

IAG120-06-2013

**LA FABRICACIÓN DE MEZCLAS SEMICALIENTES EN CUBA CON EL
EMPLEO DE ZEOLITA NATURAL DEL YACIMIENTO DE TASAJERAS
FABRICAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS EM CUBA COM
USO DE ZEÓLITAS NATURAL DE TASAJERAS**

Dra. Anadelys Alonso Aenlle
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría, CUJAE
La Habana, Cuba
anadelys@civil.cujae.edu.cu

Dr. Eduardo Tejeda Piusseaut
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría, CUJAE
La Habana, Cuba
etejeda@civil.cujae.edu.cu

RESUMEN

Con el objetivo de reducir los impactos ambientales en la fabricación de mezclas asfálticas semicalientes se han realizado investigaciones para la producción de mezclas asfálticas fabricadas a menores temperaturas que las convencionales, obteniendo las denominadas mezclas asfálticas semicalientes. Éstas son clasificadas de acuerdo a la técnica utilizada, ya sea por la modificación del proceso de producción en planta o por el empleo de aditivos, como por ejemplo las zeolitas sintéticas. La existencia de grandes yacimientos en Cuba de zeolita natural y la similitud en las propiedades físico-químicas a las de la zeolita sintética comúnmente empleadas en la fabricación de estas mezclas, favorece el estudio de ésta como aditivo para reducir la temperatura de fabricación de las mezclas en caliente en Cuba. La experimentación llevada a cabo en este trabajo contempla el estudio de diferentes mezclas fabricadas con zeolita natural, añadida en forma de filler y de arena. Se hicieron ensayos de estabilidad Marshall, deformación, densidad, módulo de rigidez y sensibilidad al agua. Se demostró la posibilidad de emplear zeolita natural en ambas granulometrías para reducir las temperaturas de fabricación de las mezclas asfálticas. Este trabajo contiene una primera experiencia con resultados de laboratorio, que muestran las potencialidades de este mineral para reducir la temperatura de mezclado y compactación.

PALABRAS CLAVES: mezclas asfálticas semicalientes, zeolitas naturales, temperaturas, estabilidad.

RESUMO

Com o objetivo de reduzir os impactos ao meio-ambiente dos fabricação de misturas asfálticas a quente, surgieron as misturas asfálticas em temperaturas menores que as utilizadas, obtivendo as misturas asfálticas mornas. Entre as diversas tecnologias desenvolvidas e utilizadas mundialmente para a produção de misturas asfálticas mornas é possível destacar a adição de zeólitas sintéticas ou naturais. As zeólitas naturais que existem em Cuba, tinem similares propriedades físico-químicas às sintética. O trabalho pretende apresentar os primeiros resultados obtidos na produção de uma mistura asfáltica morna com adição de zeólitas naturais, abordando principalmente os ensaios de laboratório, com o objetivo de reduzir as temperaturas de fabricação de as misturas asfálticas em Cuba. Os experimentos realizados contienen o estudo de diferentes

misturas fabricadas com zeólitas naturais, empelada com polvo y areia. O projeto foi elaborado através do método de dosagem Marshall e foram realizados ensaios de estabilidade e fluência Marshall, módulo de resiliência, resistência à tração por compressão diametral, dano por umidade induzida e adesividade. Se demostro a possibilidade de uso de zeólitas naturais cubanas com polvo y areia. Este trabalho contiene uma primeira experiência que demostra as potencialidades del mineral para reduzir as temperaturas de mezclado e compactação.

PALABRAS CLAVES: misturas asfálticas mornas, zeólitas naturais, temperaturas, estabilidades.

INTRODUCCIÓN

La investigación sobre materiales sostenibles implica la obtención de nuevos métodos que puedan tratar aspectos ambientales como el calentamiento global. El impacto provocado por la producción de mezclas asfálticas sobre la calidad del aire se debe fundamentalmente al empleo de altas temperaturas en la fabricación en planta y para su puesta en obra (Goh Shu, You et al. 2007). Es por esto, que desde hace varios años la industria asfáltica ha venido desarrollando nuevos productos y procedimientos que conlleven al ahorro energético y la disminución de la contaminación ambiental, los cuales han sido enfocados especialmente en la fabricación de mezclas a temperaturas inferiores a las convencionales (150-180°C) (Reyes Ortiz, Pérez Jiménez et al. 2010). Para lograr este objetivo, el propósito más reciente lo constituyen los procesos de Mezclas Asfálticas Semicalientes (Warm Mix Asphalt, WMA, por sus siglas en inglés). Varios son los criterios empleados para diferenciar las mezclas bituminosas. La figura 1 muestra una clasificación de estas atendiendo a la temperatura de fabricación. También se indica el consumo de combustible por tonelada de mezcla para cada tipo y temperatura de producción (D'Angelo, Harm et al. 2008).

