

INFLUENCIA DE LAS SEGREGACIONES TÉRMICAS EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LA MEZCLAS BITUMINOSAS.

Botella Nieto, Ramón
Universidad Politécnica de Cataluña
Barcelona, España.
ramon.botella@upc.edu

Pérez Jiménez, Félix E.
Universidad Politécnica de Cataluña
Barcelona, España.
edmundoperez@upc.edu

Martínez Reguero, Adriana H.
Universidad Politécnica de Cataluña
Barcelona, España.
adriana.martinez@upc.edu

García Santiago, Jacinto L.
SACYR, S.A.U, Grupo Sacyr Vallerhermoso, S.A.
Madrid, España.
jsantiago@gruposyv.com

Resumen

En el marco del Proyecto FENIX, financiado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial, el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, junto a las empresas Sacyr y Sorigué, ha realizado un estudio sobre la influencia de los gradientes térmicos en el extendido en las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas. En primer lugar, las empresas participantes realizaron extendidos durante los cuales la temperatura de salida del equipo de las mezclas bituminosas fue controlada mediante el uso de cámaras termográficas de infrarrojos. Aquellas áreas en las que se detectaron gradientes térmicos relevantes fueron marcadas, para una posterior extracción de testigos. Estos testigos fueron analizados, distinguiendo entre aquellos provenientes de zonas a temperatura menor a la deseada (fríos) y zonas a temperatura normal de extendido (calientes). Los ensayos empleados para la caracterización mecánica de los testigos fueron el ensayo de tracción indirecta a 15°C, el ensayo de determinación del módulo de rigidez a tracción indirecta a 20°C y el ensayo de tracción directa Fénix a 20°C, desarrollado recientemente por el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña (Pérez et al., 2009). Los resultados mostraron que mientras la mezclas de tipo G apenas experimentaron cambios con la variable de estudio, las de tipo S obtuvieron mayores resistencias a mayores temperaturas superficiales de compactación.

INTRODUCCIÓN

Una de las problemáticas más importantes en lo que a homogeneidad de la temperatura de extendido de la mezcla bituminosa se refiere, es el tiempo de transporte de ésta desde la planta donde se fabrica hasta el lugar donde debe ser extendida. Durante este periodo de tiempo, la capa superior de mezcla que está en contacto directo con el aire, sufre un enfriamiento acelerado, lo cual da lugar a la formación de lo que comúnmente se denomina costra fría (Figura 1).

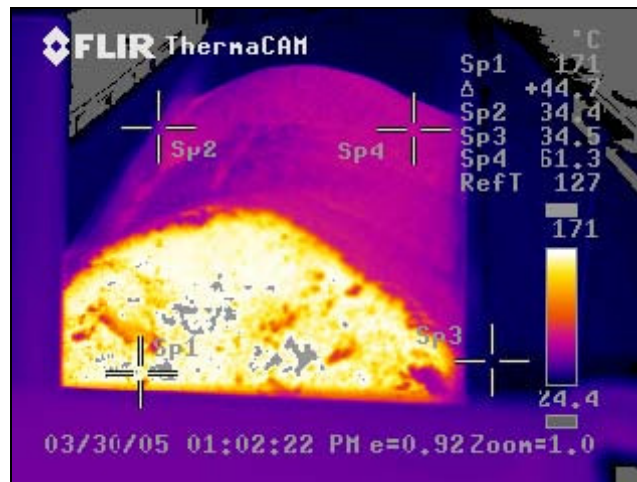


Figura 1: Aparición de costras frías durante el periodo de transporte. Imagen tomada con cámaras termográficas de infrarrojos, cortesía de Sacyr

Cuando se procede a la descarga del material en la extendedora, o en una unidad transfer, el reamasado de la mezcla a lo largo de todo el proceso hasta su extendido, tiene como objetivo distribuir el material procedente de la costra y así homogeneizar la temperatura de la mezcla.

Con todo y con eso, recientes estudios (Proyecto FENIX, 2008) han puesto de manifiesto que esta homogeneización no es lo suficientemente efectiva como para evitar la aparición de segregaciones térmicas en la mezcla una vez extendida (Figura 2).

