

**EMPLEO DE GELES DE  
SÍLICE COMO ZEOLITAS  
PARA LA FABRICACIÓN  
DE MEZCLAS  
SEMICALIENTES**

**SANTIAGO GIL REDONDO**  
DITECPESA

**ELSA SÁNCHEZ ALONSO**  
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA (GITECO)



---

# EMPLEO DE GELES DE SÍLICE COMO ZEOLITAS PARA LA FABRICACIÓN DE MEZCLAS SEMICALIENTES

---

## RESUMEN

Una de las vías para la fabricación de mezclas bituminosas es el empleo de zeolitas que debido a su estructura química son capaces de absorber agua, que posteriormente es liberada en la mezcla asfáltica. Este hecho produce la espumación de betún durante los procesos de fabricación, extendido y compactación del aglomerado, que provoca una reducción de la viscosidad de la mezcla asfáltica y por lo tanto permite reducir las temperaturas de trabajo.

Existen zeolitas comerciales para esta aplicación, que han sido evaluadas en este trabajo; pero además se ha estudiado la posibilidad de emplear geles de sílice para este mismo fin, debido a sus propiedades químicas y a sus capacidades de absorción y liberación de agua.

En primer lugar se han caracterizado estos compuestos, mediante la determinación de las isotermas de adsorción en N<sub>2</sub>, termogravimetría y la capacidad de adsorción de agua.

Posteriormente se han fabricado mezclas asfálticas con granulometría AC16Surf S empleando como aditivo zeolitas comerciales y distintas geles de sílice. Esta fabricación se ha llevado a cabo a diferentes temperaturas de envuelta y compactación. Se ha utilizado la máquina giratoria para determinar la compactabilidad de las mezclas, calculando el índice de compactación CEI para todas las mezclas fabricadas a sus distintas temperaturas.

También se han realizado ensayos mecánicos para medir la sensibilidad al agua y los módulos de rigidez en las mezclas. Se han ensayado mezclas del tipo AC16Surf con y sin aditivos a tres temperaturas de ensayo. Con ello se pretende determinar si es posible conseguir mezclas que precisando una menor energía de fabricación y compactación, mediante el empleo de aditivos tipo zeolitas, cumplan los mismos requisitos exigibles a una mezcla en caliente convencional.

## ANTECEDENTES

El presente trabajo pertenece a una de las líneas de investigación llevadas a cabo en el Proyecto Fénix: la Actividad 7 (Mezclas Semicalientes). En esta actividad participan las empresas: Ditecpesa, Pavasal, Elsan, Serviá Cantó, CIESM y Repsol; y las universidades: Universidad de Alcalá, Universidad Politécnica de Cataluña, Universidad de Cantabria y Universidad de Huelva.

## INTRODUCCIÓN

Las mezclas semicalientes son aquellas que se fabrican a menores temperaturas que una mezcla convencional, siendo el ligante utilizado un betún de penetración convencional. Para lograr esta disminución de la temperatura de trabajo, se pueden utilizar aditivos que reduzcan la viscosidad del ligante, el uso de aditivos que reduzcan la tensión super-

ficial, ayudando a mejorar la envuelta de los áridos, o mediante el empleo de diferentes tecnologías que ayuden a espumar el ligante (Gil et al., 2010). Entre estas últimas se encuadran las zeolitas.

Las zeolitas al ser añadidas sobre la mezcla bituminosa, liberan el agua que contiene en su estructura y produce el espumado del betún. Este espumado hace que su viscosidad sea menor y envuelva más fácilmente los áridos, logrando a su vez que la trabajabilidad de la mezclas sea mejorada reduciendo las temperaturas de fabricación y compactación (D'Angelo et al., 2008). En la actualidad existen dos zeolitas comerciales, Aspha-Min® patentado por Eurovia Services GmbH y usada en Europa y, Advera®WMA, perteneciente a PQ Industries y, utilizada en USA. Se diferencian en el contenido de agua en su estructura, el 21% de su masa en la primera y del 18% al 22% en la segunda.

