

PROPUESTA DE UN MÉTODO PARA EL CONTROL DE CALIDAD EN LA ELABORACIÓN Y PUESTA EN OBRA DE MEZCLAS BITUMINOSAS

Rodrigo Miró¹, Félix E. Pérez-Jiménez², Adriana Martínez³, Ramón Botella⁴, Bernat Puente⁵

¹ Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, r.miro@upc.edu

² Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, edmundoperez@upc.edu

³ Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, adriana.martinez@upc.edu

⁴ Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, ramon.botella@upc.edu

⁵ Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, bernat.puente@estudiant.upc.edu

Resumen

La calidad de una capa de mezcla bituminosa se ve afectada significativamente por el proceso seguido en su fabricación y puesta en obra. De todos es conocido cómo sus propiedades pueden ser alteradas al calentar excesivamente la mezcla durante su proceso de fabricación y envejecer el betún o, por el contrario, si no se alcanza una temperatura adecuada y no se puede compactar adecuadamente. También pueden influir los equipos usados en su puesta en obra y ejecución, especialmente los compactadores; si estos no aportan la energía necesaria para su compactación puede quedar la mezcla mal compactada, pero también pueden ser excesivamente enérgicos, compactar la mezcla en frío y/o triturar y romper su esqueleto mineral.

Actualmente, el control de calidad sobre la ejecución de las mezclas bituminosas está basado básicamente en la determinación de la densidad del testigo y compararla con la de la mezcla de referencia. Con el método propuesto se complementaría este parámetro con el de la calidad mecánica del testigo evaluado mediante el ensayo Fénix. Este ensayo permite determinar las propiedades contrapuestas y fundamentales de la mezcla, por una parte, su resistencia y módulo de rigidez y por otra, su tenacidad y ductilidad. El comportamiento mecánico de la mezcla, su resistencia a la fisuración, su energía de fractura, dependen básicamente de estos parámetros evaluados en el ensayo Fénix.

En este artículo se recoge un estudio en el que se analiza, mediante el ensayo Fénix, el cambio de las propiedades mecánicas de dos mezclas tipo AC y BBTM, cuando se produce un efecto de envejecimiento del ligante en el proceso de envuelta o se reduce la energía de compactación. Mediante este estudio se quiere analizar si el ensayo Fénix puede detectar los efectos antes mencionados y así poderlo aplicar como procedimiento de control de calidad de ejecución.

Palabras clave: calidad, compacidad, envejecimiento, rigidez, ductilidad, ensayo Fénix

1 Introducción

El comportamiento y respuesta de una capa de mezcla bituminosa en un firme de carretera va a depender de la idoneidad y calidad de la mezcla proyectada, y de cómo ésta ha sido fabricada y puesta en obra. Como su respuesta y comportamiento mecánico es muy sensible al grado de compactación alcanzado en su puesta en obra, es habitual controlar la densidad conseguida mediante la extracción de testigos y compararla con la de proyecto.

Pero hay otros factores relacionados con la puesta en obra de la mezcla que también pueden afectar a su respuesta y que no son tenidos en cuenta en la valoración del producto obtenido. Tal es el caso del efecto del envejecimiento que puede tener la mezcla durante su fabricación por usar una temperatura más alta que la requerida o por prolongar el tiempo en que se mantiene a temperaturas elevadas. Este envejecimiento da lugar a una pérdida importante de las características de flexibilidad y ductilidad de la mezcla que pueden afectar de una forma muy notable a su respuesta.

Con el fin de analizar el efecto de estos factores en el comportamiento de la mezcla, se ha llevado a cabo un trabajo experimental en laboratorio en donde se ha valorado, mediante el ensayo Fénix, la

influencia de la energía de compactación y del envejecimiento del betún en la respuesta de los dos tipos de mezclas más habituales en nuestras carreteras: una continua tipo AC y otra de granulometría discontinua tipo BBTM. Se han considerado tres condiciones de compactación y dos de envejecimiento descritos en el plan de ensayos.

El uso del ensayo Fénix en la valoración de resultados viene motivado por ser un ensayo especialmente diseñado para analizar la ductilidad de la mezcla, ya que se trata de un ensayo de rotura a tracción, a deformación controlada, que permite valorar de forma continua el progresivo deterioro de la mezcla a medida que se va deformando, a diferencia de otros ensayos a tracción clásicos que producen una rotura brusca. Además, este ensayo permite valorar el comportamiento mecánico y resistente del material, es decir, su módulo de deformación y su resistencia a rotura.

La estructura del presente artículo consistirá en una primera parte en la que se explicará el plan de trabajo empleado para poder realizar los ensayos, posteriormente se presentarán los resultados y se analizarán, seguidamente se establecerán los criterios que nos permitirán establecer el control de calidad sobre las mezclas puestas en obra y, finalmente, se presentarán las conclusiones.

2 Plan de ensayos y trabajo realizado

En primer lugar, se han elegido los dos tipos de mezclas que se utilizarán para realizar el estudio. La primera es una mezcla continua AC16 50/70 S, mientras que la segunda es una discontinua BBTM 8B 50/70.

