 y -5°C) en su modalidad adaptada a mezclas, y su resistencia a la fisuración, mediante el ensayo Fénix.

El objetivo era corroborar que los resultados obtenidos en betunes se trasladan a las mezclas fabricadas con éstos, y que estas mismas mezclas no sólo presentan un buen comportamiento a fatiga, sino que también son resistentes a la fisuración.

Para el estudio del comportamiento en mezclas se utilizó una granulometría del tipo “antifisuras rugoso” utilizada habitualmente para este tipo de soluciones con un contenido de ligante del 6,2% s/a.

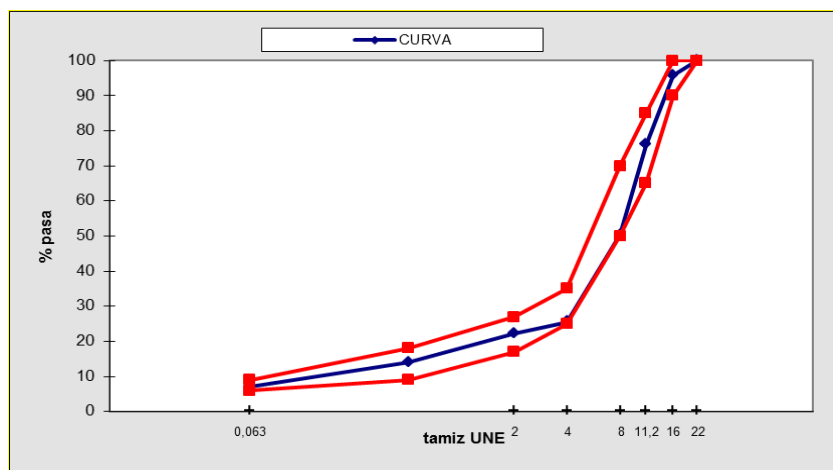


FIGURA 8. Granulometría utilizada.

Las densidades y los huecos promedio de las probetas fabricadas mediante compactación por impacto a 75 golpes por cara con los tres betunes fueron muy similares, de modo que cualquier diferencia en el comportamiento de las mezclas fue debida a las propiedades del betún que la componía. Los valores se muestran en la Tabla 3.

Tabla 2. Densidades y huecos de las probetas ensayadas.

| | Densidad relativa aparente (g/cm ³) | Densidad geométrica (g/cm ³) | Huecos teóricos (%) |
|---------|---|--|---------------------|
| RAF AV | 2,360 | 2,247 | 4,2 |
| BM3c | 2,359 | 2,235 | 4,2 |
| BMAVC 2 | 2,332 | 2,234 | 5,4 |

4.1. Ensayo EBADE.

Mientras que en los ensayos EBADE en betunes los módulos del BM3c y del BMAVC 2 fueron similares a 10°C, las mezclas fabricadas con éstos muestran resultados diferentes, Tabla 4. El módulo de la mezcla fabricada con el BMAVC 2 ha sido un 19% superior al de la mezcla fabricada con el BM3c, esta diferencia ha sido menor a 3°C, y a -5°C ha sido la mezcla fabricada con el BM3c la que ha obtenido un módulo ligeramente superior. Sin embargo, donde más se ha notado una diferencia de la tendencia de comportamiento ha sido en la deformación de fallo. La mezcla fabricada con el ligante BMAVC 2 ha obtenido deformaciones de fallo muy inferiores a las obtenidas por el resto de mezclas tanto a 10 como a 3°C. A -5°C las diferencias han sido menores.

Tabla 3. Parámetros obtenidos en los ensayos EBADE.

| Mezclas | Temperatura (°C) | Módulo inicial (MPa) | Deformación de fallo ($\mu\text{m/m}$) |
|---------|------------------|----------------------|--|
| BM3c | 10 | 6619 | 525 |
| | 3 | 8737 | 375 |
| | -5 | 13103 | 325 |
| RAF AV | 10 | 5492 | 625 |
| | 3 | 7044 | 375 |
| | -5 | 12107 | 325 |
| BMAVC 2 | 10 | 8171 | 225 |
| | 3 | 9307 | 225 |
| | -5 | 11438 | 225 |

La Figura 9 muestra claramente cómo la mezcla fabricada con el ligante RAF AV presenta una mayor ductilidad a 10°C. Sin embargo las deformaciones de fallo de la mezcla fabricada con el BM3c, tanto a 3 como a -5°C, son iguales a los de la mezclas con RAF AV, siendo el módulo inicial de la mezcla BM3c ligeramente superior. Aunque las deformaciones de fallo de las dos mezclas sean similares, el mayor módulo de la mezcla BM3c indica que ésta presenta una mayor rigidez. Esto repercutiría negativamente en la capacidad de esta mezcla para evitar la propagación de fisuras, respecto a la mezcla fabricada con el RAF AV. Por su parte la mezcla fabricada con el ligante BMAVC 2 no varió su deformación de fallo con la temperatura y fue claramente inferior que para el resto de mezclas a todas las temperaturas.