Las zeolitas (Figura 1 y Figura 2) son mallas moleculares de aluminosilicatos, formadas por tetraedros de  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  y  $[\text{AlO}_4]^{5-}$ , que se unen por átomos de oxígeno (Rodríguez, 2004). Debido a su estructura porosa poseen capacidad de intercambio iónico, que viene dada por la descompensación eléctrica, con lo que incorporan cationes para mantener la electroneutralidad. También puede acomodar en su estructura otras moléculas, como el agua, dependiendo del tamaño de poro (Higueras y Oyarzun, 2003); (Rodríguez, 2004). Las zeolitas comerciales más comunes presentan una estructura A o X, que varían en el tamaño de poro entre otras cosas. Las de tipo A (Figura 3), presentan tamaños de poro entre 3-5Å, en cambio las de tipo X (Figura 4) tienen unos 8Å aproximadamente, aunque este tamaño varía dependiendo del contra-ión que contengan para lograr la electroneutralidad.

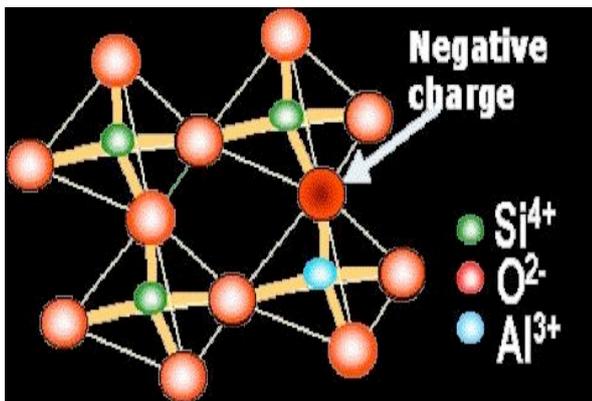


Figura 1. Estructura tetraédrica básica de las zeolitas (IJA, 2007).

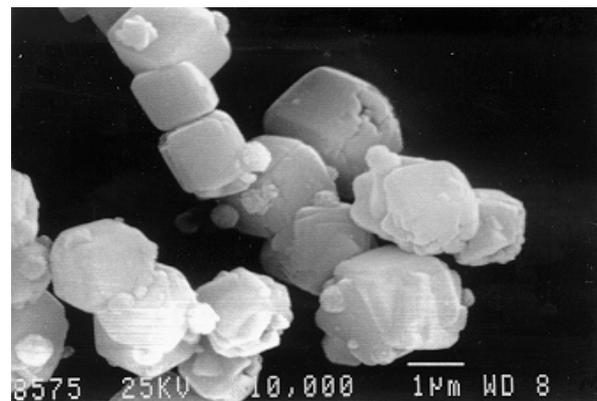


Figura 2. Imagen de una zeolita a través de un microscopio electrónico (Mckeen, 2006).



Figura 3. Estructura de zeolita tipo A (Grace Davison, 2010).



Figura 4. Estructura de zeolita tipo X (Grace Davison, 2010).

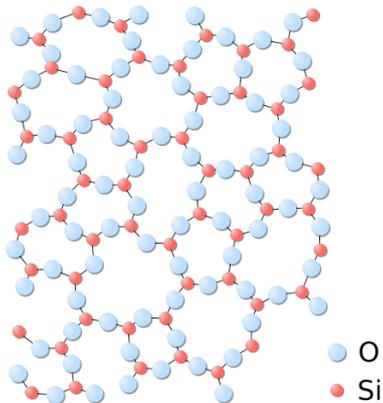


Figura 5. Estructura del óxido de silicio amorfo (Smith et al., 2008).

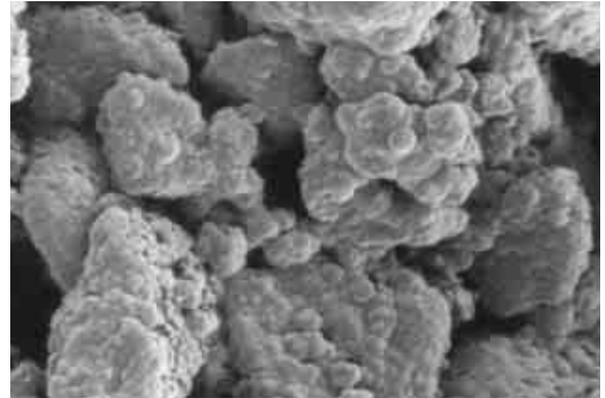


Figura 6. Imagen de una gel de sílice a través de un microscopio electrónico (Grace Davison, 2010).