En segundo lugar, se ha determinado el tipo de envejecimiento aplicado a las mezclas. Para ello, se ha tenido en cuenta que, desde un punto de vista temporal, el envejecimiento que sufre la mezcla asfáltica se produce en dos etapas. La primera, también denominada como envejecimiento a corto plazo, ocurre en el momento de fabricación, transporte desde la planta, y puesta en obra; mientras que la segunda, conocida como envejecimiento a largo plazo, se asocia exclusivamente a la degradación producida por el medio ambiente durante la vida útil de servicio de las mezclas. Para simular cada una de estas etapas, se ha adoptado el siguiente método:

- Envejecimiento a corto plazo: la mezcla suelta se mantiene a 135°C durante 4 horas antes de ser compactada (envejecimiento 1);
- Envejecimiento a largo plazo: la mezcla suelta se mantiene a 85°C durante 7 días antes de ser compactada (envejecimiento 2) [1, 2]. Además, esta se remueve dos veces a lo largo de esta semana para homogeneizar el envejecimiento y evitar el escurrimiento del betún. Aunque este procedimiento se podría haber aplicado después del de corto plazo, se ha optado por estudiar de forma independiente ambos procesos.

También se han ensayado probetas sin envejecer (envejecimiento 0), compactadas nada más fabricarlas, que representan el caso ideal en que las mezclas no han padecido envejecimiento y que, al comparar los resultados obtenidos con las que sí lo han sufrido, permitirán estudiar de un modo más detallado este fenómeno.

En tercer lugar, se ha definido la energía de compactación. Para ello, se ha tenido en cuenta que, actualmente, para comprobar si una mezcla puesta en obra se ha compactado adecuadamente, se compara la densidad y contenido de huecos de un testigo con la de una mezcla compactada según lo indicado en la norma UNE-EN 12697-30:

- A 75 golpes por cara en el caso de una mezcla bituminosa tipo hormigón bituminoso, siempre y cuando tenga un tamaño máximo del árido inferior a 22 milímetros [3]. Por lo tanto, sería el caso de la mezcla AC16 S estudiada en el presente estudio;
- A 50 golpes por cara en el caso de una mezcla para capa de rodadura [3], como la BBTM 8B que se analiza en el presente artículo.

Entonces, para evaluar el efecto de la energía de la compactación, se han adoptado las mencionadas para ambos tipos de mezclas y se ha añadido un tercer grado de compactación, que nos permitirá adquirir más datos y hacer un estudio más exhaustivo de su efecto:

- 25 golpes por cara

Todas las mezclas, independientemente del grado de envejecimiento padecido, se han compactado a 145°C. La masa de los áridos de las probetas AC y BBTM es de 1150 y 1100 g, respectivamente, mientras que el porcentaje de betún es del 4,75% sobre el total de la mezcla. En ambas mezclas, los áridos de tamaño igual o superior a 2 mm son de tipo pórfido, mientras que los inferiores a 2 mm son de naturaleza caliza. La granulometría utilizada corresponde a la media del huso granulométrico especificado para cada tipo de mezcla.

Para que las probetas puedan ser ensayadas mediante el ensayo Fénix, las probetas cilíndricas se deben seccionar de tal modo que el corte contenga el eje de rotación de la muestra, obteniendo de este modo probetas semicilíndricas. Las caras semicilíndricas de una misma probeta se han ensayado a temperaturas diferentes: una a 20°C y la otra a 5°C.

En la Figura 141 se muestra un esquema del plan de trabajo:

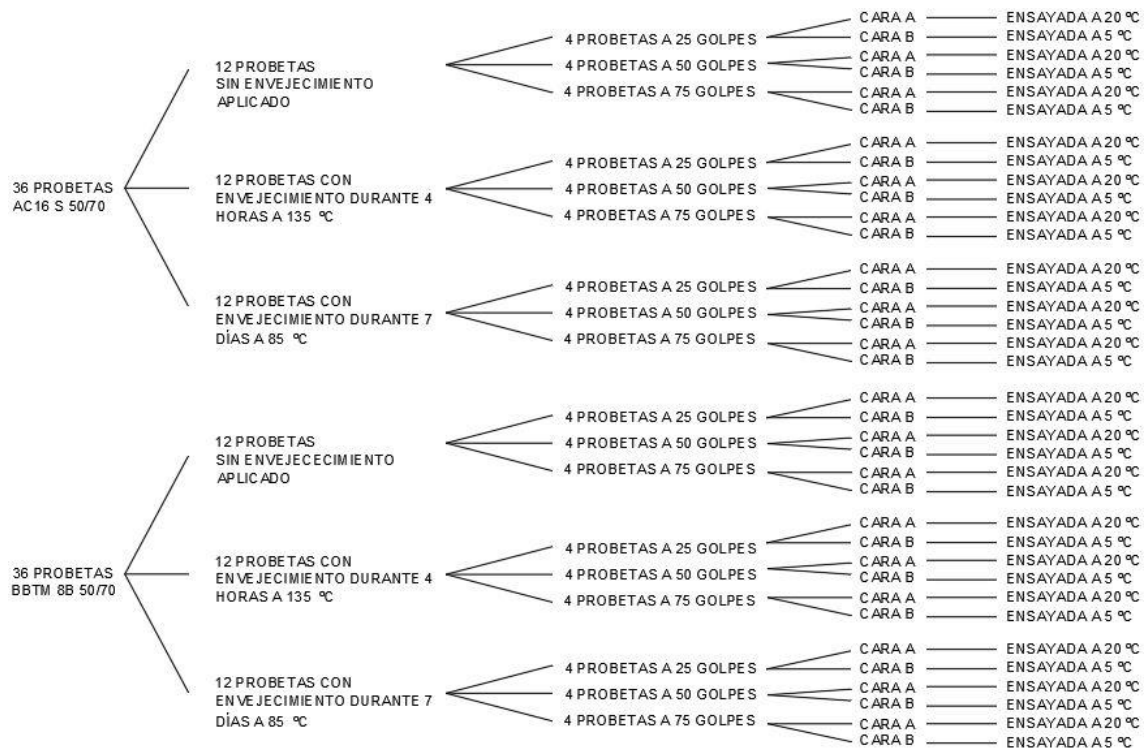


Figura 141. Esquema del plan de trabajo

2.1 Ensayo Fénix

El ensayo Fénix es un ensayo experimental y se emplea para valorar la respuesta de la mezcla a tracción. Consiste en determinar el esfuerzo necesario para ir deformando y, en algunos casos fisurar, una probeta semicilíndrica aplicando un esfuerzo de tracción en su plano diametral mediante dos placas que van sujetas a los anclajes de la prensa. El ensayo se desarrolla a una velocidad constante de deformación del pistón de aplicación de carga de 1mm/min y, durante el ensayo, se registra el esfuerzo aplicado en

función de la deformación. Como se puede ver en la Figura 142, la probeta semicilíndrica presenta una pequeña entalla entre las dos placas para inducir el inicio de la fisuración [4, 5, 6].

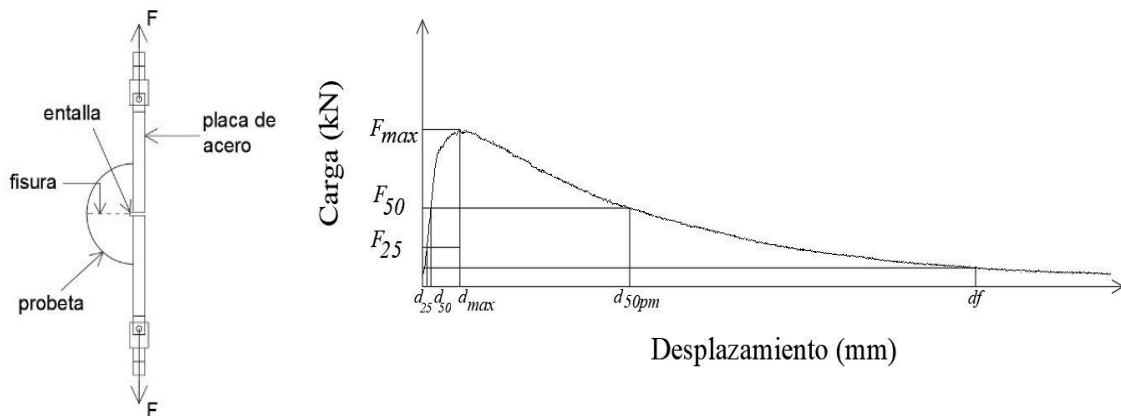


Figura 142. Esquema ensayo Fénix y ejemplo de curva carga-desplazamiento

A continuación, se presentarán los principales parámetros que se pueden obtener a partir de la curva carga-desplazamiento, ya que serán de especial interés y utilidad durante el análisis de los resultados obtenidos. Todas las características que se describirán a continuación se calculan a partir de los valores representados en la Figura 142:

- Resistencia a tracción Fénix, RTF (MPa). Se define como la relación entre la carga máxima registrada expresada en kN, F_{max} , y el área de fractura S en m^2 :

$$RTF = \frac{F_{max}}{1000 \cdot S} \quad (1)$$

- Indicador de rigidez a tracción, IRT (MPa/mm). Es un indicador del grado de rigidez de la mezcla asfáltica, y se calcula como:

$$IRT = \frac{F_{50} - F_{25}}{1000 \cdot S \cdot (d_{50} - d_{25})} \quad (2)$$

donde d_{50} y d_{25} son el desplazamiento en mm antes de la carga máxima a un medio y un cuarto de F_{max} , respectivamente. El parámetro IRT es, por lo tanto, la pendiente de la curva carga-desplazamiento entre el 25 y 50% de la carga máxima.

- Energía disipada por unidad de superficie, G_D (J/m^2). Es la energía empleada por la máquina para la deformación y rotura de la probeta, y se calcula como la integral del área bajo la curva carga-desplazamiento (trabajo realizado en el proceso de rotura) dividida por la superficie de fractura. Representa la fuerza de adhesión de los materiales que constituyen la mezcla asfáltica [7] y, como parámetro, resulta interesante a la hora de evaluar la cohesión del compuesto porque considera todo el proceso de rotura de la mezcla después de alcanzar el máximo esfuerzo, aspecto que resulta de gran importancia en materiales bituminosos [8]. Cuanto mayor sea la energía disipada, mayor será la resistencia a la fisuración de la mezcla.

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

donde F es la carga en kN, x es el desplazamiento en mm, df es el desplazamiento final del ensayo en mm y S es la superficie de fisuración en m^2 .

- Índice de Tenacidad, IT ($J \cdot mm/m^2$). Corresponde a la capacidad de sostener unidos los componentes de la mezcla asfáltica una vez alcanzada la carga máxima. Un valor elevado de IT indicaría que la mezcla puede mantener parte de su resistencia una vez que el fallo se ha iniciado, logrando una mayor deformación hasta su rotura. Con el objetivo de evaluar el comportamiento más o menos dúctil de la mezcla, se ha definido un índice de tenacidad que consiste en el producto del área de la curva después del pico por el desplazamiento realizado por la prensa desde que se asume la carga máxima hasta que ésta se reduce a la mitad, y dividido entre la superficie de fractura [8]:

$$I_T = \frac{\int_{d_{max}}^{df} F(x) \cdot dx}{S} \cdot (d_{50pm} - d_{max}) \quad (4)$$

donde d_{max} es el desplazamiento a F_{max} y d_{50pm} es el desplazamiento después de la carga máxima a un medio de F_{max} , ambos expresados en mm.

