

XII Jornada Nacional de Asefma

REUTILIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS DERIVADOS DEL REFINADO DE BETUNES ASFÁLTICOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS BAJAS EN EMISIONES

AUTORES

Vicente Pérez Mena
CEPSA

vicente.perez@cepsa.com

M^a Mar Colás Victoria
CEPSA

marimar.colas@cepsa.com

Pilar Cabanillas Estebanez
CEPSA

pilar.cabanillas@cepsa.com

Juana Frontela Delgado
CEPSA

Juana.frontela@cepsa.com

EN COLABORACIÓN CON

Miguel del Sol Sánchez

Laboratorio de Ingeniería de la Construcción de la Universidad de Granada (LabIC.UGR)
msol@ugr.es

Fernando Moreno Navarro

Laboratorio de Ingeniería de la Construcción de la Universidad de Granada (LabIC.UGR)
fmoreno@ugr.es

M^a Carmen Rubio Gámez

Laboratorio de Ingeniería de la Construcción de la Universidad de Granada (LabIC.UGR)
mcrubio@ugr.es



RESUMEN

Esta comunicación se centra en un proyecto de investigación cuyo objetivo principal consiste en analizar la viabilidad de utilización de subproductos industriales resultantes de los procesos de refinado del betún asfáltico, para la fabricación de mezclas asfálticas a menor temperatura mediante la técnica de espumación indirecta. En ella se recogen parte de los trabajos realizados durante la caracterización de dichos subproductos y la determinación de su dosificación óptima (capacidad de absorción, velocidad de liberación de agua, etc.), así como durante el estudio de su aplicación en la fabricación de la mezcla (compactabilidad, gradientes térmicos a través de termografía de infrarrojos, etc.) y la evaluación de su comportamiento mecánico a medio-largo plazo (sensibilidad al agua, rigidez, resistencia a deformaciones plásticas y fisuración por fatiga). Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la viabilidad de utilización de subproductos hidrófilos que al entrar en contacto con el ligante a elevadas temperaturas son capaces de liberar agua, de tal manera que pasen de ser un residuo derivado de una actividad industrial a un aditivo que permite mejorar la trabajabilidad de la mezcla y sus prestaciones mecánicas. De esta forma, a través de la validación de su aplicación se pretende obtener un material innovador que optimice los costes de producción y minimice los impactos ambientales asociados a las actividades de construcción y conservación de carreteras, al mismo tiempo que mejore la eficiencia de la industria del refinado de betunes asfálticos.

1.INTRODUCCIÓN

El desarrollo de mezclas bituminosas menos contaminantes para su uso en la construcción y conservación de firmes de carreteras resulta esencial dado que estos materiales constituyen la mayor parte de los firmes de carreteras en Europa, de acuerdo a la European Asphalt Pavement Association (EAPA) [1]. Debido a la naturaleza del ligante empleado para la aglomeración de los áridos, tradicionalmente las mezclas bituminosas se realizan a temperaturas superiores a 150°C, con el fin de reducir la viscosidad del betún para garantizar una adecuada trabajabilidad y compactabilidad de la mezcla, así como una buena envuelta de los áridos. Sin embargo, este hecho lleva asociado la generación y emisión de gases contaminantes, además de otros efectos negativos desde un punto de vista económico y medioambiental [2].

De esta forma, dada la concienciación social hacia un desarrollo sostenible, surge la necesidad de nuevas tecnologías que permitan reducir el impacto causado por la fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas para firmes de carreteras. En este contexto, destacan las tecnologías centradas en la producción de mezclas a baja temperatura, que además de suponer un notable descenso en el consumo de materias primas como el fuel, lleva a una importante reducción en la emisión de CO₂ y otros gases nocivos, limitando así el impacto negativo asociado a las mezclas bituminosas [3, 4]. Además, debe de tenerse en cuenta que el descenso de la temperatura de

fabricación lleva a una menor oxidación y pérdida de partículas ligeras del betún (relacionados con el fenómeno de envejecimiento del ligante), lo que podría resultar en un material más viscoso, y menos susceptible a la rotura frágil [5].

Dentro de las tecnologías de mezclas a baja temperatura, se encuentran las mezclas semicalientes (conocidas como Warm Mix Asphalt – WMA) que permiten un descenso en la temperatura de fabricación en torno a 20-40°C, en referencia a las tradicionales mezclas en caliente (Hot Mix Asphalt). Dependiendo de la técnica utilizada para permitir dicho descenso en la temperatura de fabricación, se pueden distinguir tres tecnologías diferentes: adición de aditivos orgánicos al betún para reducir su viscosidad [6, 7]; incorporación de aditivos químicos para disminuir la tensión superficial del ligante a bajas temperaturas [6, 8]; y la inclusión de agua para producir el fenómeno de espumación del betún, y aumentar así su volumen durante el proceso de fabricación, y por tanto, favorecer la envuelta de los áridos y mejorar de la trabajabilidad de la mezcla [9, 10]. Esta última técnica, puede ser llevada a cabo mediante la inyección directa de agua o mediante la incorporación de aditivos como zeolitas o filler hidrófilo, que contienen moléculas de agua que son liberadas durante el proceso de fabricación a temperaturas superiores a 100-120°C.

Sin embargo, todas estas tecnologías para la fabricación de mezclas a menor temperatura, presentan una serie de limitaciones asociadas a incrementos de costes y consumo de materias primas (aditivos químicos y orgánicos, zeolitas, etc.), así como modificaciones en la planta de producción o en el proceso de fabricación [11]. En base a estas consideraciones, se ha llevado a cabo un proyecto de investigación (ECOASFALTOS, desarrollado entre CEPESA y el Laboratorio de Ingeniería de la Universidad de Granada, y financiado por CTA, Corporación Tecnológica Andaluza), centrado en la reutilización de un subproducto industrial (zeolitas resultantes de los procesos de refinado del betún asfáltico) para la fabricación de mezclas bituminosas a menor temperatura, mediante el proceso de espumación indirecta del betún a través del agua contenida en los subproductos de zeolitas. De esta forma, se persigue reducir los impactos negativos asociados a la fabricación de mezclas bituminosas, a la vez que se reutiliza un material de desecho industrial generado dentro de las mismas actividades para la pavimentación de firmes de carreteras. Para ello, se estudiarán las características y aptitud de distintos subproductos de zeolitas de acuerdo a su aplicación, y posteriormente se diseñará y analizará el comportamiento de mezclas bituminosas fabricadas a baja temperatura mediante el uso de estos aditivos.

2. METODOLOGÍA

2.1 MATERIALES

Para el desarrollo de este proyecto se utilizaron tres tipos diferentes de zeolitas: dos subproductos (referidos en este artículo como Zeolita 1 y Zeolita 2) obtenidos a partir de zeolitas usadas en un proceso de refinado del betún asfáltico; y una zeolita comercial (denominada en este artículo como Zeolita Referencia), ampliamente utilizada en el desarrollo de mezclas bituminosas a baja temperatura, que consiste en una zeolita sintética con un 20% de masa compuesta por agua cristalizada que es liberada al entrar en contacto con betún caliente [12]. La Tabla 1 muestra las principales características físicas de los distintos tipos de zeolitas utilizados. A partir de estos datos se puede comprobar que ambos subproductos de zeolitas (Zeolita 1 y Zeolita 2) presentan menor tamaño de partículas y una mayor densidad que en el caso de la Zeolita de Referencia (particularmente en el caso de Zeolita 2), mientras que la humedad higroscópica de este último tipo es superior a la de los subproductos.