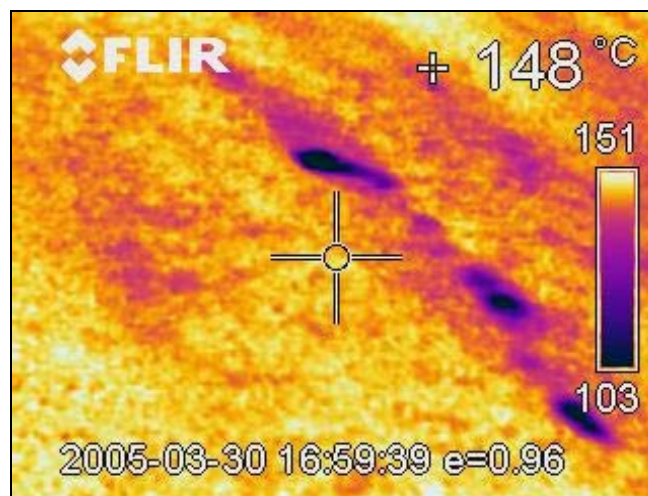


Figura 2: Restos de costras frías en la mezcla extendida. Imagen tomada con cámaras termográficas de infrarrojos, cortesía de Sacyr

Varios estudios (Botella et al., 2008) indican que la temperatura de compactación juega un papel importante en el comportamiento mecánico de las mezclas bituminosas. Esta influencia depende del tipo de mezcla estudiada, pero en general, la tendencia muestra que a mayor temperatura de compactación mayor densidad final y mayores resistencias obtenidas en los ensayos mecánicos.

Por otro lado, la densidad no es la única variable que afecta a la resistencia de la mezcla, ya que se ha demostrado (Recasens Miró et al., 2000) que aunque sea posible obtener densidades similares compactando a temperaturas más bajas, la mezcla final no obtiene las mismas resistencias a tracción indirecta.

Por todo ello el objetivo de este estudio es el de analizar el efecto que estas segregaciones térmicas en el extendido tienen sobre el comportamiento mecánico de la mezcla final.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El estudio se dividió en dos partes, los trabajos de campo y los ensayos de laboratorio. Posteriormente se relacionaron los resultados obtenidos en ambas fases.

Para la realización de los trabajos de campo fue necesario el empleo de dos aparatos de avanzada tecnología.

En primer lugar se emplearon cámaras termográficas de infrarrojos para detectar segregaciones térmicas en el extendido de la mezcla. Estas cámaras funcionan basándose en el fenómeno de que todo cuerpo que se encuentre a una temperatura superior al cero absoluto emite radiación. Esta radiación tiene una longitud de onda mayor a la máxima que puede percibir el ojo humano. La cámara termográfica está equipada con multitud de sensores que son capaces de detectar este tipo de radiación (infrarroja); cada uno de estos sensores informa de la cantidad de radiación recibida. Por lo tanto, asignado un valor proporcional a cada nivel de radiación recibido por cada sensor y mediante un software de post-proceso gráfico, se obtiene una imagen en escala de colores donde los más oscuros se asocian a los valores inferiores de radiación y viceversa. Por último, calibrando la cámara con un cuerpo a una temperatura conocida, es posible obtener una imagen en tiempo real de la temperatura superficial de un objeto (Falco, 2009).



Figura 3: Cámara termográfica empleada (FLIR ThermoCAM T-series)

Para establecer la diferencia en densidades entre la mezcla bituminosa segregada y la mezcla a temperatura normal de extendido se emplearon aparatos PQI (Pavement Quality Indicator).

Este aparato genera un campo eléctrico toroidal en el material del cual se desea obtener la densidad. Este campo eléctrico es detectado por el propio aparato. La densidad se determina a partir de cambios en este campo eléctrico debidos a la impedancia eléctrica del material, la cual es función de la constante dieléctrica de material y del aire atrapado en sus huecos. Como la constante dieléctrica del aire es mucho más baja que la del material bituminoso, a medida que la compactación aumenta la constante dieléctrica conjunta, que es la que mide el aparato, aumenta. Por lo tanto, con la debida calibración es posible determinar la densidad del material bituminoso con una medida que apenas llega los 3 segundos (Sawchuk, 1998).



Figura 4: Aparato PQI (Pavement Quality Indicator 301)

En primer lugar se escogieron varias obras en las que se extendería la mezcla bituminosa para realizar el estudio. Durante el extendido se controló en tiempo real la aparición de segregaciones térmicas, mediante el empleo de cámaras termográficas (Figura 3).