Es importante comentar que también se utiliza como parámetro alternativo al índice de tenacidad el desplazamiento correspondiente a la mitad de la carga máxima en la zona post-pico d_{50pm} , o bien la diferencia entre este valor y el del desplazamiento correspondiente a la carga máxima d_{max} :

$$DT = (d_{50pm} - d_{max}) \quad (5)$$

Una vez ensayadas las probetas, se podrá estudiar la influencia de la energía de compactación, el grado de envejecimiento y la temperatura de ensayo en cada uno de los parámetros descritos.

3 Resultados

Después de calcular la densidad y el contenido de huecos de cada una de las mezclas, se observa como ambos valores dependen de la compactación, y apenas se ven afectados por el estado de envejecimiento, Figura 143.

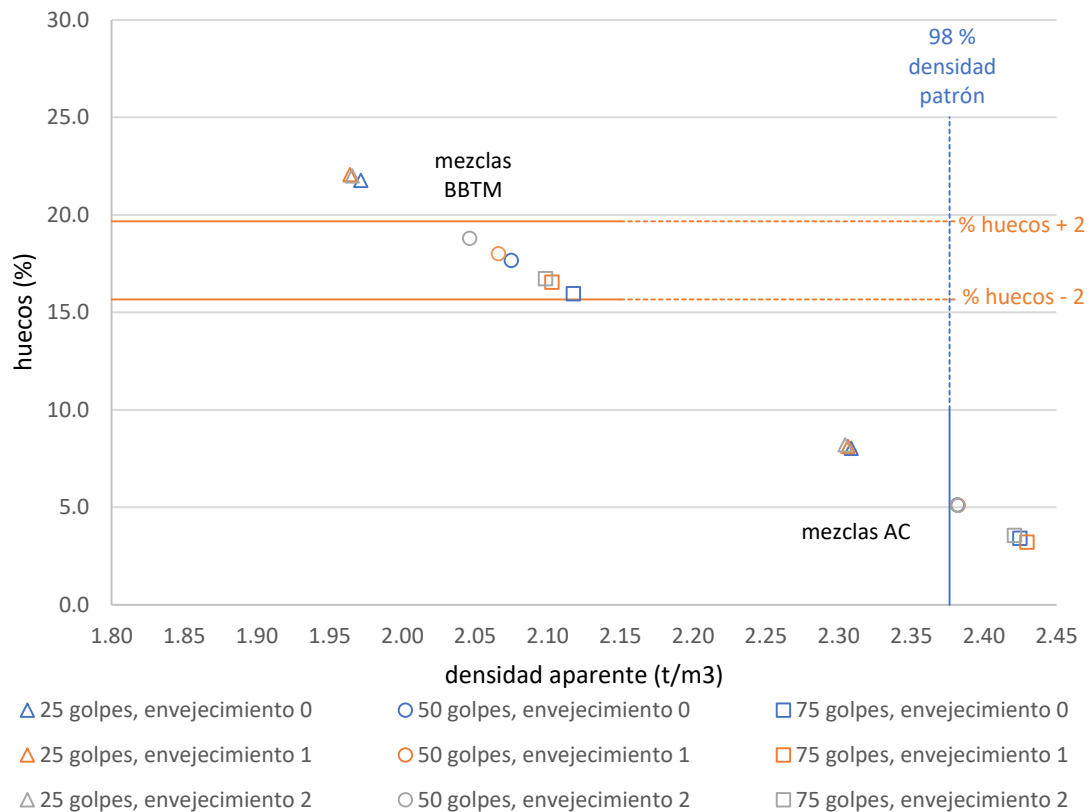


Figura 143. Efecto del envejecimiento y de la compactación en la densidad de la mezcla

Si se tienen en cuenta las especificaciones que se utilizan actualmente para aceptar la calidad de un pavimento, se aprecia cómo, para ambas mezclas, las compactadas a 25 golpes serían rechazadas, mientras que las compactadas a 50 y 75 golpes serían aceptadas. Estas especificaciones se describen brevemente a continuación:

- Para las mezclas AC, la densidad no debe ser inferior al 98% de la densidad de referencia si el espesor de la capa de mezcla es igual o superior a 6 cm; mientras que no puede ser inferior al 97% si el espesor es inferior a 6 cm [3].
- Para las mezclas BBTM B con espesores iguales o superiores a 2,50 cm, el porcentaje de huecos de la mezcla no puede diferir en más de 2 puntos porcentuales el obtenido como porcentaje de referencia [3].

En cambio, una vez observadas las curvas carga-desplazamiento obtenidas mediante el ensayo Fénix, Figura 144 y Figura 145, es posible detectar la diferencia entre el comportamiento de una mezcla que no ha sido envejecida con respecto a una que sí. Como esta diferencia es más apreciable a la temperatura de ensayo de 20°C, el análisis cuantitativo de los resultados hará referencia solo a esta temperatura. A simple vista, es posible observar que:

- Para un mismo grado de envejecimiento, energías de compactación inferiores a la de referencia dan lugar a una disminución de la rigidez y a un aumento de la ductilidad,
- Para una misma energía de compactación, si se aumenta el grado de envejecimiento, se obtiene una mezcla con una mayor rigidez, pero disminuye su ductilidad.