Los geles de sílice son óxidos de silicio amorfos y muy porosos (Figura 5 y Figura 6), que poseen una gran área superficial (Sáenz et al., 2007). Debido a su porosidad y área superficial, se pueden utilizar para la separación y adsorción de moléculas, aditivos en pinturas, tecnología de membranas e ingeniería molecular, soporte de catalizadores para formar catalizadores heterogéneos, etc. (Peña et al., 2008). El tamaño de poro suele rondar entre los 5Å y los 300Å, dependiendo del proceso de síntesis utilizado (Peña et al., 2008).

En este artículo se ha estudiado la posibilidad de uso de geles de sílice como zeolitas, comparando los resultados obtenidos con los de una mezcla de referencia.

## EQUIPOS EMPLEADOS

### Equipo de adsorción

Las isothermas de adsorción de agua ayudan a conocer la cantidad de agua de equilibrio de un compuesto expuesto a una temperatura y una humedad relativa conocidas (Gálvez et al., 2006).

Antes de realizar el ensayo, las muestras fueron sometidas a un pretratamiento para secarlas. Las muestras de Sílice fueron secadas en una estufa a 110°C y la zeolita fue puesta a vacío y a una temperatura de 200°C, todas ellas durante 20h. El equipo usado para el tratamiento a vacío fue FloVac Degaser de la casa Quantachrome.

Las isothermas de adsorción-desorción a 25°C se efectuaron con el equipo de análisis Hydrosorb Modelo HS-10 de la casa Quantachrome (Figura 7). La humedad relativa del interior del equipo fue aumentando desde un 5% hasta el 95%, a intervalos del 10%. El criterio fijado para el aumento de la humedad fue que la presión no variase más del 0,05mmHg durante 1min, siendo el tiempo de equilibrio de 10min. De esta forma, se asegura que la muestra ha adquirido peso constante para esa humedad relativa. Para el cálculo de la isoterma de desorción se aplicó el mismo criterio, pero disminuyendo gradualmente la humedad relativa.



Figura 7. Equipo para la medida de las isothermas de agua.

### Compactador Giratorio

Para realizar el estudio de la facilidad de compactación de las diferentes mezclas bituminosas, se ha empleado como método de medición la máquina giratoria recogido en la norma UNE-EN 12697-10. Dicha compactadora proporciona información sobre el esfuerzo que es necesario para compactar una probeta y la densidad que va alcanzando en función del número de giros dado.

La fabricación de las mezclas se realizó con el óptimo de ligante y de forma individual en una amasadora mecánica, siendo la duración de cada compactación de 200 giros (UNE-EN 12697-10). La presión vertical que aplica la máquina giratoria fue de 600 kPa con un ángulo de giro de 0,82° y una velocidad de 30 rpm, según marca la norma UNE-EN 12697-31.

La trabajabilidad de las diferentes mezclas fabricadas se ha calculado el índice CEI (Compaction Energy Index), utilizando los resultados obtenidos de las curvas de densificación desde el giro 8 hasta alcanzar el 92% de la densidad máxima, valor que correspondería a la densidad mínima de apertura al tráfico. Cuanto menor sea este coeficiente más fácilmente se compacta la mezcla (Mahmoud y Bahia, 2004).

### Ensayo estático: Sensibilidad al agua

Para estudiar la pérdida de cohesión debida a la saturación y acción del agua en las mezclas bituminosas, se ha realizado el ensayo de sensibilidad al agua que marca la norma UNE-EN 12697-12.

Para ello, se fabricaron 8 probetas de tipo Marshall de forma individual para cada tipo de mezcla y temperatura de estudio. Las probetas se separaron en dos grupos de 4 de forma que cada grupo sea lo más homogéneo posible según su densidad. Uno de los grupos fue conservado en una sala a una temperatura de 20°C y otro fue sumergido en agua a 40°C durante tres días después de haber sido sometido a tratamiento en vacío durante 30 minutos, según indica la norma. Pasado ese tiempo, se procedió a acondicionar las mezclas en una cámara a 15°C durante dos ho-

ras previas al ensayo, rompiendo posteriormente ambos grupos de probetas mediante el ensayo de tracción indirecta según la UNE-EN 12697-23. Para la realización del ensayo se utilizó una prensa universal de tipo estático.

### Ensayo dinámico: Módulo de Rigidez

Para tener una primera aproximación del comportamiento reológico de las mezclas bituminosas, se ha realizado el ensayo del módulo de rigidez (UNE-EN 12697-26:2006), que permite clasificar las mezclas en función de su rigidez y determinar cómo afecta el uso de aditivos y la reducción de la temperatura de fabricación, a sus propiedades. De los diferentes métodos especificados en la norma 12697-26:2006 para caracterizar la rigidez de las mezclas, se ha empleado el recogido en el anexo C: Ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas.