Propiedades		Zeolita 1	Zeolita 2	Zeolita Referencia
Granulometría	Tamaño (mm)	% pasa	% pasa	% pasa
	0,5	100	100	100
	0,25	100	100	83
	0,125	100	92	64
	0,063	100	26	40
Densidad aparente (Mg/m ³)		0,67	0,81	0,43
Densidad máxima (Mg/m ³)		2,642	2,697	2,449
Humedad higroscópica (%)		0,67	0,26	3,2

Tabla 1. Principales propiedades de las zeolitas utilizadas

Con el fin de analizar la viabilidad de usar los subproductos de zeolitas en la fabricación de mezclas bituminosas, se empleó una mezcla tipo AC-22 S (EN 13108-1) ya que ésta es comúnmente utilizada en la construcción de firmes de carreteras en nuestro país. Para su elaboración se emplearon áridos calizos para las distintas fracciones (0/6, 6/12, 12/18, y 18/25), incluido el filler. Además, todas las mezclas utilizaron el mismo encaje granulométrico y tipo de betún (convencional B35/50), cuya dosificación fue de 4,0 % sobre el peso de la mezcla. La Tabla 2 resume las principales características de la mezcla de control (una mezcla convencional caliente), utilizada para analizar el efecto de las zeolitas en mezclas a baja temperatura.

Propiedades	AC 22 35/50 S
Contenido óptimo de betún	4,0
Densidad aparente (g/cm ³), EN 12697-6	2,477
Huecos en mezcla (%), EN 12697-8	4,1
Huecos en áridos (%), EN 12697-8	13,7
Relación <u>filler</u> /betún	1,0
Estabilidad Marshall (KN) EN 12697-34	17,79
Deformación Marshall (mm) EN 12697-34	4,1

Tabla 2. Características de la mezcla bituminosa convencional.

A partir de este tipo de mezcla, se llevó a cabo un análisis comparativo de distintas fórmulas de trabajo incluyendo diferentes tipos y porcentajes de zeolitas que permiten reducir la temperatura de fabricación de dicha mezcla bituminosa a través del método de espumación indirecta del betún. Así, se estudiaron: tres mezclas semicalientes (AC-Z1, AC-Z2 y AC-ZR) fabricadas mediante el uso de distintas cantidades de los diferentes tipos de zeolitas (Zeolita 1, Zeolita 2 y Zeolita de Referencia, respectivamente); y una mezcla convencional sin zeolitas (denominada como AC-R), fabricada a diferentes temperaturas, siendo utilizada como patrón para evaluar el efecto de las zeolitas en la respuesta mecánica de mezclas para su uso en firmes de carreteras.

2.2 PLAN DE TRABAJO

El plan de trabajo fue dividido en tres fases de estudio diferentes: (i) caracterización de los distintos tipos de zeolitas de acuerdo a sus principales propiedades para la espumación de betún durante la fabricación de mezclas semicalientes; (ii) definición del diseño de las mezclas semicalientes incluyendo subproductos de zeolitas, de acuerdo a las mezclas utilizadas como referencia; (iii) y análisis del comportamiento mecánico de las mezclas semicalientes, en relación a la mezcla convencional en caliente. La Tabla 3 recoge un resumen del plan de estudio llevado a cabo.

Fase de estudio	Mezclas	Zeolitas	Temperatura producción (°C)	Ensayos
Caracterización zeolitas	-	Zeolita 1 Zeolita 2 Zeolita de Referencia	-	- Absorción agua - Liberación agua
Diseño de las mezclas semicalientes a partir de subproductos de zeolitas	AC-R	-	165-145-120	- Trabajabilidad y compactibilidad - Módulo de rigidez - Resistencia a tracción indirecta
	AC-Z1	0,1-0,3-0,5% Zeolita 1	145-120	
	AC-Z2	0,1-0,3-0,5% Zeolita 2	145-120	
	AC-ZP	0.1-0.3-0.5% Zeolita Referencia	145-120	
Comportamiento de las mezclas semicalientes	AC-R	-	165	- Sensibilidad al agua - Módulo de rigidez (5-20-40°C) - Rodadura - Triaxial - UGR-FACT
	AC-Z1	% óptimo Zeolita 1	Óptima	
	AC-Z2	% óptimo Zeolita 2	Óptima	

Tabla 3. Resumen del plan de trabajo desarrollado.

En una primera etapa, el proceso de caracterización de las zeolitas consistió en analizar su capacidad para absorber y liberar moléculas de agua bajo diferentes temperaturas y periodos de tiempo, siendo estos parámetros esenciales para definir la efectividad y modo de uso de las zeolitas para facilitar la espumación del betún durante la fabricación de mezclas semicalientes. En esta fase, se comparó el comportamiento de los dos tipos de subproducto de zeolitas en relación a las zeolitas comerciales. Los ensayos consistieron en almacenar tres muestras de 30 gramos de cada tipo de zeolita (previamente secadas en estufa hasta masa constante) en una cámara climática bajo temperatura (23°C) y humedad (98%) controlada. Para determinar la capacidad de absorción de las zeolitas, se registró la evolución del peso de las muestras durante diferentes periodos de tiempo (1, 2, 3, 4, 5, 72, 98, 120, 240, y 408 horas) hasta que se estabilizó el cambio de masa de las muestras. Más tarde, estas mismas muestras fueron almacenadas en estufa a diferentes temperaturas (120°C, 130°C y 145°C), comprendidas en el rango de fabricación de mezclas semicalientes, para así evaluar la capacidad de cada material para liberar moléculas de agua. Además, se llevó a cabo un estudio inicial de la capacidad de espumación de las distintas zeolitas a través de su adición a betún caliente (a una temperatura comprendida entre 120-145°C), para evaluar visualmente el cambio de textura del ligante tras su mezclado con el aditivo, y un control mediante cámara termográfica de infrarrojos.

En una segunda etapa de estudio, centrada en la definición de los principales parámetros de diseño para las mezclas semicalientes con subproductos de zeolitas, se ensayaron diferentes mezclas producidas con distinta cantidad y tipo de zeolitas, bajo diversas temperaturas de fabricación. Así, las mezclas semicalientes fueron elaboradas a 145°C y 120°C, incluyendo distintas dotaciones de las diferentes zeolitas, 0% en el caso de la mezcla de referencia (AC-R), y 0,1%, 0,3% y 0,5% (sobre el peso del betún) para las mezclas tipo AC-Z1, AC-Z2 y AC-ZP. Además, como control del comportamiento de las mezclas semicalientes, se analizó el comportamiento de una mezcla convencional en caliente (fabricada a 165°C, sin zeolitas). En esta fase de estudio, se evaluó el efecto de las zeolitas (analizando la influencia de la temperatura de fabricación y dosificación de

aditivo) mediante el estudio de la trabajabilidad y compactibilidad de las mezclas a través del uso de un compactador giratorio [11], aplicando un total de 210 giros para cada probeta. Además, tras la compactación de 4 probetas para cada mezcla, se llevaron a cabo los ensayos de resistencia a la tracción indirecta (EN 12697-23) y módulo de rigidez a 20°C, evaluando así el efecto de las zeolitas en la capacidad portante y cohesividad de las mezclas resultantes.

Por otro lado, con el fin de evaluar el comportamiento mecánico a corto y largo plazo de las mezclas semicalientes con la cantidad óptima de cada tipo de subproducto de zeolitas, y a la temperatura de fabricación más apropiada, en una tercera etapa de estudio se comparó la respuesta de estas mezclas con la presentada por la mezcla convencional en caliente. Para ello, se llevaron a cabo los ensayos de sensibilidad al agua (EN 12697-12), de rodadura (EN 12697-22), triaxial a 60°C (EN 12697-25, método B), módulo de rigidez a diferentes temperaturas (5°C, 20°C y 40°C) (EN 12697-26 anexo C), y UGR-FACT [13, 14] para evaluar la resistencia a fisuración por fatiga bajo las temperaturas de 10°C, 20°C, y 30°C.