Por lo tanto, vemos como el hecho de no alcanzar la energía óptima de compactación, y el hecho de envejecer demasiado la mezcla, dan lugar a efectos opuestos. Por este motivo, se debe ser especialmente cuidadoso a la hora de analizar los resultados.

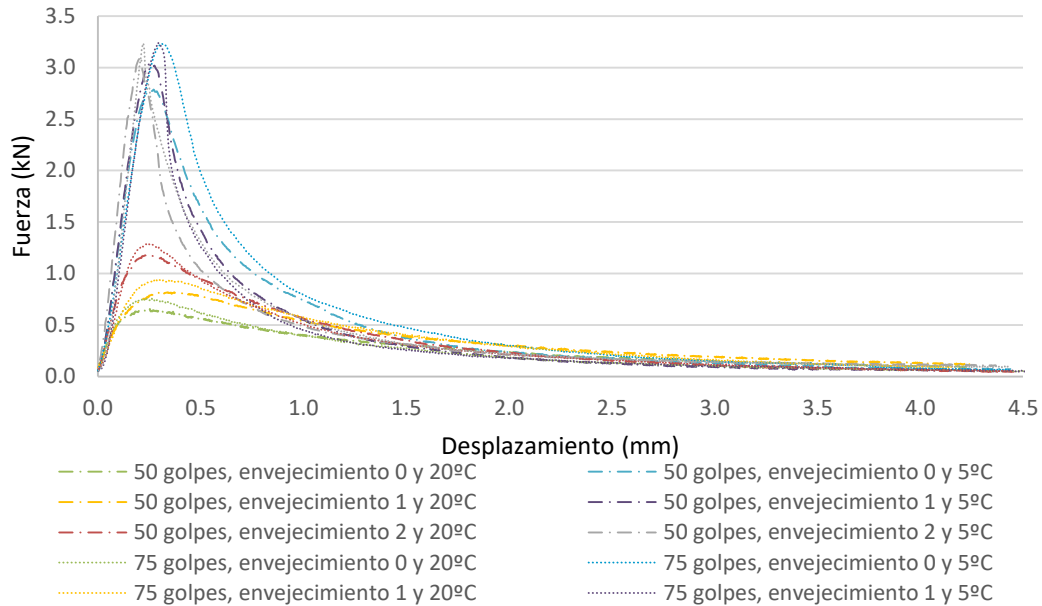


Figura 144. Curvas carga-desplazamiento obtenidas para las mezclas AC16 S

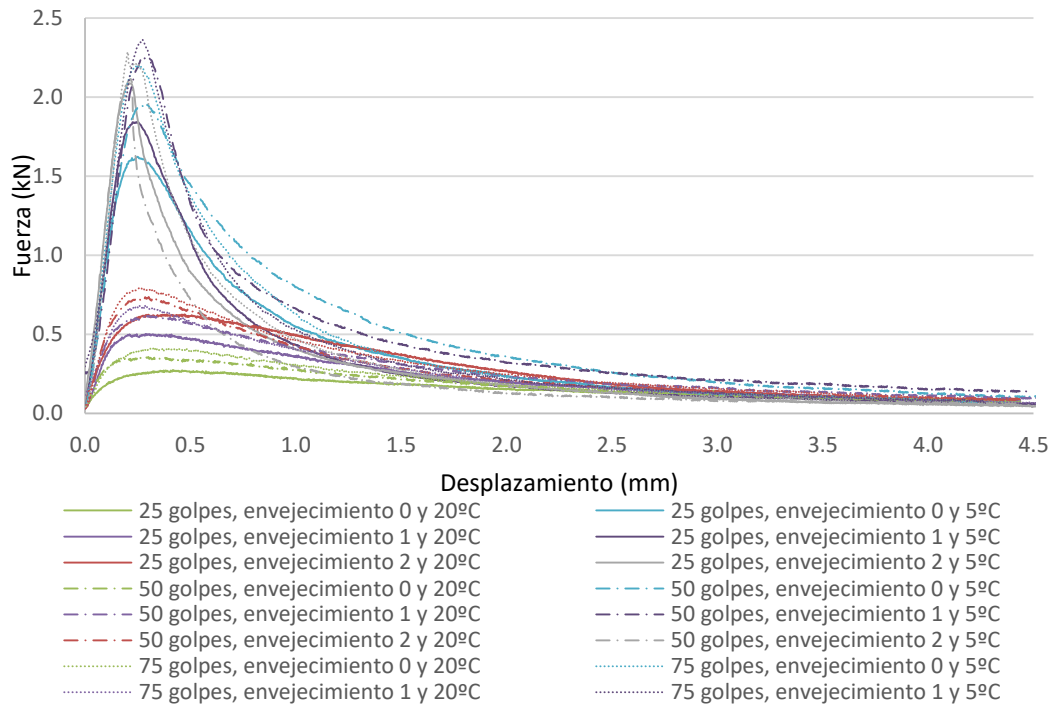


Figura 145. Curvas carga-desplazamiento obtenidas para las mezclas BBTM 8B

4 Análisis de la calidad de la mezcla

Del análisis de los resultados anteriores se puede avanzar que una mezcla tendrá la calidad deseada si se muestra suficientemente resistente, al mismo tiempo que asegure unos valores mínimos de ductilidad. Entonces, se puede hacer un análisis de la calidad de la mezcla si se tiene en cuenta al mismo tiempo los factores que influyen en su comportamiento mecánico (como RTF o IRT) y los de ductilidad (DT o d_{50pm}).