Para cada tipo de mezcla y temperatura se ensayaron 4 probetas Marshall. Estas probetas se mantuvieron a una temperatura constante de 20°C en una sala climatizada al menos durante un período de 24h, como indica la norma UNE-EN 12697-26.

El ensayo se realizó mediante tracción indirecta midiendo la deformación que sufre la probeta en un plano perpendicular al de la aplicación de la carga que pasa por el centro de la probeta. Cada ensayo consta de 16 ciclos de carga a intervalos de 3s, utilizándose para el cálculo los ciclos del 11 al 15.

### MATERIALES Y FÓRMULA DE TRABAJO

Para este trabajo, todas las mezclas fabricadas han sido del tipo AC16Surf S, con una granulometría ajustada al centro del huso. El ligante utilizado fue un B 50/70, en la cantidad óptima obtenida mediante el método Marshall (UNE-EN 12697-30) y el estudio del porcentaje de huecos en mezcla (UNE-EN 12697-8), resultando ser del 4,85% sobre mezcla.

Se trabajó con temperaturas de fabricación y compactación entre 160°C y 120°C en un rango de 20°C, utilizando para ello una amasadora mecánica calorifugada.

A continuación se presenta un breve resumen de los aditivos empleados en este estudio:

- La zeolita es un aditivo utilizado en mezclas bituminosas para descender las temperaturas de fabricación de las mismas, siendo añadido a la mezcla en un 0,3% sobre el peso de la mezcla. Este compuesto posee en su estructura molecular un 20% de agua de hidratación. Al calentarse la mezcla a una temperatura de entre 85 y 180°C, el agua contenida de su estructura se libera causando una expansión volumétrica del betún que dará como resultado la aparición de espuma de betún, permitiendo mejorar la manejabilidad de la mezcla y la compactación, así como la cubrición de los áridos por el ligante a temperaturas más bajas que la de las mezclas calientes (Button et al., 2007).
- Gel A es una sílice amorfa sintética que se presenta en forma de polvo blanco. Su uso habitual es como agente portador de aditivos en alimentos/piensos para diferentes aplicaciones industriales.
- Gel B es una sílice amorfa sintética cuya apariencia es en forma de polvo blanco. Se usa como agente mateante para plástico, papel y tintas de impresión.
- Gel C es una forma amorfa de la sílice en estado granular. Se aplica principalmente en desecadores y como desecante en unidades de vidrio aislante. En condiciones activas, puede desprender calor cuando absorbe agua u otras sustancias.

Para determinar la cantidad a usar de los geles en las mezclas para simular el espumado, se realizó la siguiente metodología: se pesó una cantidad de cada compuesto en un recipiente y se fue añadiendo agua destilada hasta que se comprobó que no absorbía más. De esta forma se determinó qué para Gel A y B la cantidad resultante a añadir fue de 0,02% en peso de la mezcla y para el Gel C de 0,10% s/m.

En el caso de la zeolita, se añadió a la mezcla en la cantidad recomendada por el fabricante (0,3% en peso de la mezcla).

## DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

### 1. Características de las zeolitas y sílices medidas

Se ha obtenido las isothermas de adsorción-desorción de agua de los diferentes compuestos comentados a una temperatura de 25°C en función de la humedad (Figura 8).

El tipo de isothermas que presentan los compuestos estudiados son diferentes, lo que indica que poseen diferente forma de adsorción. La zeolita presenta una isoterma híbrida tipo I, que indica que es un compuesto microporoso y que la adsorción se produce a bajas presiones y en forma de monocapa (García, 2003), presentando un ciclo de histéresis a presiones media-alta, que recuerdan a una isoterma tipo IV, debido a la presencia de mesoporos, dando lugar a una condensación capilar en el adsorbente (Flores et al., 2006); (Hernández et al., 2005). Es decir la zeolita utilizada posee microporos y mesoporos.