En aquellos lugares en los que se detectó la presencia de segregaciones térmicas de un tamaño considerable, se realizó un perfil de densidades mediante el aparato PQI y se señaló la zona para una posterior extracción de testigos tanto del área segregada como del área a temperatura normal de extendido (Figura 5).

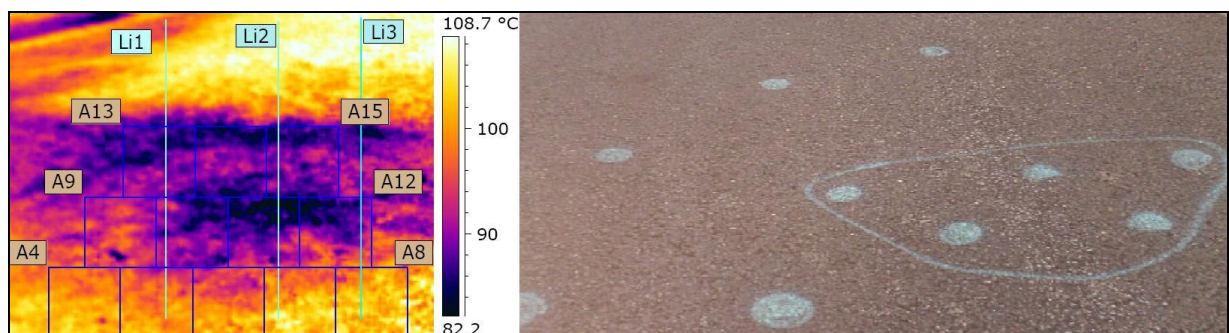


Figura 5: Termografía y área marcada para la extracción de testigos

Los testigos extraídos fueron sometidos a diferentes ensayos mecánicos en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña con objeto de detectar diferencias en sus propiedades en función de su pertenencia o no a un área segregada térmicamente.

Los ensayos empleados para la caracterización mecánica de los testigos fueron el ensayo de tracción indirecta, el ensayo de determinación del módulo de rigidez a tracción indirecta y el nuevo ensayo Fénix.

El ensayo de tracción indirecta consiste en cargar una muestra cilíndrica, igual a la definida para el ensayo Marshall, con una carga de compresión diametral a lo largo de dos generatrices opuestas (Figura 6). Esta configuración de carga, que puede ser sencilla o repetida, provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical y esta tracción es la que agota la probeta y desencadena la rotura en el plano diametral.

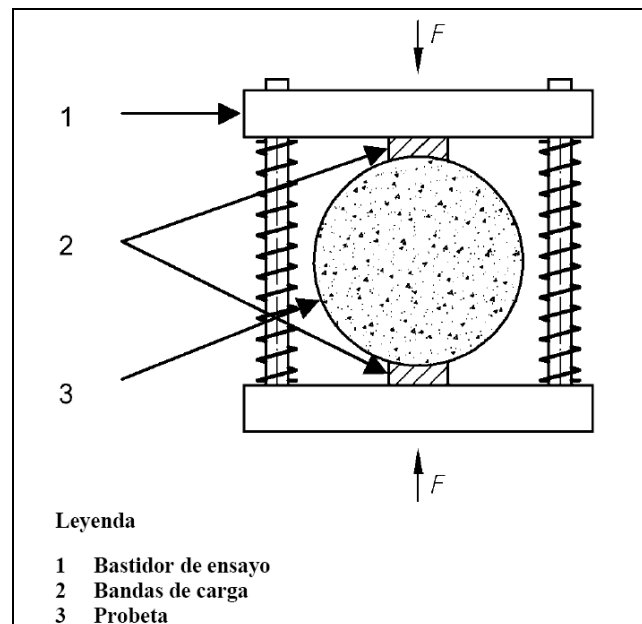


Figura 6: Configuración de la carga en el ensayo de tracción indirecta

El parámetro a medir es la resistencia a tracción indirecta de cada probeta (Ecuación 1). También se puede determinar el desplazamiento vertical y la deformación horizontal del diámetro de la probeta durante la realización del ensayo si se dispone de los sistemas necesarios para medirlos. El procedimiento se usa tanto para probetas fabricadas en laboratorio como para testigos extraídos del pavimento.

$$ITS = \frac{2P}{\pi D H} \quad (1)$$

Para realizar el ensayo a carga estática se empleó la norma europea UNE-EN 12697-23 *Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas bituminosas a 15°C* y a una velocidad de 50 mm/min.