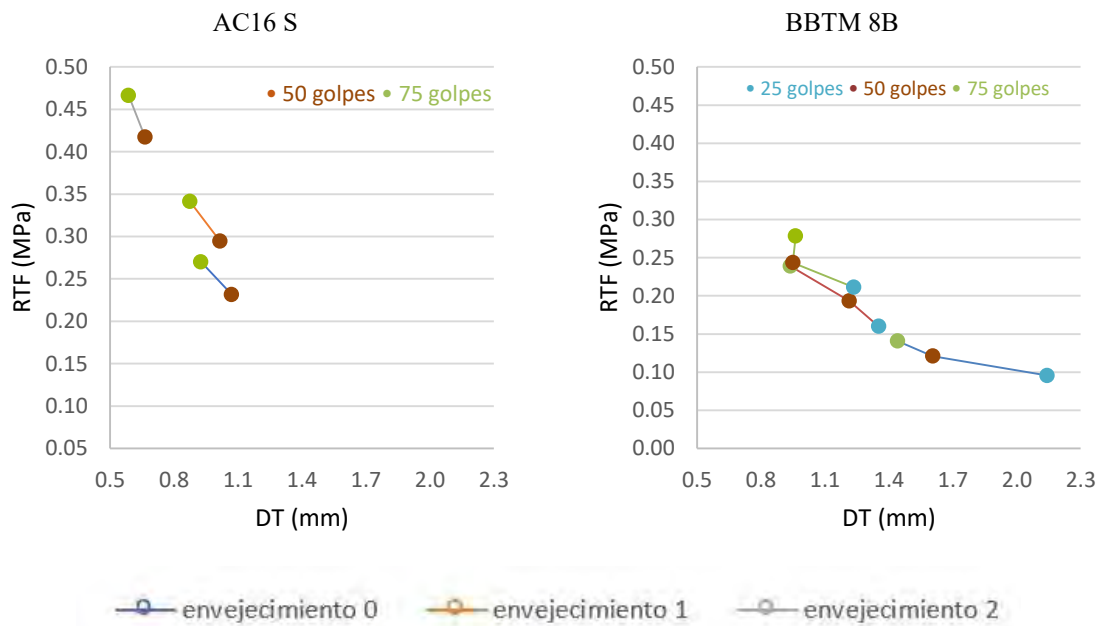


Figura 146. Relación entre las características mecánicas (RTF) y de ductilidad (DT) a 20°C

En la Figura 146 se puede apreciar cómo, en las mezclas AC, el envejecimiento tiene más efecto sobre las propiedades mecánicas, mientras que su ductilidad no se ve tan influenciada. Por el contrario, en las mezclas BBTM, que son más dúctiles, el efecto del envejecimiento sobre su ductilidad es mayor, tanto respecto al envejecimiento tipo 1 como respecto al envejecimiento tipo 2.

5 Análisis de las variaciones respecto al valor patrón

En este apartado se analiza y propone un método de control de calidad en la elaboración y puesta en obra de las mezclas bituminosas. Para ello, se considerarán como valores patrón los obtenidos para las probetas no envejecidas y compactadas a 75 golpes por cara en el caso de las AC y a 50 golpes por cara en el caso de las BBTM. Posteriormente, se establecerán las variaciones porcentuales que podrán presentar las mezclas puestas en obra con respecto a los valores patrón para que puedan ser validadas. De este modo, se exigirá que la mezcla presente unos valores mínimos de resistencia a tracción y de ductilidad al mismo tiempo.

En la Figura 7 se observa cómo, en el caso de las mezclas AC, la RTF disminuye cuando se usa una menor energía de compactación y, por tanto, cuando la mezcla tiene una densidad inferior a la de referencia. Esta disminución puede ser de un 15%. Contrariamente, este parámetro tiende a aumentar con el grado de envejecimiento. El IRT sigue unas tendencias similares.

La ductilidad de la mezcla aumenta al disminuir su compactación respecto a la mezcla patrón, pero disminuye con el envejecimiento. Esta disminución no es mayor del 10% al pasar de una mezcla no

envejecida a una que ha padecido el envejecimiento tipo 1, que es el que se puede dar en su elaboración, transporte y puesta en obra.

Teniendo en cuenta que estas variaciones pueden ser mayores en la ejecución de la obra y que los ensayos van a ser realizados sobre testigos, se proponen unos límites mayores para la aceptación de la calidad de la mezcla construida con respecto a la de proyecto. Estos valores se recogen en la Tabla 81 y complementan las especificaciones de densidad que se utilizan actualmente y que se han descrito anteriormente.