En el caso de los geles, el A y B presentan una isoterma tipo V, que lo presentan aquellos compuestos porosos en los cuales la interacción adsorbato-adsorbente es débil, y la adsorción se produce en forma de multicapas (García, 2003). En cambio el gel C presenta una isoterma tipo IV, característico de los sólidos mesoporosos, cuyo proceso de llenado se produciría en forma de multicapas. La diferencia

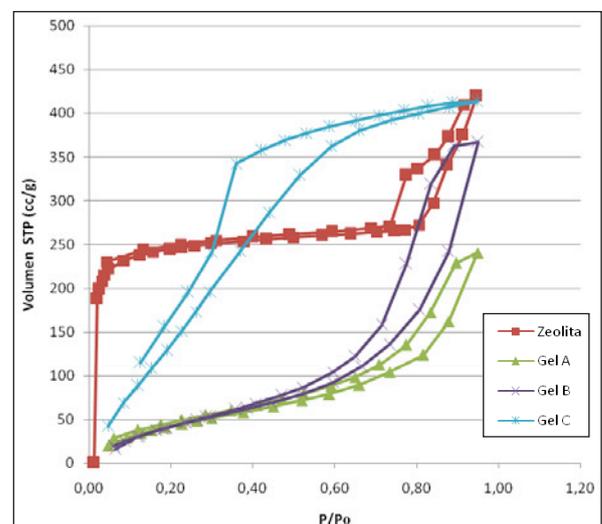


Figura 8. Isothermas de adsorción-desorción en agua a 25°C.

en los ciclos de histéresis que muestran las curvas de los geles se puede deber a la diferencia de forma de los poros de sus estructuras y también del gas utilizado para determinarlo (Groen et al., 2003).

## 2. Energías de compactación

En la Figura 9 se muestran los resultados de la energía de compactación obtenidos en este estudio. En ella se puede comprobar que el uso de los diferentes aditivos precisa de una menor energía para lograr el mismo porcentaje de compactación (92%) con respecto a la mezcla de referencia. Cabe destacar que al disminuir las temperaturas de compactación los distintos aditivos obtuvieron valores de CEI similares o incluso inferiores a los de la mezcla de referencia a 160°C.

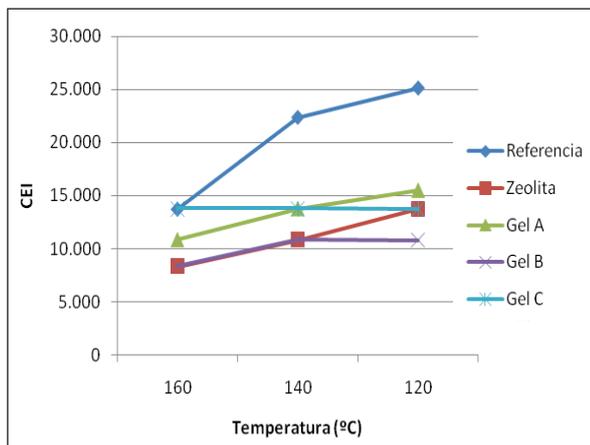


Figura 9. Resultados de índice de energía.

## 3. Propiedades mecánicas

### • Resultados a tracción indirecta

Los resultados de la resistencia de las probetas, tanto de las conservadas en húmedo como en seco, se encuentran representadas en las Figura 10 y Figura 11 respectivamente.

Se puede observar que para ambos grupos la resistencia a tracción disminuye con la temperatura de compactación. Este descenso es más acusado en las probetas que han sido sometidas a las condiciones de vacío y sumergidas en agua (Figura 10). Es de destacar que en este caso, las mezclas de referencia resultaron más afectadas por el tratamiento al que fueron sometidas que las mezclas aditivadas.

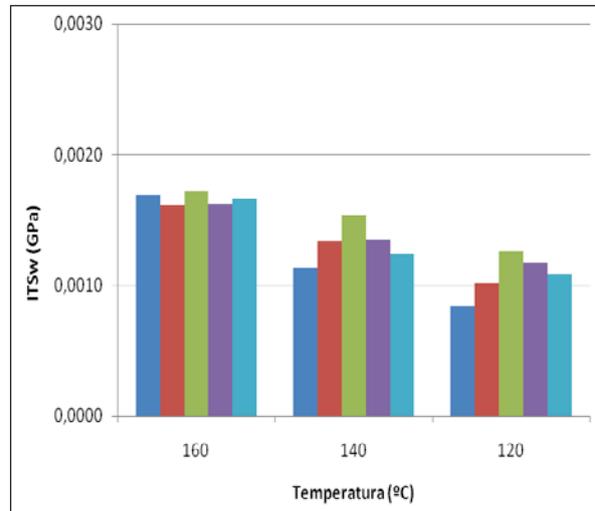


Figura 10. Resultados de resistencia conservada de las probetas húmedas.