El ensayo de determinación del módulo de rigidez a tracción indirecta (UNE-EN 12697-26) consiste en aplicar un pulso de carga de forma semisenoidal seguido de un periodo de reposo (Figura 7) y registrar la deformación horizontal que sufre la muestra.

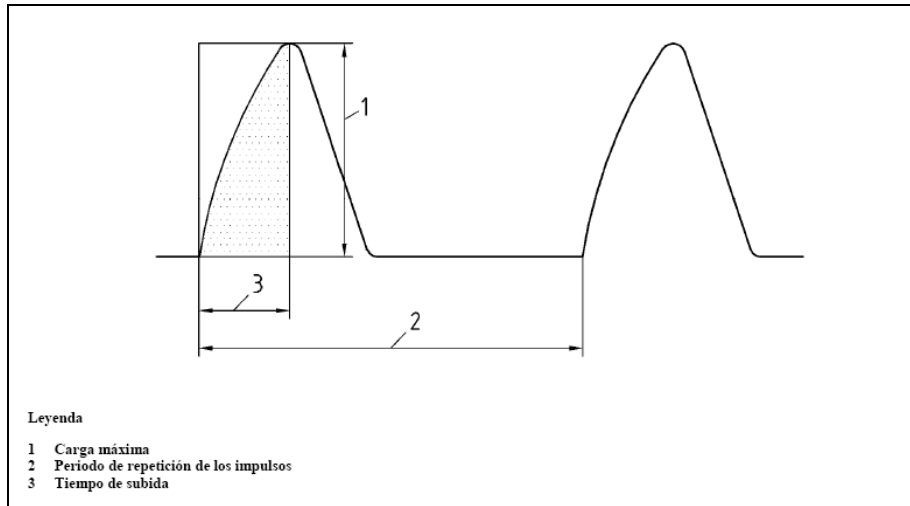


Figura 7: Forma del impulso de carga, mostrando el tiempo de subida y el periodo de reposo

El ensayo Fénix (Pérez et al., 2009) consiste en someter media probeta Marshall o testigo a un esfuerzo de tracción directa. En el caso de las probetas Marshall, el procedimiento de fabricación y compactación sigue la misma metodología establecida por el método Marshall. Luego, la probeta o testigo se secciona por la mitad y se le induce una fisura mediante una entalladura en la parte central, tal como se ilustra en la Figura 8. Posteriormente, mediante el uso de una resina epoxi, se fijan a las dos secciones de la cara plana separadas por la entalladura, unas placas de acero. Estas a su vez son fijadas a los soportes de la prensa mediante dos pernos, que permiten un movimiento de rotación respecto a estos, de acuerdo a lo ilustrado en la Figura 9.



Figura 8: Probeta ensayo Fénix

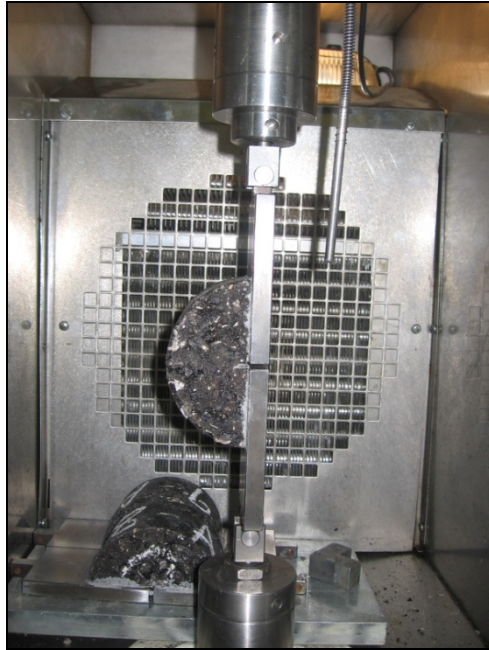


Figura 9: Montaje ensayo Fénix

El ensayo consiste en someter las probetas semicirculares a un ensayo simple de tracción directa a una temperatura de 20°C. Para la realización del ensayo se utiliza una prensa dinámica que dispone de una cámara capaz de controlar la temperatura con una precisión de $\pm 1^\circ\text{C}$.