El método de ensayo UGR-FACT permite reproducir las condiciones de esfuerzos que provocan la aparición de fenómenos de fatiga y fisuración en pavimentos (cargas del tráfico y gradientes térmicos). El dispositivo de ensayo se compone principalmente de dos soportes deslizantes (ambos apoyados sobre una placa de caucho que permite simular los movimientos de flexión, de forma conjunta a cortante y tracción debido al deslizamiento) sobre los que se emplaza la probeta, pudiendo así cuantificar las deformaciones horizontales y verticales que tienen lugar en un determinado volumen del material. Mediante esta configuración del dispositivo de ensayo, el cual incorpora cuatro medidores de deformación (Figura 1), es posible evaluar la resistencia a la aparición y propagación de fisuras en mezclas bituminosas debido a los esfuerzos que el material experimenta durante su vida de servicio en firmes de carreteras.

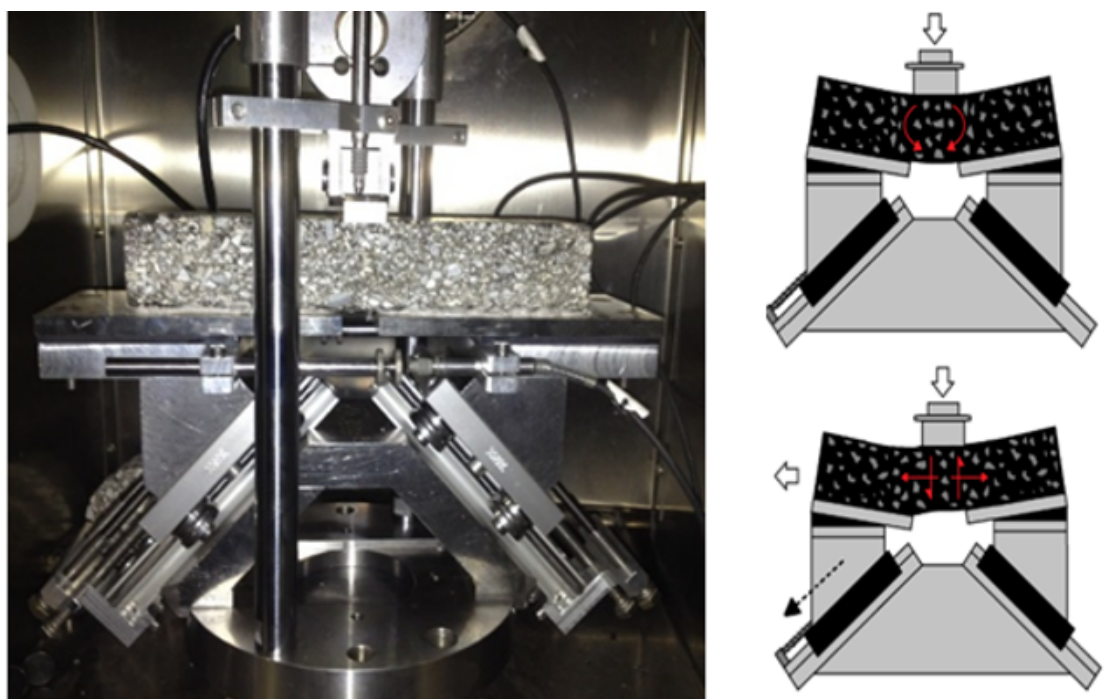


Figura 1. Dispositivo de ensayo UGR-FACT.

El ensayo UGR-FACT fue realizado bajo condiciones de tensión controlada, con una amplitud de 0,8 MPa, a una frecuencia de 5 Hz, y para las temperaturas de 10°C, 20°C, y 30°C. Para cada temperatura, se utilizaron 3 probetas con dimensiones iguales a 200 mm de longitud, 60 mm de ancho, y 60 mm de altura, las cuales fueron obtenidas a partir de aserrar probetas prismáticas de 408 mm x 256 mm, y 60 mm de altura.

El análisis de resultados se llevó a cabo mediante la combinación entre la energía disipada en cada ciclo y el cambio de geometría de un determinado volumen en el que tiene lugar la aparición y propagación de la fisura. La energía disipada fue calculada como la suma del área de los ciclos de histéresis medidos en dirección vertical y horizontal.

$$\omega_i = \omega_{hi} + \omega_{vi} \quad (1)$$

donde ω_i es la energía disipada en el ciclo i (en J/m³); ω_{hi} es la energía disipada en la dirección horizontal del volumen considerado en el ciclo i (en J/m³), y ω_{vi} es la energía disipada en dirección vertical en el ciclo i (en J/m³).

Por otra parte, para el cálculo de las variaciones de la geometría del volumen (medido en porcentaje) donde tienen lugar los fenómenos de fatiga del material, se registró la evolución de los desplazamientos permanentes horizontales y verticales para determinar los cambios de volumen de acuerdo a la siguiente expresión.

$$\Delta \varepsilon_i = (|(\delta_{hi} - \delta_{vi}) - 1|) / 100 \quad (2)$$

donde $\Delta \varepsilon_i$ representa la variación de la geometría en el ciclo i para un volumen inicial unitario, δ_{hi} and δ_{vi} corresponden a los cambios de las dimensiones horizontales y verticales en el ciclo i .

Además, para analizar la evolución del daño relativo en el material en cada ciclo de carga, se utilizó el Parámetro Medio de Daño (conocido como Mean Damage Parameter) [15].

$$\gamma = (\sum_{i=1}^{N_f} (\omega_{(i+1)} - \omega_i) / \omega_i) / N_f \quad (3)$$

donde N_f es el número total de ciclos aplicados en el material hasta el desarrollo completo de la fisura en la probeta.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS ZEOLITAS PARA SU USO EN MEZCLAS SEMICALIENTES

Para analizar la capacidad de absorción de los subproductos de zeolitas para su uso como agente espumador en la fabricación de mezclas semicalientes, la Figura 2 muestra el incremento en porcentaje de la humedad de las muestras de cada tipo de zeolita con el tiempo de almacenaje en cámara climática al 98% de humedad relativa. Los resultados denotan que, para periodos de tiempo inferiores a 10 horas, todos los tipos de zeolitas registraron similares valores de humedad, mientras que al incrementar dicho tiempo, la zeolita comercial, usada como control, dio lugar a mayores contenidos de humedad, seguida del sub-producto de zeolita tipo 1, lo cual puede ser debido a su menor tamaño de partículas, y por tanto, mayor superficie específica.

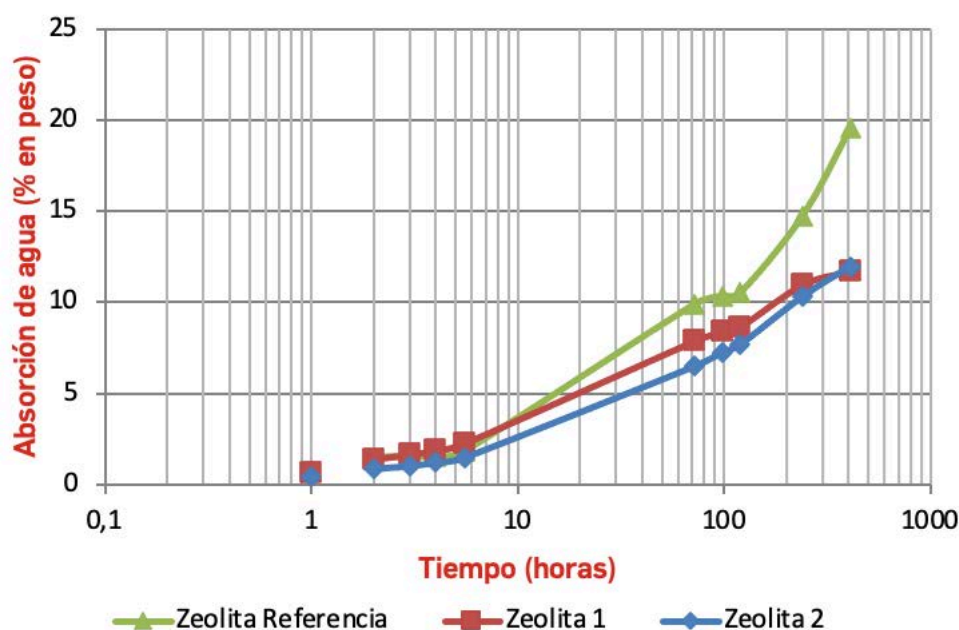


Figura 2. Evolución de la absorción de agua de las zeolitas.