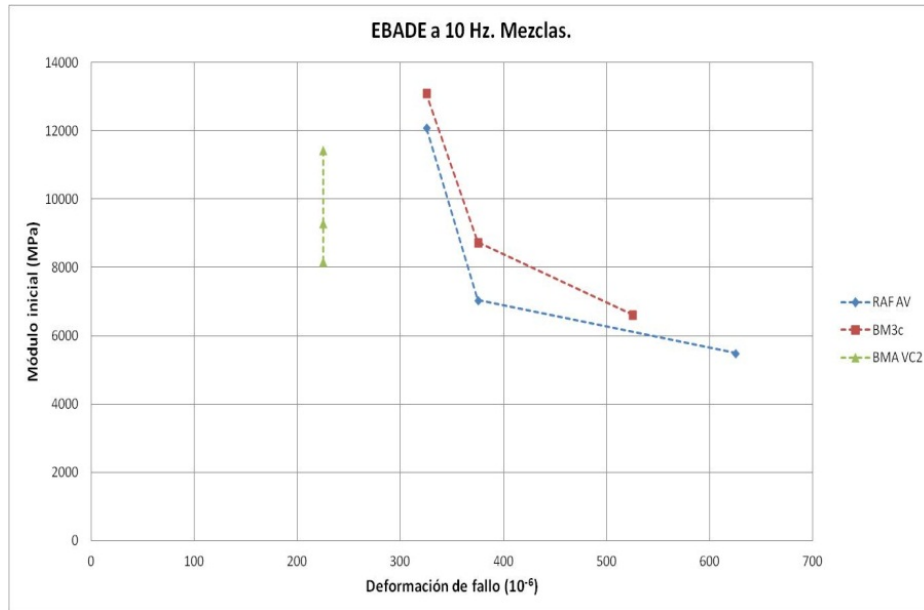


Figura 9. Representación gráfica de los parámetros obtenidos en los ensayos EBADE en mezclas.

4.2. Ensayo Fénix.

En la Figura 10 se muestra lo que ya se ha observado en los resultados obtenidos en los ensayos EBADE. La mezcla fabricada con el RAF AV es la más dúctil de las tres, mientras que la mezcla fabricada con el BM3c presenta una gran resistencia a tracción, manteniendo una ductilidad elevada. Por su parte la mezcla fabricada con el ligante BMA VC2 se ha rigidizado mucho, como muestra su baja energía de fractura (GF) y su bajo índice de tenacidad (IT) en comparación con las otras dos mezclas, Tabla 5..

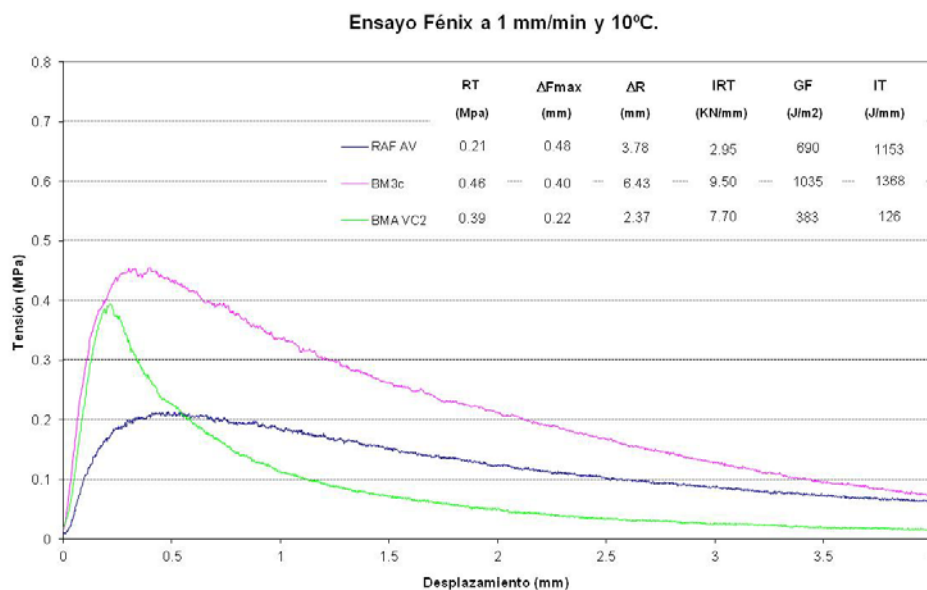


Figura 10. Curvas tensión-deplazamiento obtenidas en los ensayos Fénix a 10°C.