El ensayo se realiza mediante control de desplazamiento del pistón, aplicando un desplazamiento a una velocidad constante de 1 mm/min hasta llegar a la rotura total de la probeta.

Una vez registrados los datos por el equipo informático se procede a graficar las cargas registradas en función de su desplazamiento para calcular el valor de la energía disipada (G_D) mediante el cálculo del trabajo total de fractura (W_T), dividido por el área de fractura (A_F).

Una de las principales ventajas de este ensayo es que simula el mecanismo de fisuración de las mezclas bituminosas, mediante su principal modo de propagación de fisura. Otra gran ventaja es la facilidad para realizar el ensayo, tanto a probetas Marshall como a testigos extraídos.

ESTUDIO EXPERIMENTAL

Las mezclas ensayadas fueron tres, dos mezclas tipo G-20 fabricadas con betunes 60-70 y 40-50, y una mezcla tipo S-20 con un betún 40-50. En la Tabla 1 se muestran las características detalladas de las tres mezclas.

Tabla 1: Mezclas estudiadas

Mezcla	Granulometría	Ligante	Contenido de ligante s.a. (%)
1	G-20	60-70	4.1
2	G-20	40-50	4.2
3	S-20	40-50	4.6

Para cada mezcla se ensayaron a tracción indirecta, mediante el ensayo de determinación del módulo de rigidez y el ensayo Fénix, testigos procedentes de diferentes zonas de extendido. Éstos a su vez, dentro de cada zona, fueron diferenciados entre aquellos provenientes de áreas a temperatura normal de extendido y áreas segregadas térmicamente.

Los resultados obtenidos de resistencias a tracción indirecta (RTI) muestran que existe una tendencia generalizada que otorga a los testigos pertenecientes de áreas a mayor temperatura superficial una mayor resistencia a tracción indirecta, aún cuando las diferencias en densidades de testigos son mínimas, como es el caso de la mezcla 1 tipo G-20 fabricada con un betún 60-70 (Figura 10).

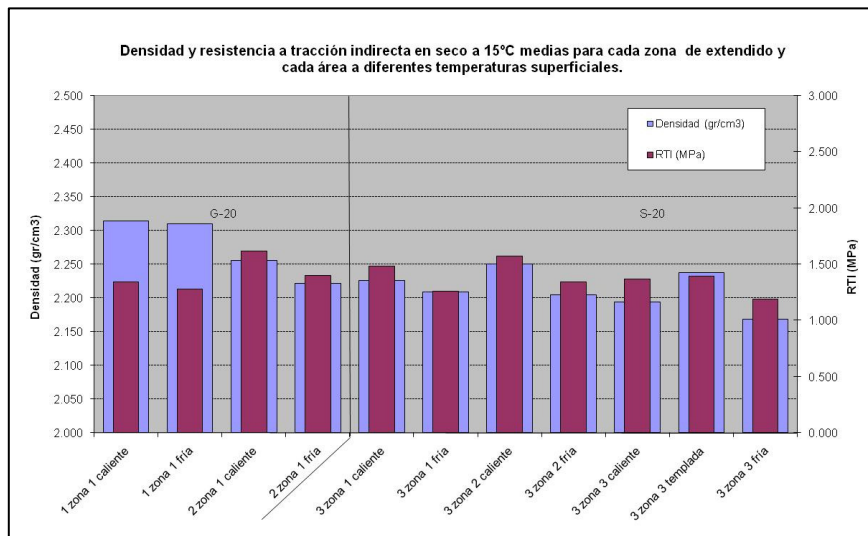


Figura 10: Resultados obtenidos en los ensayos de tracción indirecta

Los valores obtenidos para los módulos de rigidez muestran la misma tendencia. En concreto, para la mezcla 1, se hace aun más evidente como testigos con menor densidad obtienen mayores módulos al ser compactados a mayor temperatura (Figura 11).