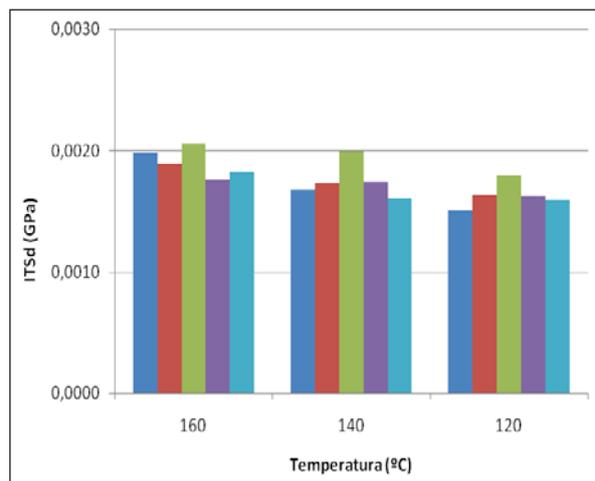


Figura 11. Resultados de resistencia conservada de las probetas secas.

En el caso de las probetas cuyo acondicionamiento fue en seco (Figura 11), la mezcla de referencia y la zeolita redujeron su resistencia con la temperatura, aunque en menor proporción que las probetas en húmedo. Los Geles A y B mostraron tener una resistencia a tracción casi constante al descender 20°C la temperatura de fabricación de la mezcla convencional. En el caso del Gel C, esta constancia en la resistencia fue mostrada a las temperaturas de 140°C y 120°C.

### • Resultados sensibilidad al agua

Los resultados obtenidos de la sensibilidad al agua se han representado en la Figura 12.

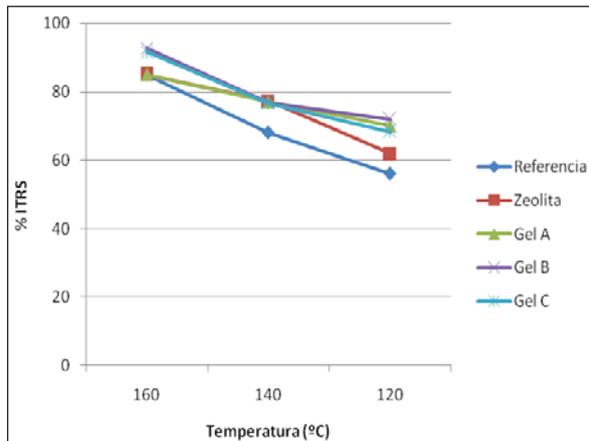


Figura 12. Resultados de sensibilidad al agua.

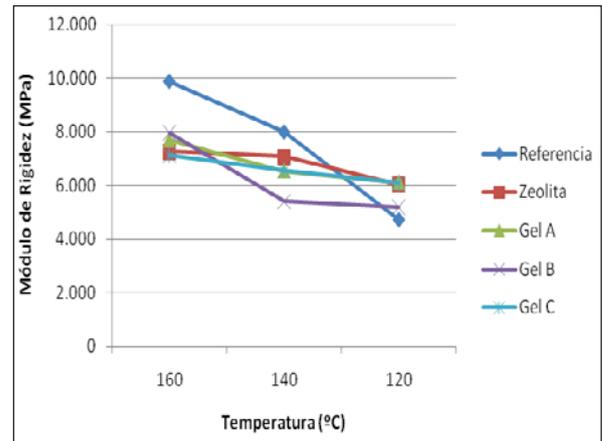


Figura 13. Resultados de rigidez a 20°C.

Todos los aditivos utilizados han alcanzado valores de resistencia conservada óptima para capa de rodadura a las temperaturas de fabricación y compactación de 160°C. Al reducir las temperaturas de trabajo a 140°C y 120°C, se ha obtenido un descenso del %ITSR por debajo de lo que marca el PG-3 para capa base e intermedia (80%), por lo que estrictamente no cumplen la normativa, pero se han logrado porcentajes de ITSR del 77% a 140°C, valores relativamente próximos a las especificaciones de la norma, con lo que con pequeñas modificaciones de dosificación parece factible cumplir las especificaciones para capa base/intermedia. Sin embargo, a 120°C los resultados obtenidos se encuentran alejados de las especificaciones mínimas a cumplir.

#### • Módulos de rigidez

Los resultados del ensayo están representados en la Figura 13.