Tabla 4. Parámetros obtenidos en los ensayos Fénix

| | Temperatura (°C) | IRT (KN/mm) | GF (J/m ²) | IT (mN) |
|---------|------------------|-------------|------------------------|---------|
| BM3c | 20 | 4 | 751 | 1461 |
| | 10 | 9 | 1017 | 1383 |
| | -5 | 16 | 1050 | 293 |
| RAF AV | 20 | 3 | 311 | 599 |
| | 10 | 9 | 492 | 594 |
| | -5 | 14 | 803 | 307 |
| BMA VC2 | 20 | 6 | 244 | 150 |
| | 10 | 8 | 372 | 112 |
| | -5 | 15 | 796 | 72 |

De los parámetros obtenidos en los ensayos Fénix se observa la misma tendencia obtenida en los ensayos EBADE (ver tabla 5). La mezcla fabricada con el RAF AV es la que presenta una gran ductilidad y la mezcla fabricada con el ligante BMA VC2 ha sido la que más se ha rigidizado, mostrando Índices de Tenacidad (IT) más bajos. Por su parte, la mezcla fabricada con el ligante BM3c, al presentar una ductilidad similar a la mezcla RAF AV y tener un mayor módulo, ha obtenido excelentes resultados en los ensayos de Fénix de fisuración. Sin embargo, la mezcla fabricada con el RAF AV ha sido la que ha experimentado una menor variación de sus parámetros con la temperatura, siendo la que mayor ductilidad ha mostrado a la temperatura más baja.

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se han derivado las siguientes conclusiones:

- Respecto a los ensayos realizados en ligantes, el BM3c ha sido el único que ha experimentado un descenso de la deformación de fallo con la temperatura, medible por el ensayo EBADE. Además su incremento de módulo con el descenso de la temperatura ha sido superior al resto, indicando así una mayor sensibilidad a la temperatura. Tanto el RAF AV como el BMA VC 2 han mantenido su deformación de fallo por encima del límite de medición del ensayo EBADE a todas las temperaturas, pero el BMA VC 2 ha mostrado módulos significativamente mayores.
- De las mezclas estudiadas, la más dúctil ha sido la fabricada con el ligante RAF AV, lo que la calificaría como la mejor opción para evitar la propagación

de fisuras a la capa superior del firme. La mezcla fabricada con el BM3c ha obtenido resultados similares en los parámetros que miden la ductilidad; sin embargo sus parámetros de rigidez han sido más elevados, indicando que esta mezcla es más sensible al cambio de temperatura.

- El procedimiento de fabricación y/o la interacción del betún con los áridos ha afectado a la ductilidad del ligante BMA VC 2. Mientras que en los ensayos realizados en betunes presenta unos valores prometedores, la mezcla fabricada con este ligante ha mostrado menores energías de fractura, menores índices de tenacidad y menores deformaciones de fallo, lo cual indica que su ductilidad se ha visto reducida drásticamente. Por lo tanto, de las tres mezclas estudiadas, esta sería la menos adecuada para ser empleada como mezcla anti-fisuras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Pérez, I.; A. García; J.A. Soto. Técnicas de rehabilitación de pavimentos fisurados. IV Jornada Nacionales de ASEFMA, 2009.
- Pérez-Jiménez, F.; Valdés, G.; Botella, R.; Miró, R. & Martínez, A. EBADE procedure: A new method to assess fatigue behaviour of asphalt mixtures. Revista De La Construcción, 2011, 10, 55-65.
- Botella, R.; Pérez-Jiménez, F. E. & Miró, R. Application of a strain sweep test to assess fatigue behavior of asphalt binders Construction and Building Materials, 2012, 36, 906-912.
- Pérez-Jiménez, F. E.; Valdés, G.; Miró, R.; Martínez, A. & Botella, 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, 2010, 2181, 36-43.