Por otra parte, dada la importancia no sólo de la capacidad de absorción de las zeolitas, sino también de su aptitud para liberarla durante el proceso de fabricación de las mezclas semicalientes, la Figura 3 muestra la evolución de dicho parámetro a distintas temperaturas para los diferentes tipos de zeolitas. Los resultados muestran que en todos los casos la mayor parte de liberación del agua tuvo lugar durante los primeros 20 minutos para una temperatura próxima a 145°C, mientras que dicho tiempo ascendió hasta los 50 minutos para 120°C. Esto refleja que al disminuir la temperatura el proceso de espumación del betón será más lento y prolongado, lo que está en consonancia con otros estudios [16] que han demostrado que las

zeolitas no liberan el agua de forma repentina, sino que consiste en un fenómeno a más largo plazo. De este modo, ante la influencia de la temperatura en la capacidad de las zeolitas para liberar las moléculas de agua, en la siguiente etapa de definición del diseño de las mezclas semicalientes con subproductos de zeolitas, se evaluará el efecto de la temperatura de fabricación de dichas mezclas a 145°C y 120°C.

Los resultados también ponen en evidencia que, a corto plazo, todos los tipos de zeolitas mostraron similar capacidad para liberar su contenido de agua para las distintas temperaturas estudiadas, pero transcurrido dicho tiempo (por ejemplo, 20 minutos a 145°C, o 50 minutos a 120°C), la zeolita de referencia mostró mayores valores de humedad, lo que podría llevar a un proceso de espumación más prolongado que en el caso de los subproductos de zeolitas. Así, de acuerdo a estos resultados, en la siguiente etapa de estudio, se utilizaron dotaciones de zeolitas iguales a 0,1% y 0,3% (valores comúnmente utilizados para la producción de mezclas semicalientes con esta tecnología) [11, 12, 17], así como un porcentaje superior, 0,5%, debido a la menor capacidad de las zeolitas para absorber y liberar humedad, y para prolongar su efecto de liberación de moléculas de agua durante el proceso de espumación.

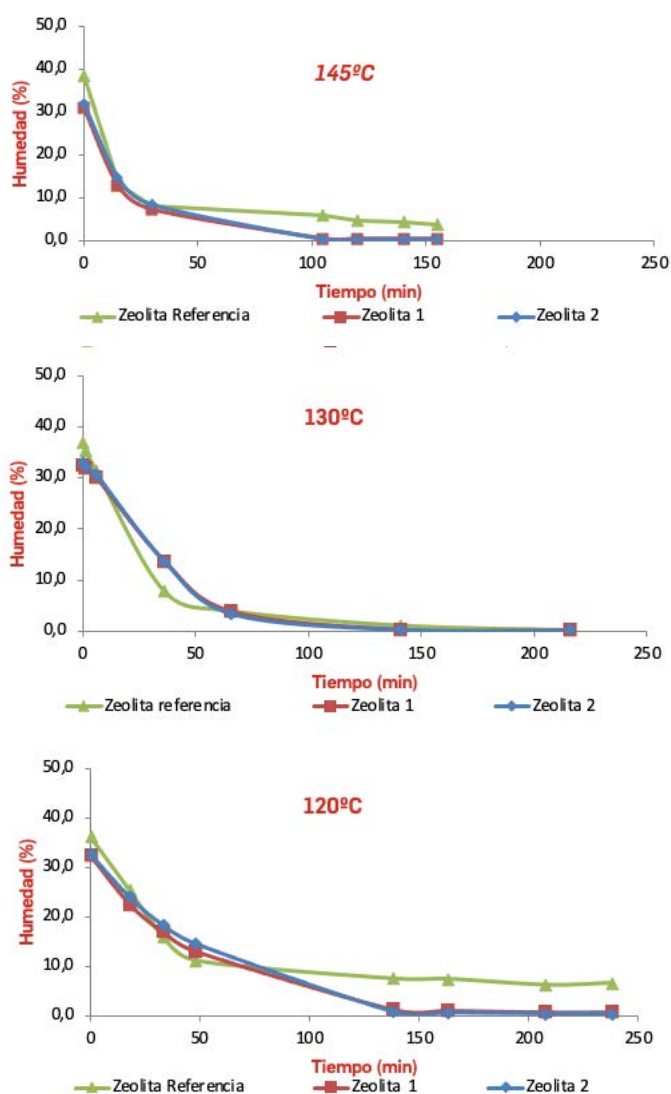


Figura 3. Capacidad de liberar agua de las zeolitas a diferentes temperaturas.

Por otra parte, para analizar la eficiencia de espumado de los subproductos de zeolitas en referencia a la Zeolita Patrón, la Figura 4 muestra el efecto de añadir cada tipo de zeolita (de arriba abajo. Zeolita de Referencia, Zeolita 1 y Zeolita 2) a betún caliente (aproximadamente a 135°C). Las imágenes reflejan que la incorporación de la zeolita de referencia provoca un cambio de textura en el ligante, lo cual indica su aptitud para espumar el betún y aumentar su volumen a corto plazo. Sin embargo, se observa como este fenómeno es más limitado al utilizar subproductos de zeolitas, particularmente en el caso de Zeolitas tipo 2 que lleva a una inapreciable reacción con el betún. Así, este análisis demuestra de nuevo la necesidad de estudiar mayores porcentajes de aditivo (0,5%) a los utilizados habitualmente en la fabricación de mezclas con zeolitas, tratando así de favorecer el efecto de estos aditivos procedentes de subproductos industriales.