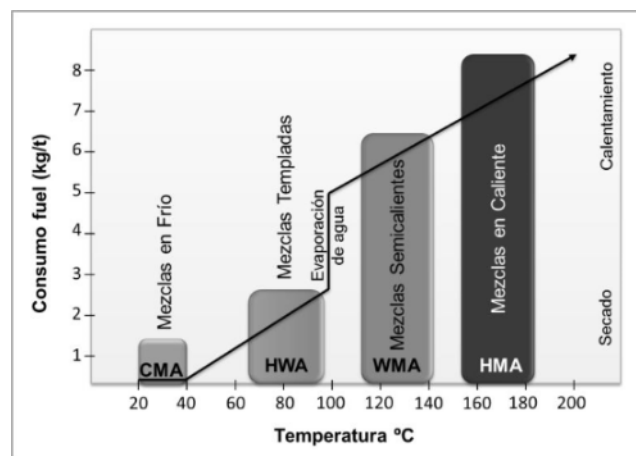


Figura 1: Clasificación aproximada de los diferentes tipos de mezclas por rango de temperatura y consumo de combustible.

Se denominan mezclas asfálticas semicalientes las que, gracias al empleo de determinados procedimientos, pueden ser fabricadas a temperaturas del orden de los 30° a 40°C por debajo de las utilizadas para las mezclas tradicionales en caliente. Los procesos que suelen emplearse son:

la doble envuelta, la adición de zeolitas sintéticas, el espumado del betún o la adición de ceras o parafinas (Romier, Audeón et al. 2004). Por otra parte, investigaciones hechas con productos denominados tensoactivos han demostrado iguales prestaciones que los enunciados anteriormente (Reyes Ortiz, Pérez Jiménez et al. 2010). Todos ellos con un fundamento común: reducir la viscosidad del betún para poder fabricar, transportar y poner en obra mezclas bituminosas a temperaturas más bajas, sin perder su trabajabilidad ni características. Esto se traduce, tanto en la central como en la puesta en obra, en una apreciable reducción de emisiones gaseosas, de humos y de olores, así como en un proceso de extendido y compactación semejantes, incluso en condiciones climáticas poco favorables (del Val 2005). Actualmente las dos tecnologías principales que han empleado zeolita sintética en el diseño de mezclas son Aspha-min® desarrollada por Alemania (Eurovia) y Advera® por Estados Unidos. Ambos métodos permiten reducir la temperatura de extendido y compactación de las mezclas, sin que se produzca un detrimento en la trabajabilidad, ni en la calidad de la misma (Von Devivere, Barthel et al. 2003). Las zeolitas son estructuras de silicatos con grandes espacios vacíos que permiten la presencia de cationes tales como Sodio (Na) y Calcio (Ca) y de moléculas de agua (H₂O). La mayoría de las zeolitas se caracterizan por su habilidad de perder y absorber agua sin dañar su estructura cristalina. Las zeolitas empleadas en estos procesos son aluminosilicatos de alcalimetales sintéticos, con la siguiente fórmula química (Harnischfeger 2007; D'Angelo, Harm et al. 2008; Hirsch may 2007):



Cuando se emplean en la fabricación de mezclas asfálticas, la zeolita, al añadirla a la mezcla y entrar en contacto con los materiales a temperaturas superiores a los 100°C, libera el agua que contiene en su estructura y crea un efecto espumado en el betún, que provoca la reducción en la viscosidad del mismo y facilita la envuelta de los áridos a menores temperaturas que las empleadas normalmente en las mezclas tradicionales. El mezclado tiene lugar entre 130° y 140°C y es importante que las partículas liberen el agua contenida en varios pasos y no de una sola vez. (Von Devivere, Barthel et al. 2003). El desprendimiento gradual del agua provee un periodo de 6 a 7 horas de trabajabilidad mejorada mientras que la temperatura se mantiene por encima de los 100°C (212°F) (Harnischfeger 2007; D'Angelo, Harm et al. 2008; Hirsch may 2007).