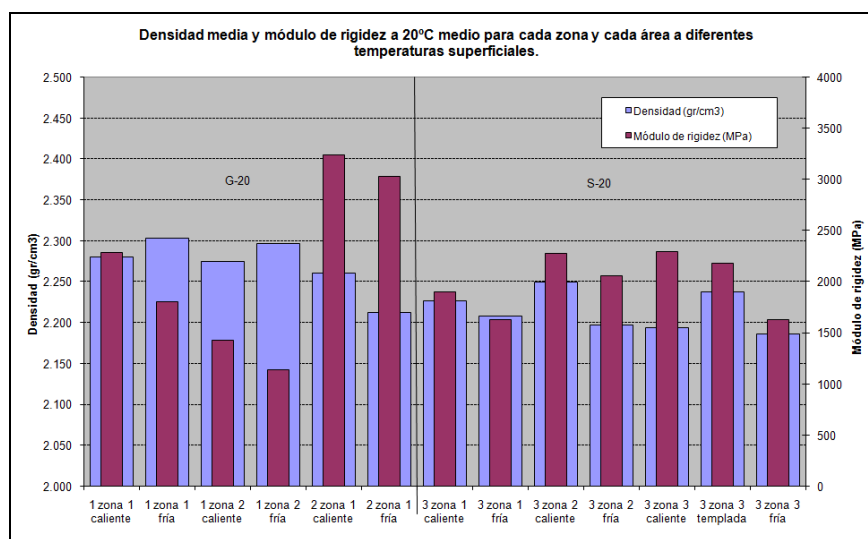


Figura 11: Resultados obtenidos en los ensayos de determinación del módulo de rigidez a tracción indirecta.

El ensayo Fénix sirvió para corroborar los resultados ya obtenidos, ya que de nuevo en la mayoría de los casos, los testigos compactados a mayores temperaturas mostraron valores superiores de la tensión máxima y de la energía disipada durante el proceso (Figura 12 y Figura 13). Los únicos testigos que se desviaron de la tendencia general fueron los procedentes de la mezcla 1, G-20 con betún 60-70, extendida en la zona 1. Esto puede ser debido a que la mezcla G-20 sea menos sensible a la temperatura de compactación. Por otro lado, se debe hacer notar que las temperaturas recogidas por las cámaras termográficas corresponden la capa más superficial de la mezcla y que por debajo no podemos asegurar que la temperatura sea la misma.