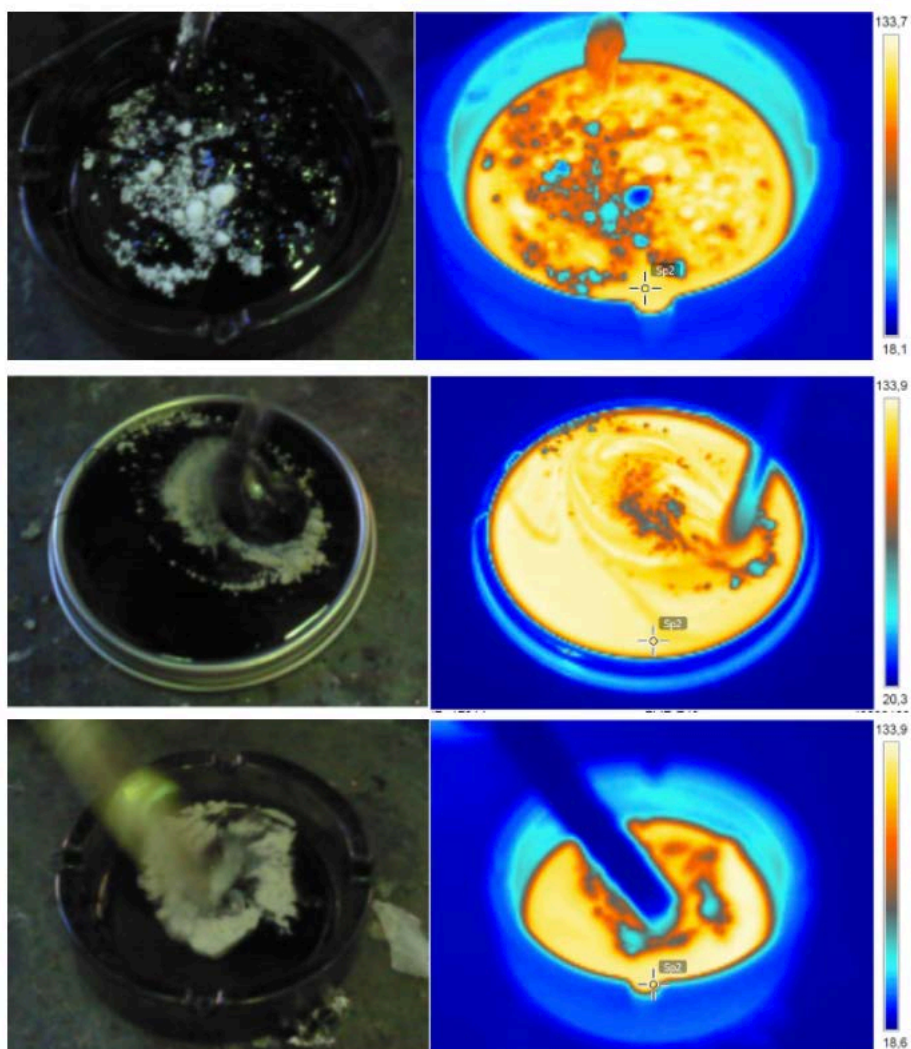


Figura 4. Efecto de espumación del betún al añadir Zeolita de Referencia, Zeolita 1, y Zeolita 2, respectivamente.

3.2 DEFINICIÓN DEL DISEÑO DE LAS MEZCLAS SEMICALIENTES CON LOS SUBPRODUCTOS DE ZEOLITAS

Con la finalidad de evaluar la influencia de la temperatura de fabricación y de la dosis de subproductos de zeolitas en la fabricación de mezclas semicalientes, la Tabla 4 recoge los resultados obtenidos en el análisis de trabajabilidad y compactibilidad para las distintas mezclas semicalientes con diversos contenidos de dichas zeolitas y con zeolita comercial, así como para las mezclas sin zeolitas, tanto caliente como semicalientes. Los resultados muestran que el descenso en la temperatura de fabricación lleva a una reducción en la densidad conseguida en las probetas de las mezclas de referencia sin aditivo (AC-R) en relación a la mezcla caliente, lo que denota la importancia de este parámetro en la producción de mezclas bituminosas. Sin embargo, al utilizar zeolitas para inducir el proceso de espumación indirecta del betún, se mejora la trabajabilidad y compactibilidad de las mezclas, obteniendo incluso mayores valores de densidad que los medidos para la mezcla en caliente. Además, se comprueba que el uso de subproductos de zeolitas lleva a menor susceptibilidad a la temperatura de fabricación de las mezclas semicalientes en referencia a la densidad final de las probetas, lo que podría dar lugar a una serie de ventajas competitivas como incremento de la distancia de transporte sin reducir la compactibilidad del material.

En cuanto al efecto de la cantidad de zeolitas, los resultados demuestran que al incrementar el porcentaje de 0,1% a 0,3%, generalmente aumenta la densidad de las probetas (lo que podría estar asociado a una mayor efectividad del proceso de espumación), pero sin embargo, al utilizar dotaciones de 0,5% de zeolitas, se reduce la compactibilidad del material, lo que podría deberse a un excesivo uso de estos aditivos, de acuerdo con otros estudios [11, 18]. De esta forma, en consonancia con estos resultados, se podría decir que el uso de 0,3% de zeolitas podría llevar a los mayores valores de densificación de las mezclas semicaliente, independientemente de la temperatura de fabricación utilizada. Además, se comprueba que el uso de subproductos de zeolitas lleva a valores de densidad del orden a los presentados por la zeolita comercial de referencia, e incluso superiores a los registrados para la mezcla convencional en caliente.

Mezcla	Densidad (Mg/m³)			
	0,0%	0,1%	0,3%	0,5%
AC-R 165°C	2,472	-	-	-
AC-R 145°C	2,441	-	-	-
AC-R 120°C	2,429	-	-	-
AC-ZR 145°C	-	2,534	2,548	2,547
AC-ZR 120°C	-	2,499	2,553	2,505
AC-Z1 145°C	-	2,502	2,525	2,518
AC-Z1 120°C	-	2,522	2,543	2,463
AC-Z2 145°C	-	2,506	2,535	2,47
AC-Z2 120°C	-	2,517	2,49	2,457

Tabla 4. Resultados de densidad obtenidos en el estudio de compactibilidad con giratoria, para distintos tipos y cantidad de zeolita.

Por otra parte, la Tabla 5 representa los valores medios de módulo de rigidez a 20°C registrados para las diferentes mezclas utilizadas en el estudio de trabajabilidad y compactibilidad. Los resultados indican que el comportamiento de la mezcla convencional sin aditivos es considerablemente susceptible a la temperatura de fabricación, mientras que en el caso de las mezclas semicalientes con zeolitas se registraron mayores valores de capacidad portante que en el caso de las mezclas de referencia a baja temperatura, reduciendo así la susceptibilidad del material a su temperatura de producción. Este hecho es más notable en el caso de las mezclas fabricadas con 0,3% de zeolitas, y particularmente cuando se utilizan subproductos de zeolitas (siendo más significativo en el caso de Zeolitas 1) en mezclas fabricadas a 145°C, ya que se obtienen valores próximos a los medidos para la mezcla en caliente.

No obstante, se debe tener en cuenta que, a pesar del aumento de densidad de las mezclas con zeolitas visto en la Tabla 4, en términos generales, las mezclas semicalientes con estos aditivos llevaron a menores valores de módulo de rigidez que en el caso de la mezcla caliente, particularmente para temperaturas de fabricación igual a 120°C. Este hecho podría deberse a un menor envejecimiento y oxidación del betún, y por tanto menor rigidización, resultando así en un comportamiento más viscoso y menos rígido de estos materiales. Este fenómeno, a pesar del descenso de rigidez, podría llevar a mayor vida de servicio y mayor resistencia a la fisuración de las mezclas, ya que en estudios anteriores se ha probado que el descenso del envejecimiento del betún da lugar a menor degradación y deterioro de las mezclas bituminosas en relación a sus principales modos de fallo [5].

Mezcla	Densidad (Mg/m³)			
	0,0%	0,1%	0,3%	0,5%
AC-R 165°C	6856	-	-	-
AC-R 145°C	5659	-	-	-
AC-R 120°C	3942	-	-	-
AC-ZR 145°C	-	5720	5882	7278
AC-ZR 120°C	-	4480	4396	5555
AC-Z1 145°C	-	5633	6978	6306
AC-Z1 120°C	-	5083	5150	5346
AC-Z2 145°C	-	6042	6407	5977
AC-Z2 120°C	-	5337	5127	5506

Tabla 5. Efecto del tipo y porcentaje de zeolitas en el módulo de mezclas fabricadas a distinta temperatura.

Para obtener un análisis con mayor detalle del efecto de las zeolitas, su dosificación, y temperatura de fabricación de las mezclas, la Tabla 6 recoge los resultados medios de resistencia a tracción indirecta (a 20°C) registrados para probetas obtenidas mediante compactador giratorio en el estudio de trabajabilidad. En primer lugar, se observa que el uso de altas dotaciones de zeolitas (0,5%) lleva a un importante descenso en la resistencia a la tracción, lo que está en consonancia con otros estudios [11, 18] que han probado que el uso de una alta cantidad de agua en el proceso de espumación resulta en la pérdida de adhesividad entre áridos y betún. Además, en estos casos, se comprueba que el comportamiento de estas mezclas es más susceptible a los cambios en temperatura de fabricación que en el caso de menores dotaciones de zeolitas.