Tabla 81. Variación porcentual admitida para las mezclas AC16 S

$RTF > (80 - 85)\% \cdot RTF^*$
$DT > (80 - 85)\% \cdot DT^*$
$IRT > (80 - 85)\% \cdot IRT^*$
$d_{50\mu m} > (80 - 85)\% \cdot d_{50\mu m}^*$

* Valor patrón del parámetro en cuestión

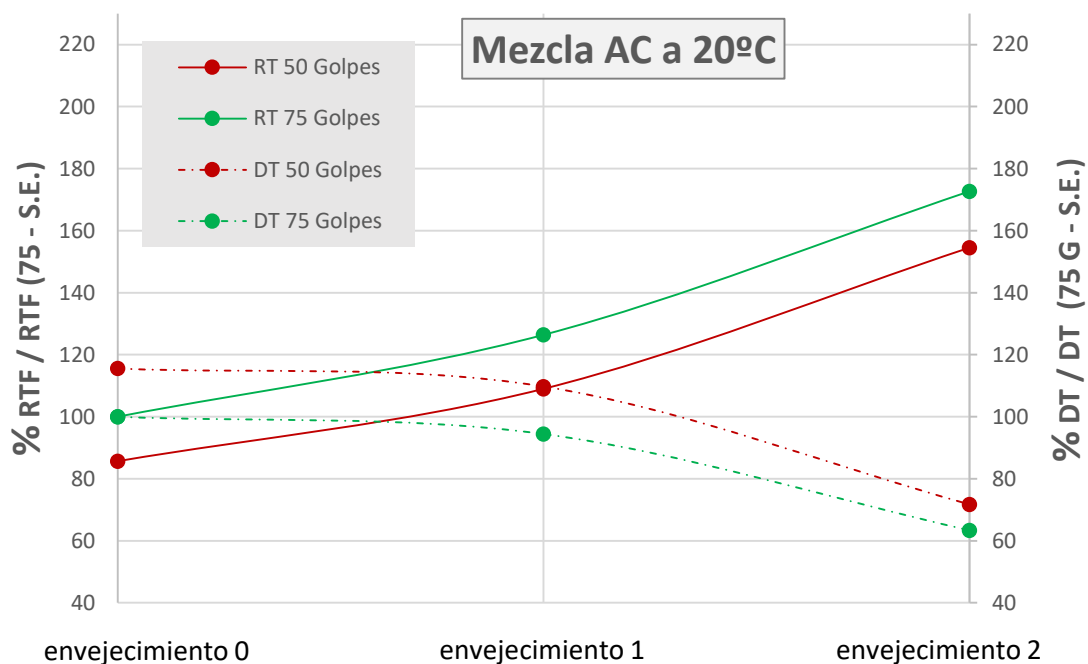


Figura 7. Variación de RTF y de DT con respecto a los valores patrón de una mezcla AC16 S

Por lo que respecta a las mezclas BBTM, el efecto de la posible mala compactación o del envejecimiento es mayor, aunque se observan las mismas tendencias, Figura 8. La pérdida máxima de la RTF respecto al valor patrón ocurre en mezclas compactadas a 25 golpes y sin envejecer. Aunque la disminución observada llega hasta el 30% para el IRT, esto ocurre en probetas de muy baja compactación que se descartarían usando las especificaciones de densidad actuales, así que se podría aceptar una pérdida de las propiedades mecánicas de entre un 20 y un 25%. Los parámetros relacionados con la ductilidad también presentan una mayor disminución, del orden del 30% en mezclas altamente compactadas y envejecidas, por lo que también se podría limitar su variación entre un 20 y un 25%. Los porcentajes admitidos se muestran en la



Tabla 82 y complementan las especificaciones de densidad citadas anteriormente.

Tabla 82. Variación porcentual admitida para las mezclas BBTM 8B

$$RTF > (75 - 80)\% \cdot RTF^*$$

$$DT > (75 - 80)\% \cdot DT^*$$

$$IRT > (75 - 80)\% \cdot IRT^*$$

$$d_{50\mu m} > (75 - 80)\% \cdot d_{50\mu m}^*$$

* Valor patrón del parámetro en cuestión

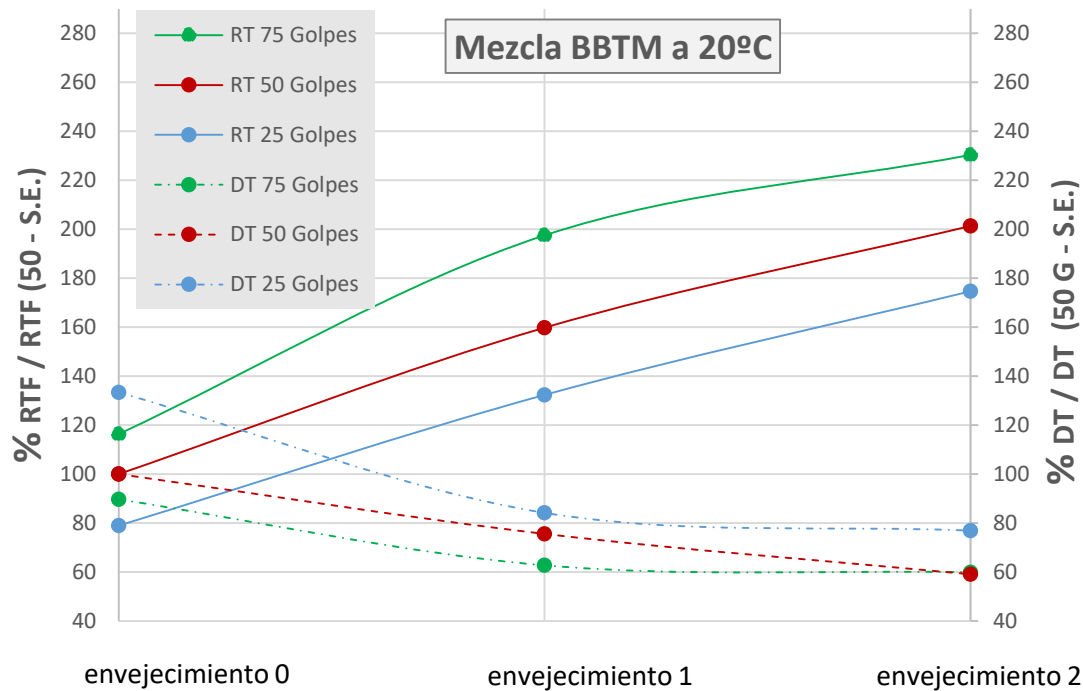


Figura 8. Variación de RTF y de DT con respecto a los valores patrón de una mezcla BBTM 8B