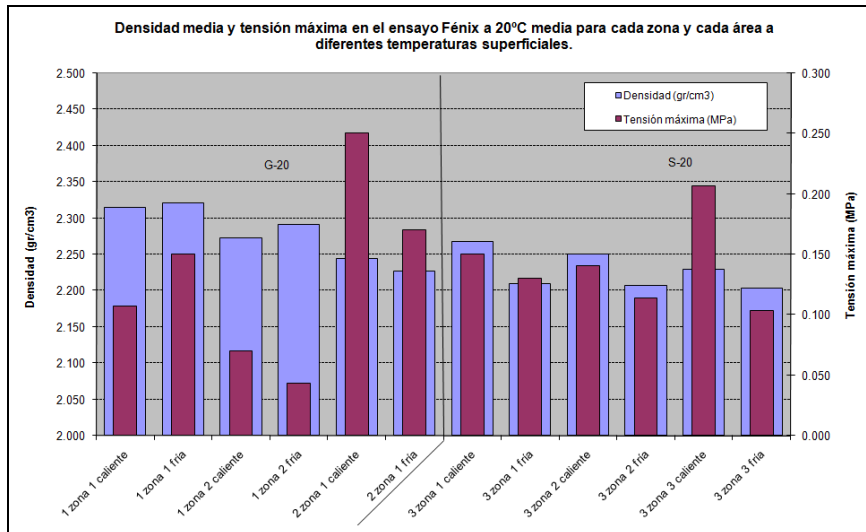


Figura 12: Resultados obtenidos en los ensayos Fénix. Tensión máxima

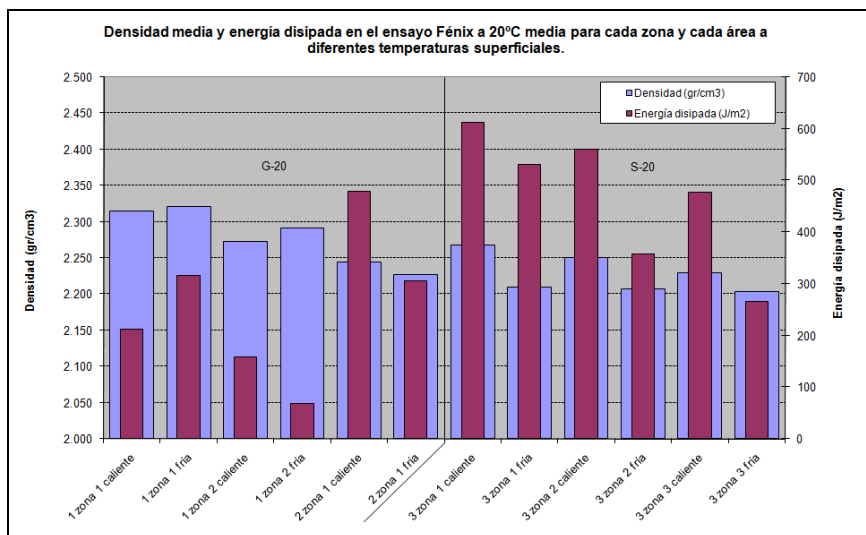


Figura 13: Resultados obtenidos en los ensayos Fénix. Energía disipada

CONCLUSIONES

Después de analizar los resultados obtenidos, se observa que, para las mezclas estudiadas, la presencia de segregaciones térmicas en el extendido contribuye a disminuir sensiblemente las características mecánicas de la mezcla bituminosa. Se han empleado tres ensayos que actúan de tres formas diferentes y todos ellos han mostrado resultados equivalentes. Bajo esfuerzos a tracción directa e indirecta los resultados han establecido que los testigos provenientes de las

áreas a menor temperatura superficial de extendido han experimentado una disminución significativa en sus prestaciones mecánicas, aun cuando las diferencias en densidades son mínimas.

AGRADECIMIENTOS

La realización del Proyecto Fénix (www.proyectofenix.es) ha sido posible gracias a la contribución financiera del Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI) dentro del marco del programa Ingenio 2010 y, más concretamente, a través del Programa CENIT. Las empresas y centros de investigación que participan en el Proyecto desean mostrar su gratitud por dicha contribución.

Los autores quieren agradecer a todas las organizaciones y empresas participantes del Proyecto Fénix: Centro de Investigación Elpidio Sánchez Marcos (CIESM), Centro Zaragoza, Construcciones y Obras Llorente (Collosa), Ditecpesa, Asfaltos y Construcciones Elsan, Intrame, Pavasal, Repsol YPF, Sacyr, Serviá Cantó, Sorigué, CARTIF, CEDEX, CIDAUT, CSIC (IIQAB), GIASA, Intromac, Labein, Universidad de Alcalá de Henares, Universidad Carlos III de Madrid, Universidad de Castilla La Mancha, Universidad de Huelva, Universidad de Cantabria, Universidad Politécnica de Cataluña, Universidad Politécnica de Madrid, y a sus numerosos colaboradores cuya capacidad de trabajo y eficacia están permitiendo el desarrollo de este Proyecto en un ambiente de cooperación.

REFERENCIAS

- Botella, R.; Valdés, G. A.; Martínez, A. (2008). “Aplicación del ensayo de tracción indirecta para la caracterización de mezclas bituminosas en caliente de acuerdo a la nueva normativa europea.” *VIII Congreso Nacional de Firms*, Valladolid, 2008.
- Falco, C. M. (2009). “High resolution digital camera for infrared reflectography”, *Review of Scientific Instruments* 80.
- García Santiago, J. L., García, C., Buisson, J., Cortés, C., Potti, J. J. (2008). “Pavimentos de larga duración”, *VIII Congreso Nacional de Firms*, Valladolid.
- Pérez, F.E., Valdés, G.A., Botella, R. (2009). “Experimental study on resistance to cracking of bituminous mixtures using the Fénix Test”, *7th International RILEM Symposium on Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials*.
- Proyecto FENIX (2008). “Inventario clasificado de fallos prematuros y sus causas”, Entregable 6.1, Tarea 6: Pavimentos de larga duración, SACYR.
- Recasens Miró, R., Pérez Jiménez, F., Martínez, A. (2000). “Quality specifications for bituminous mixtures using the Indirect Tensile test”, *2nd Euroasphalt & Eurobitume Congress*, Barcelona.
- Sawchuk, P. (1998). “Pavement Quality Indicator Field Operational Testing and Product Transfer”, NCHRP-47 Final Report, Transportation Research Board.