Por otra parte, los resultados prueban que el uso de ambos subproductos de zeolitas (para dotaciones inferiores a 0,5%) lleva a valores de resistencia comparables a los presentados por las mezclas semicalientes con zeolitas de referencia, e incluso valores algo superiores a los medidos para la mezcla en caliente, principalmente para temperaturas de fabricación de 145°C y con una dotación de 0,3% de zeolitas. Así, estos resultados confirman la aptitud de los subproductos de zeolitas para facilitar la envuelta de los áridos y una adecuada cohesividad del mástico de la mezcla fabricada a bajas temperaturas.

Mezcla	Densidad (Mg/m³)			
	0,0%	0,1%	0,3%	0,5%
AC-R 165°C	1610	-	-	-
AC-R 145°C	1401	-	-	-
AC-R 120°C	1050	-	-	-
AC-ZR 145°C	-	1630	1792	1871
AC-ZR 120°C	-	1391	1447	1410
AC-Z1 145°C	-	1680	1769	1714
AC-Z1 120°C	-	1789	1695	1285
AC-Z2 145°C	-	1570	1891	1500
AC-Z2 120°C	-	1745	1509	1292

Tabla 6. Resultados medidos en el ensayo de resistencia a tracción indirecta.

3.3 COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS SEMICALIENTES FABRICADAS A PARTIR DEL USO DE SUBPRODUCTOS DE ZEOLITAS

A partir de los resultados obtenidos en la fase de estudio anterior, se seleccionaron como parámetros óptimos de diseño de las mezclas semicalientes con subproductos de zeolitas, una temperatura de fabricación igual a 145°C, y una dotación de 0,3% de cada tipo de zeolitas reutilizadas, comparando su comportamiento mecánico a corto y largo plazo con el presentado por una mezcla convencional caliente.

La Figura 5 muestra los resultados obtenidos en el ensayo de sensibilidad al agua, representando los valores de resistencia a tracción indirecta para probetas en seco y húmedo, así como el ratio de resistencia retenida (ITSR). Los resultados indican que la mezcla semicaliente con zeolitas tipo 2 registró menores valores de resistencia que los presentados por la mezcla convencional en caliente, particularmente para el caso de probetas sometidas a la acción del agua, resultado así en mayor susceptibilidad a la acción del agua. Sin embargo, en el caso de Zeolitas 1, los valores de resistencia a tracción indirecta (tanto del grupo seco como del húmedo) son comparables a los presentados por la mezcla de referencia, mostrando de esta forma que este tipo de zeolitas podría ser más apropiado para fabricar mezclas semicalientes mediante proceso de espumación indirecta del betún, reduciendo su susceptibilidad al agua, probablemente debido a la mejora de la cohesividad y adhesividad a pesar del descenso en la temperatura de fabricación.

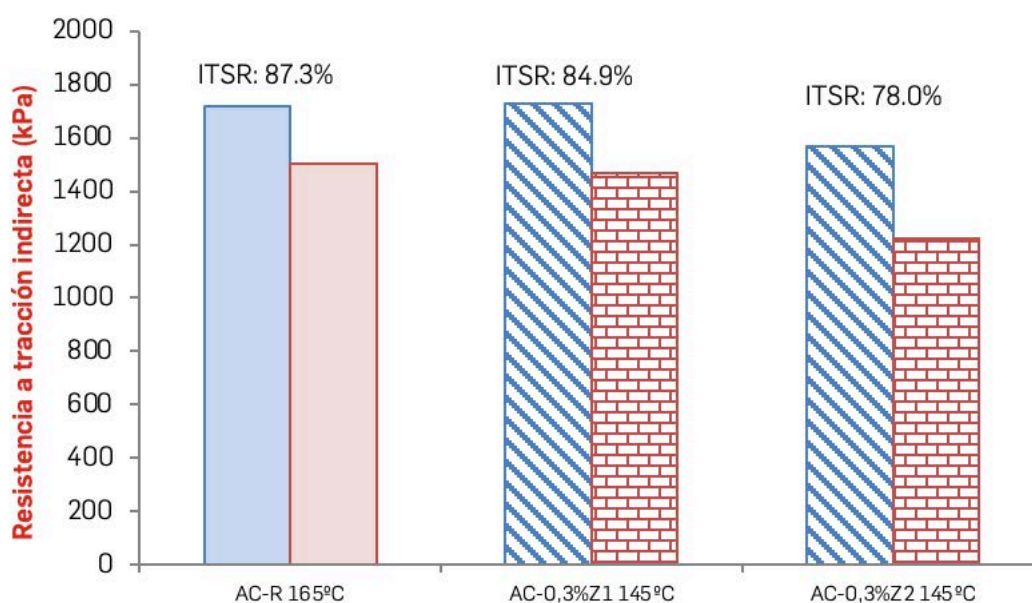


Figura 5. Resultados del ensayo de sensibilidad al agua.

Por otra parte, la Figura 6 recoge la influencia de la temperatura de servicio en la capacidad portante de las mezclas semicalientes con subproductos de zeolitas, así como de la mezcla caliente de referencia. Se puede observar que los cambios de rigidez de las mezclas debido a las variaciones de temperatura son del mismo orden para los distintos casos considerados, mostrando así una susceptibilidad a la temperatura de servicio por parte de las mezclas semicalientes similar a la de la mezcla convencional.

Además, los resultados indican que la mezcla con Zeolita 1 presentó valores de rigidez incluso algo superiores a los de la mezcla de referencia para las distintas temperaturas, lo que podría estar relacionado con la mejora de la trabajabilidad y compactibilidad de estas mezclas (tal y como se ha visto en la etapa anterior de estudio) debido al proceso de espumación, y por tanto, se pueden obtener valores de capacidad portante similares (o incluso superiores) a los de mezclas convencionales, a la vez que se reduce el envejecimiento del ligante gracias al descenso en la temperatura de fabricación. En cuanto a la Zeolita 2, a pesar de obtener valores de rigidez algo inferiores a los de la mezcla caliente, el comportamiento de ambas mezclas para las diferentes temperaturas es comparable, sin que se produzca un descenso notable de la capacidad portante del material.

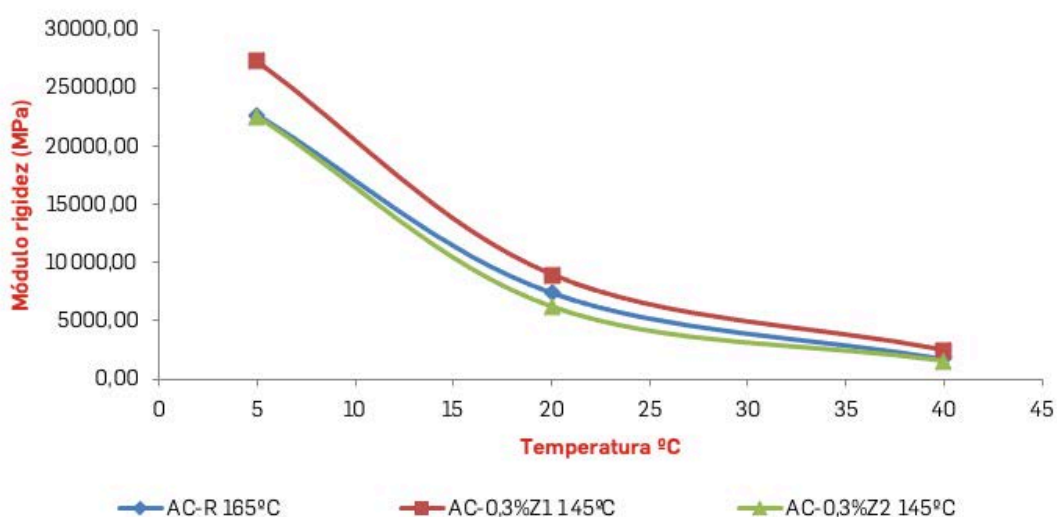


Figura 6. Módulo de rigidez a diferentes temperaturas de servicio.