Se puede concluir este apartado recordando que, tal y como se ha visto en la Figura 143, el método utilizado actualmente para establecer el control de calidad aceptaría mezclas que han padecido el envejecimiento tipo 2, siempre y cuando éstas hubiesen sido compactadas a una energía del orden de 50-75 golpes. Por lo tanto, actualmente se estarían aceptando mezclas, tanto AC como BBTM, que pueden llegar a mostrar valores de sus parámetros representativos de la ductilidad (DT o $d_{50\mu m}$) de aproximadamente el 60% del valor de referencia.

6 Conclusiones

En el presente trabajo se ha podido comprobar de un modo experimental como el procedimiento que se utiliza habitualmente para controlar la calidad de la mezcla, que es el de comparar la densidad de un testigo con la de proyecto, no permite conocer si la mezcla ha sido envejecida o no durante el proceso de fabricación, transporte y puesta en obra.

De este modo, se ha considerado que es necesario estudiar el efecto que tiene el envejecimiento con un ensayo capaz de cuantificarlo y que por tanto se pueda usar para poder establecer el control del producto. Se ha optado por el uso del ensayo Fénix que, como se trata de un ensayo a tracción a deformación controlada, permite estudiar la ductilidad de la mezcla.

Una vez obtenidos los resultados, se ha podido comprobar cómo, efectivamente, el ensayo Fénix permite observar como las propiedades de las mezclas cambian en función del grado de envejecimiento y de la energía de compactación, por lo que es posible afirmar que la calidad de las mezclas depende de estos dos factores. Después de analizar las curvas, se ha visto que un mayor envejecimiento da lugar a mezclas más resistentes y rígidas, aunque por otro lado se ha podido comprobar como este factor afecta

negativamente a la ductilidad de la mezcla. Por este motivo, se puede afirmar que, en el proceso de ejecución, la ductilidad de la mezcla se puede ver muy afectada.

Seguidamente, se ha podido constatar que es posible hacer un análisis de la calidad de la mezcla si se tienen en cuenta al mismo tiempo los parámetros indicadores de lo que sucede en la zona pre-pico, como RTF o IRT, con los que dan información sobre lo que sucede en la zona post-pico, como DT o d_{50pm} .

Es importante remarcar que, con el método actual de control de calidad, mezclas tan frágiles como las que han padecido un fuerte envejecimiento serían aceptadas siempre y cuando hubiesen sido compactadas a energías del orden de 50 o 75 golpes. Entonces, resulta conveniente establecer unas nuevas limitaciones de acuerdo con los resultados obtenidos mediante el ensayo Fénix que permitan detectar cuando una mezcla ha padecido un envejecimiento excesivo durante su proceso de elaboración, transporte y puesta en obra.

Para lograr el objetivo, se han fijado las variaciones porcentuales de los parámetros RTF, IRT, DT y d_{50pm} que pueden presentar los testigos de un pavimento puesto en obra con respecto a las muestras patrón para que sea posible aceptar su calidad.

7 Referencias

- [1] De la Roche, C.; Van der Ven, M.; Van de Bergh, W.; Gabet, T.; Dubois, V.; Grenfell, J. & Porot, L. (2009). *Development of a laboratory bituminous mixtures ageing protocol*. Advanced Testing and Characterization Materials.
- [2] Van der Bergh, W. (2012). *The effect of ageing on the fatigue and healing properties of bituminous mortars*. Procedia Soc. Behav. Sci. 53.
- [3] Ministerio de Fomento (2008). 542. *Mezclas bituminosas tipo hormigón bituminoso* y 543. *Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas*. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3).
- [4] Pérez-Jiménez, F.; Valdés, G.; Miró, R.; Martínez, A. & Botella, R. (2010). *Fénix test: Development of a new test procedure for evaluating crackin resistance in bituminous mixtures*. Transportation Research Records: Journal of the Transportation Reserach Board, no. 2181, Transportation Research Board.
- [5] Miró, R.; Martínez, A.; Pérez-Jiménez, F.; Botella, R. & Valdés, G. (2012). *Assessment of cracking resistance of bituminous mixtures by means of Fenix test*. In: Proc. of the 7th RILEM International Conference On Cracking in Pavements, vol. I.
- [6] F. Pérez-Jiménez, F.; Botella, R.; Martínez, A. & Miró R. (2013). *Analysis of the mechanical behaviour of bituminous mixtures at low temperatures*. Construction and Building Materials, no. 46.
- [7] Valdés, G.; Calabi, A. Sánchez, E.; Pérez-Jiménez, F. & Miró, R. (2015). *Evaluación del efecto de la forma y textura de los áridos sobre la resistencia a fisuración de las mezclas asfálticas*. XVIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Bariloche, Argentina.
- [8] Miró, R.; Pérez-Jiménez, F.; Martínez, A. & Botella, R. (2015). *Diseño de mezclas discontinuas para capas de rodadura a partir de la determinación de su resistencia a la fisuración y energía de fractura mediante el ensayo Fénix*. XVIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Bariloche, Argentina.