A 160°C, la utilización de los diferentes aditivos disminuye el módulo de rigidez de la mezcla en 2.000MPa-4.000MPa con respecto a la mezcla de referencia.

Al disminuir la temperatura de fabricación en todos los casos se produce una disminución de la rigidez de la mezcla. Parte de esta disminución se puede justificar porque las mezclas fabricadas a temperaturas más bajas tienen más huecos. Pero si se realiza una comparación entre la mezcla de referencia y las aditivadas se observa que la caída de módulo con la temperatura es mucho menor en éstas últimas.

A modo de ejemplo la mezcla de referencia reduce aproximadamente a la mitad su módulo cuando se disminuye la temperatura de fabricación en 40°C, en cambio las aditivadas presentan una reducción del módulo entre el 20-30%.

## CONCLUSIONES

Con las isothermas de adsorción de agua se ha podido determinar la diferente forma de adsorción del agua debido a la diferencia de poros que poseen los distintos aditivos utilizados. La zeolita estudiada presenta microporos y mesoporosos, en cambio en los geles son mesoporosos.

A pesar de la diferencia de estructura química de las zeolitas y de los geles de sílice, los resultados en los ensayos mecánicos realizados han sido muy semejantes. Más concretamente:

- Las mezclas con los distintos aditivos utilizados han presentado una mayor trabajabilidad al disminuir las temperaturas de fabricación y compactación comparadas con la mezcla de referencia, a la vista de los resultados obtenidos en los coeficientes de compactación CEI.
- El uso de estos compuestos ha mejorado la resistencia a tracción, tanto de las probetas secas como húmedas y, por tanto del %ITSR de la mezcla a temperaturas de fabricación y compactación de 140°C y 120°C, aunque sin llegar a cumplir las especificaciones.

- La disminución de la temperatura y el empleo de los aditivos producen mezclas con menor rigidez. No obstante, este parámetro es menos sensible al reducir las temperaturas de fabricación cuando empleamos los aditivos.

A la vista de los resultados el empleo de geles de sílice como zeolitas puede ser una técnica adecuada para la fabricación de mezclas semicalientes. Sólo quedaría por chequear la velocidad con la que estas geles liberan el agua absorbida, para poder predecir el tiempo que tienen estas mezclas para ser compactadas antes de que se libere todo el agua y la mezcla pierda trabajabilidad.

## REFERENCIAS

- Button, Joe W.; Estakhri, Cindy; Wimsatt, Andrew. (2007). A synthesis of Warm-Mix Asphalt. Report N° FHWA/TX 07/0-5597-1. Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration, 2007.
- D'Angelo, John; Harn, Eric; Bartoszek, John; Baumgardner, Gaylon; Corrigan, Matthew; Cowsert, Jack; Harman, Thomas; Jamshidi, Mostafa; Jones, Wayne; Newcomb, Dave; Prowell, Brian; Sines, Ron; Yeaton, Bruce (2008) Warm-mix asphalt: European Practice. Report N° FHWA-PL-08-007. Federal Highway Administration.
- Flores, J.; Maubert, A.; Martín, N. (2006). Evaluación de los intercambios iónicos en una zeolita natural Mexicana para la separación de N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> en el aire atmosférico. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 5 (002): 119-129.
- Gálvez, A.V., Aravena, E.L.; Mondaca, R.L. (2006). Iso-termas de Adsorción en Harina de Maíz (Zea Mays L.). *Ciênc. Tecnol. Aliment.*, Campinas, 26(4): 821-827.
- García Martínez, Javier (2003) [en línea]. Capítulo 4: Adsorción e intercambio iónico en zeolitas. Materiales zeolíticos: síntesis, propiedades y aplicaciones. ISBN 978-84-7908-722-7. <http://publicaciones.ua.es/publica/Detalles.aspx?fndCod=LI978847908722&idet=621>.
- Gil Redondo, S.; González León, J.A.; Sánchez Alonso, E. (2010). Comunicación 23: Estudio del ángulo de contacto de betunes aditivados y su efecto sobre distintas propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas. V Jornada Nacional ASEFMA 2010, 19 de mayo, Madrid.
- Groen, Johan C.; Peffer, Louk A.A.; Pérez-Ramírez, Javier. (2003). Pore size determination in modified micro- and mesoporous materials. Pitfalls and limitations in gas adsorption data analysis. *Microporous and Mesoporous Materials* 60 (2003): 1-17.
- Hernández, M.A.; Rojas, F.; Corona, I.; Lara, V.H.; Portillo, R.; Salgado, M.A.; Petranoskii, V.H. (2005). Evaluación de la porosidad de zeolitas naturales por medio de curvas diferenciales de adsorción. *Revista internacional de Contaminación Ambiental*, 21 (002): 71-81.
- Higueras, Pablo; Oyarzun, Roberto (2003) [en línea]. Curso de minearología y geoquímica ambiental. Tema 9: Minerales de interés en el control de procesos ambientales. Departamento de ingeniería geológica y minera, EUP Almadén, Universidad de Castilla-La Mancha. [http://www.uclm.es/users/higueras/MGA/Tema09/Tema\\_09\\_OtrosMin\\_1.htm](http://www.uclm.es/users/higueras/MGA/Tema09/Tema_09_OtrosMin_1.htm) [consulta: enero 2008]
- IJA: Institut de Ciències de la Terra Jaume Almera, perteneciente al CSIC (2007) [en línea]. Geoquímica del carbón y productos de combustión. Zeolitas. [http://www.ija.csic.es/gt/geoamb/paginas/zeolites\\_cast.html](http://www.ija.csic.es/gt/geoamb/paginas/zeolites_cast.html) [consulta: enero 2008]
- Mahmoud, Ahmed F.F.; Bahia, Hussain. (2004). Using gyratory compactor to measure mechanical stability of asphalt mixtures. Report WHRP 05-02. Wisconsin Highway Research Program, 2004.
- McKeon, Barry (2006) (en línea). Aspha-Min®. Warm asphalt mixes. International Conference on Perpetual Pavement, September 13-15, 2006. <http://www.flexiblepavements.org/documents/Asphamin-BarryMcKeonHandouts.pdf> [consulta: enero 2008]
- Peña, J.; Cardona, E.; Rios, L. (2008). Síntesis de óxidos de silicio de altas área superficial y porosidad