Para analizar la resistencia a deformaciones plásticas de las distintas mezclas, la Figura 7 muestra los resultados obtenidos en el ensayo de rodadura y en el ensayo triaxial, respectivamente. En ambos ensayos, se comprueba que el uso de 0,3% de zeolitas tipo 1 lleva a valores de deformación final comparables (o incluso inferiores) a los registrados para la mezcla convencional caliente, a la vez que se reduce la pendiente de deformación, obteniendo así menor tendencia a las deformaciones permanentes a largo plazo. Sin embargo, se debe de considerar que el uso de Zeolitas 2 podría resultar en mayores valores de deformaciones plásticas, de acuerdo a los valores de deformación final medidos en ambos ensayos, a la vez que la pendiente de la curva es mayor a las medidas para las otras dos mezclas (referencia y con Zeolita 1), denotando así menor resistencia a deformaciones permanentes a largo plazo.

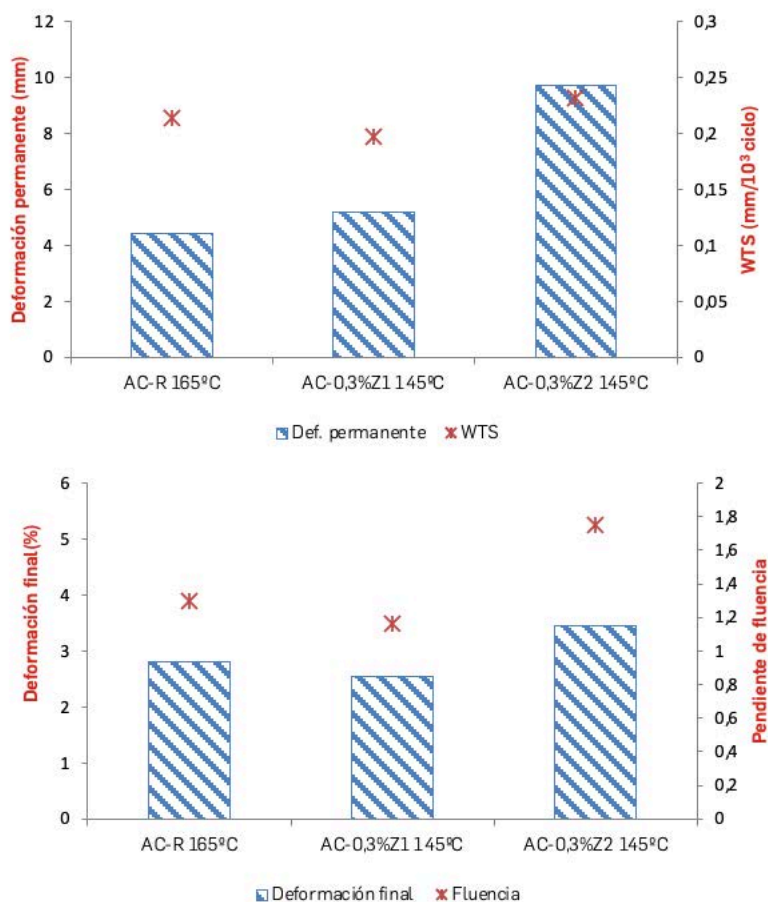


Figura 7. Resultados de resistencia a deformaciones plásticas medidos en el ensayo de rodadura, y triaxial, respectivamente.

Con el fin de analizar la resistencia a fisuración por fatiga de las mezclas semicalientes con subproductos de zeolitas en referencia a la mezcla convencional en caliente, se utilizó el método de ensayo UGR-FACT, evaluando los materiales a distintas temperaturas de servicio. La Figura 8 representa el Parámetro de Daño Medio obtenido en dichos ensayos para cada una de las mezclas estudiadas, con respecto a la temperatura de ensayo. En ella se puede observar que las diferentes mezclas mostraron una susceptibilidad a los cambios de temperatura similar, desde un punto de vista de su resistencia a la fisuración por fatiga. Por otra parte, se demuestra que el uso de zeolitas tipo 1 lleva a mezclas bituminosas semicalientes con mayor resistencia a la fisuración por fatiga que en el caso de las Zeolitas 2, presentando valores de daño comparables a los de la mezcla en caliente para las distintas temperaturas de ensayo consideradas, lo que denota la aptitud de este tipo de zeolitas para fabricar mezclas a baja temperatura con prestaciones mecánicas similares a las obtenidas en mezclas convencionales en caliente.

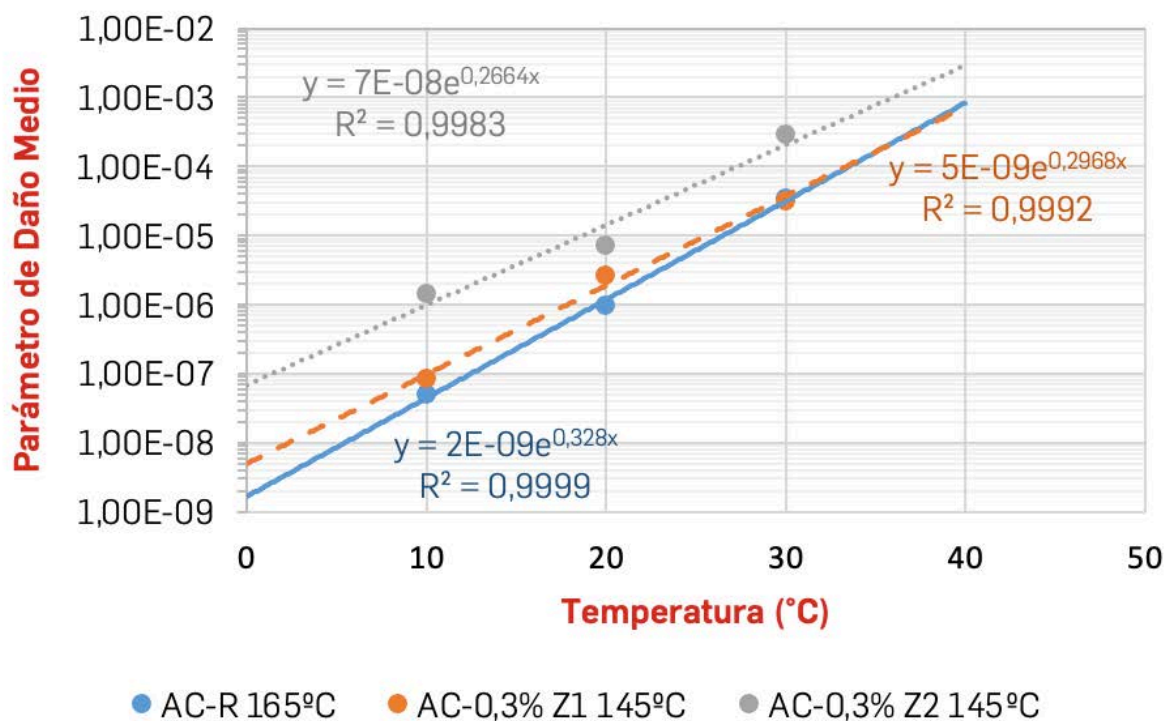


Figura 8. Parámetro Medio de Daño para las distintas mezclas bajo diferentes temperaturas de servicio.

4. CONCLUSIONES

Los resultados del proyecto de investigación que se presentan en esta comunicación se centran en analizar la viabilidad de utilizar subproductos industriales de zeolitas procedentes de un proceso de refinado del betún, como agentes espumadores del ligante durante la fabricación de mezclas bituminosas a menor temperatura. Con este propósito, dos tipos diferentes de subproductos de zeolita han sido caracterizados de acuerdo a su aplicación en la fabricación de mezclas bituminosas a baja temperatura, para posteriormente definir el diseño óptimo de estas mezclas y analizar su comportamiento mecánico en referencia a mezclas convencionales, tanto calientes como semicalientes. A partir de los resultados obtenidos en el estudio presentado, se pueden obtener las siguientes conclusiones principales:

- Ambos subproductos (Zeolitas 1 y 2) presentan menor capacidad para absorber agua que la zeolita comercial utilizada como referencia, lo cual debe considerarse durante el diseño de mezclas bituminosas con estos tipos de zeolitas. No obstante, la velocidad de liberación de su contenido de agua es similar para las distintas zeolitas estudiadas, teniendo en cuenta que en todos los casos dicho tiempo incrementa al reducir la temperatura. Este hecho indica que la incorporación de los subproductos de zeolitas, y el proceso de fabricación de las mezclas semicalientes con estos aditivos es similar al utilizado con zeolitas convencionales.

- La trabajabilidad y comportamiento mecánico de las mezclas fabricadas a baja temperatura (120°C y 145°C) de las mezclas sin aditivos disminuye de forma considerable debido a una menor compactibilidad del material, y peor envuelta de los áridos. Sin embargo, el uso de 0,3% de subproductos de zeolitas permite mejorar la trabajabilidad y compactibilidad de las mezclas fabricadas a baja temperatura (particularmente a 145°C), resultando en valores de densidad y resistencia a la tracción indirecta comparables (o incluso superior) a los presentados por la mezcla convencional en caliente, y las mezclas semicalientes con zeolita de referencia.

- Se debe de considerar que las mezclas semicalientes con subproductos de zeolita (en particular, el caso con Zeolitas 2) llevan a menores valores de resistencia a la acción del agua. No obstante, en el caso de la Zeolita 1 se obtienen valores de susceptibilidad al agua y resistencia a la tracción del orden a los medidos en la mezcla convencional.

- En el mismo sentido, la mezcla semicaliente con Zeolita 1 registró valres de capacidad portante (a diferentes temperaturas de servicio) y resistencia a deformaciones plásticas, similares (o incluso superiores) a los medidos para la mezcla en caliente, mientras que la Zeolita 2 llevo a un ligero descenso de las propiedades mecánicas de la mezcla. De igual modo, la mezcla semicaliente con Zeolita 2 presentó menor resistencia a la fisuración por fatiga que la mezcla fabricada a partir de sub-producto de zeolita tipo 1 que la mezcla convencional en caliente, ambas obteniendo valores de resistencia a la fisuración del mismo orden.

Así, en base a los resultados presentados en este estudio, podría decirse que el uso de subproductos de zeolitas tipo 1 en la fabricación de mezclas bituminosas a baja temperatura podría dar lugar a un material con propiedades aptas para su utilización en la construcción de firmes de carreteras, lo cual podría dar lugar a una serie de beneficios económicos y medioambientales frente a las tradicionales mezclas en caliente.

5. REFERENCIAS

Bélgica.

[2] Almeida-Costa, A. y Benta, A. (2016) Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt. *Journal of Cleaner Production*, 112, pp. 2308-2317.

[3] Hassan M. (2010) Evaluation of the Environmental and Economic Impacts of Warm-Mix Asphalt Using Life-Cycle Assessment..*International Journal of Construction Education and Research*, Volumen 6, parte 3.

[4] Rubio, M.C., Martínez, G.; Baena, L.; Moreno, F. (2012) Warm mix asphalt: an over-view. *Journal of Cleaner Production*, 24 (8), 76-84.

[5] Moreno-Navarro, F.; Sol-Sánchez, M.; García-Travé, G.; Rubio-Gámez, M.C. (2016) Understanding the effects of ageing and temperatura on the fatigue cracking resistance of bituminous mixtures. 8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements, Nantes, Francia.

[6] Pérez-Martínez, M.; Moreno-Navarro, F.; Martín-Marín, J.; Ríos-Losada, C.; Ruubio-Gámez, M.C. (2014) Analysis of cleaner technologies based on waxes and surfactant additives in road construction. *Journal of Cleaner Production*, 65, 374-379.

[7] Zhang, J.; Yang, F.; Pei, J.; Xu, S.; An, F. (2015) Viscosity-temperature characteristics of warm mix asphalt binder with Sasobit® *Construction and Building Materials*, 78, 34-39.

[8] Sol-Sánchez, M.; Moreno-Navarro, F.; García-Travé, G.; Rubio-Gámez, M.C. (2016) Analysing industrial manufacturing in-plant and in-service performance of asphalt mixtures cleaner technologies. *Journal of Cleaner Production*. 121, pp. 56-63.

[9] Chomicz-Kowalska, A.; Gardziejczyk, W.; Iwański, M. (2016) Moisture resistance and compactibility of asphalt concrete produced in half-warm mix asphalt technology with foamed bitumen. *Construction and Building Materials*, 126, pp. 108-118.

[10] Sharma, A. y Lee, B. (2016) Energy savings and reduction of CO2 emission using Ca(OH)₂ incorporated zeolites as an additive for warm and hot mix asphalt production. *Energy*, Accepted In-press

[11] Wozuk, A. y Franus, W. (2016) Properties of the Warm Mix Asphalt involving clinoptilolite and Na-P1 zeolite additives. *Construction and Building Materials*, 11, pp. 556-563.

[12] Xiao, F.; Wenbin Zhao, PE.; Amirkhanian, SN. (2009) Fatigue behavior of rubberized asphalt concrete mixtures containing warm asphalt additives. *Construction and Building Materials*, 23, 3144-3151.

[13] Moreno-Navarro F. y Rubio-Gámez MC (2013) UGR-FACT test for the study of fatigue cracking in bituminous mixes. *Construction and Building Materials* 43: 184-190.

[14] Moreno-Navarro F. y Rubio-Gámez MC. (2016) A review of fatigue damage in bituminous mixtures: Understanding the phenomenon from a new perspective. *Construction and Building Materials*, 113, pp. 927-938.

[15] Moreno-Navarro F. y Rubio-Gómez MC. (2014) Mean damage parameter for the characterization of fatigue cracking behavior in bituminous mixes. *Materials and Design* 54: 748-754.

[16] D'Angelo, J.; Harm, E.; Bartoszek, J.; Baumgardner, G.; Corrigan, M.; Cowser, J.; Harman, T.; Jamshidi, M.; Jones, W.; Newcomb, D.; Prowell, B.D.; Sines, R.; Yeaton, B. (2008) *Warm-Mix Asphalt: European Practice*. Report No. FHWA-PL-08-007. Alexandria, Estados Unidos.

[17] Vaiana, R.; Luele, T.; Gallelli, V. (2013) Warm mix asphalt with synthetic zeolite: a laboratory study on mixes workability, *Int. J. Pavement Res. Technol.* 6 pp. 562–569.

[18] Larsen, O.R.; Moen, O.; Robertus, C.; Koenders, B.G. (2004) WAM-Foam asphalt production at lower operating temperatures as an environmental friendly alternative to HMA, in: *3er Eurasphalt & Eurobitume Congress*. Viena, Austria.



Cepsa Comercial Petróleo S.A.U.
Paseo de la Castellana 259A · 28046 Madrid (España)
Teléfono Atención al Cliente: +34 91 337 75 55
www.cepsa.com