empleando el método sol-gel en presencia de glicerol y monoestearato de glicerilo como estructurantes. *Dyna* 75 (156): 207-216. ISSN: 0012-7353.

Rodríguez Maldonado, J.A. (2004) [en línea]. Hidrogenólisis e hidrotratamiento de residuos de vacío de petróleo tipo maya. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Química y Alimentos, Escuela de Ingeniería. Universidad de las Américas Puebla (México) [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/leip/rodriguez\\_m\\_ja/capitulo4.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/rodriguez_m_ja/capitulo4.pdf) [consulta: enero 2008]

Sáenz, M.C.; Báez Quintero, C.A.; Díaz Velásquez, J.J.; Rodríguez Niño, G. (2007). Estudio de las variables de reacción en la síntesis de silica gel adsorbente. *Revista de Ingeniería e Investigación* 27 (2): 44-50.

Smith, M.; Poizeau, S.; Vanhoutte, M.; Chocat, N. (2008) [en línea]. Role of Water in Accelerated Fracture of Fiber Optic Glass - Problem Set 2. Mitopencourseware, Massachusetts Institute of Technology, Department of Materials Science and Engineering Cambridge, MA 02139 USA. [http://ocw.mit.edu/courses/materials-science-and-engineering/3-22-mechanical-behavior-of-materials-spring-2008/projects/fiber\\_optics\\_2/#ref](http://ocw.mit.edu/courses/materials-science-and-engineering/3-22-mechanical-behavior-of-materials-spring-2008/projects/fiber_optics_2/#ref) [consulta: marzo 2011]

### Normativa

Colección normativa técnica. Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3). Artículo 542: Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso. Ministerio de Fomento. España. 2008.

EN 12697-8. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 8: Determinación del contenido de huecos en las probetas bituminosas. Noviembre 2003.

UNE-EN 12697-10. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 10: Compactabilidad. Enero 2003.

UNE-EN 12697-12. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 12: Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa. Noviembre 2006.

UNE-EN 12697-23. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 23: Determinación de la resistencia a tracción indirecta de probetas de mezcla bituminosa. Enero 2004.

UNE-EN 12697-26. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26: Rigidez. Diciembre 2006.

UNE-EN 12697-30. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 30: Preparación de las muestras mediante compactador de impactos. Diciembre 2007.

UNE-EN 12697-31. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 31: Preparación de las muestras mediante compactador giratorio. Enero 2008.

### AGRADECIMIENTOS

La realización del Proyecto Fénix ([www.proyectofenix.es](http://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.