Las ventajas que presenta la aplicación de este proceso se resumen en una reducción artificial de la viscosidad del ligante, favorece la manejabilidad, permite el mezclado a temperaturas inferiores a las mezclas convencionales (20-30°C menos), produce un ahorro de un 20% en la cantidad de combustible consumido por la planta, reduce las emisiones de COV (compuestos órgano-volátiles), SO₂, NO₂, CO₂, que se estiman en el rango 18-23% (Bueche 2009) y se obtienen mejoras en el nivel de compactación y en la resistencia a las deformaciones permanentes, con un reducido contenido de huecos (Bueche 2009).

En esta investigación se trazó como objetivo general evaluar las condiciones en las que la zeolita natural puede utilizarse en la fabricación de mezclas semicalientes, para lo cual se comenzó con una comparación entre mezclas con zeolita sintética y zeolita natural. Se hicieron ensayos de estabilidad Marshall, deformación, densidad, porcentaje de huecos mezcla y áridos. El resultado de estos análisis arrojó un similar comportamiento de las mezclas con zeolita natural al de las que se les añade zeolita sintética, pero menor en ambos caso a las mezclas convencionales. Comparando los resultados para la adición de la zeolita natural como filler y como arena, muestra un mejor comportamiento global de los parámetros las mezclas con zeolita natural como filler, teniendo el ahorro de material que representa. Este trabajo contiene una primera experiencia con resultados de laboratorio, que muestran las potencialidades de este mineral para reducir la temperatura de mezclado y compactación.

1. Metodología.

1.1. Materiales empleados.

Las mezclas diseñadas fueron del tipo AC 16 SURF 50/70 S (2004), empleando tres fracciones de áridos y un filler de aportación, ambos de origen calizo. Al árido se le practicaron los ensayos correspondientes de caracterización de los mismos, aportando que cumplen las especificaciones para ser utilizados en mezclas asfálticas. El ligante empleado en la fabricación de todas las mezclas fue un betún de penetración 50/70, adicionado en porcentaje del 4,3% sobre el peso de la mezcla (previamente obtenido mediante el estudio de la fórmula de trabajo). De la misma manera las propiedades del asfalto están en correspondencia con las exigencias para carretas.

Como aditivos se emplearon una zeolita sintética (Aspha-min®, Eurovía) y una zeolita natural de la cantera de Tasajera en la provincia Villa Clara en Cuba.

La zeolita sintética es un aluminosilicato de sodio que contiene alrededor de un 20% de agua de cristalización, la cual se desprende a temperaturas superiores a los 100°C. Se comercializa en forma de polvo blanco muy fino y en forma granular, y normalmente es adicionada en cantidades del entorno de 0,3% sobre el peso de la mezcla (Harnischfeger 2007; Prowell 2007; D'Angelo, Harm et al. 2008; Hirsch may 2007), justo antes o al mismo tiempo que es añadido el betún. La liberación del agua crea un efecto de espumado que produce un aumento en el volumen del betún, reduciendo su viscosidad (Harnischfeger 2007; Prowell 2007; D'Angelo, Harm et al. 2008; Hirsch may 2007). Así, resulta extremadamente importante que la adición de la zeolita no prolongue el proceso de mezclado, de forma que su adición no influya en el funcionamiento de la planta (Von Devivere, Barthel et al. 2003). Todos los tramos de prueba que se han construido hasta la fecha, demuestran que las mezclas producidas con Aspha-min® no manifiestan cambios respecto a las mezclas tradicionales (Von Devivere, Barthel et al. 2003), aunque Martins Zaumanis (Zaumanis 2010), señala que las pruebas de campo construidas en Estados Unidos y Europa no sobrepasan los 7 y 10 años respectivamente, por lo cual existen incertidumbres relacionadas con el comportamiento a largo plazo de los pavimentos construidos con estas mezclas.

La zeolita natural cubana es un mineral abundante en el país, estando distribuida en varias provincias, siendo considerada como una de las mayores reservas mundiales. Tienen un contenido zeolítico superior al 50%, fundamentalmente de clinoptilolita y mordenita (Gutiérrez Duque). Este mineral es un producto altamente cotizado a nivel mundial, del cual se conocen grandes beneficios en un sin número de aplicaciones industriales, a merced de sus propiedades físico-químicas. La agricultura, la construcción y la medicina son algunos de los sectores donde se ha probado su utilidad; además es muy eficaz en el tratamiento de aguas residuales y potabilizadoras (nov 2007). Tienen la capacidad de almacenar grandes cantidades de agua en sus moléculas, característica que hace posible su aplicación en las mezclas asfálticas para producir el espumado del asfalto y reducir su viscosidad. Todas estas propiedades están asociadas a su estructura, almacén molecular y a su composición catiónica, que en el caso de las zeolitas naturales suele ser:



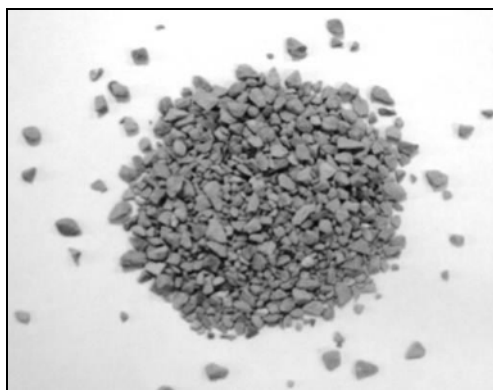
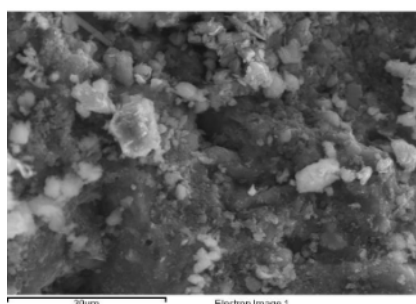


Figura 2. Zeolita natural en forma de grano.

La zeolita natural se sometió al ensayo de microscopía electrónica utilizando un microscopio de barrido (scanning microscope) JEOL JSM-6300, que permitió conocer la composición química de la zeolita (figura 3 (a) y (b)), tanto de la muestra en general como en algunos espectros analizados. Una imagen ampliada de la estructura de la zeolita viene recogida en la figura 3 (a), donde puede observarse una muestra bastante homogénea, dado que casi todas las partículas presentan el mismo brillo.



(a)

Element	Weight%	Atomic%
O	43.96	58.99
Na	1.98	1.85
Al	6.81	5.42
Si	39.44	30.15
K	2.02	1.11
Ca	1.69	0.90
Fe	4.11	1.58
Totals	100.00	

(b)

Figura 3. Imagen microscópica general de la zeolita natural cubana (a) y composición química (b).

1.2. Plan de ensayos.

Se llevaron a cabo diferentes comparaciones con el objetivo de analizar la posibilidad del uso de la zeolita natural en las mezclas asfálticas, en aras de reducir la temperatura de fabricación y con esto el consumo de combustible y las emisiones de sustancias contaminantes. En todos los casos se tomó como referencia una mezcla patrón. La misma se trabajó con una temperatura de mezclado entre 150-160°C y de compactación de 145-155°C, por su parte las mezclas con adición de zeolitas se trabajaron con temperaturas de mezclado de 130-140°C y de compactación de 120-125°C (tabla 1). El betún fue calentado para todas las mezclas entre 150-160°C. El procedimiento de diseño seguido fue el mismo en todos los casos y de forma idéntica que para las mezclas convencionales, con la particularidad que el aditivo se mezcla justo antes o en el momento en que se añade el betún. En todos los casos se fabricaron 3 probetas por cada mezcla.

Tabla 1. Condiciones de diseño de las mezclas fabricadas.

Parámetros	Tipo de mezcla	
	Mezcla Patrón	Mezclas con zeolitas
T° de los áridos (°C)	150–160	130–140
T° del betún (°C)	150–160	150–160

T° de mezclado (°C)	150–160	130–140
T° de compactación (°C)	145–155	120–125
Tiempo de mezclado (min)	3	3

2.2.1- Comparación de mezclas fabricadas con zeolita sintética y natural.

Con el propósito de valorar si la zeolita natural produce el mismo efecto en las mezclas asfálticas que una zeolita sintética, se prepararon tres mezclas, una convencional como patrón de referencia, una con zeolita sintética y otra con zeolita natural. Los aditivos se añadieron en forma de filler en un 0,3% de la mezcla, como plantea la bibliografía (Harnischfeger 2007; Prowell 2007; D'Angelo, Harm et al. 2008; Hirsch may 2007). En la tabla 2 y en la figura 4, se muestran el peso específico de las tres mezclas ensayadas y el huso granulométrico empleado respectivamente.

Tabla 2. Peso específico de los áridos combinados para las diferentes mezclas ensayadas.

Mezcla	Patrón	0,3% Zeo Sint (filler)	0,3% Zeo Nat (filler)
PEcomb.	2,83	2,80	2,80

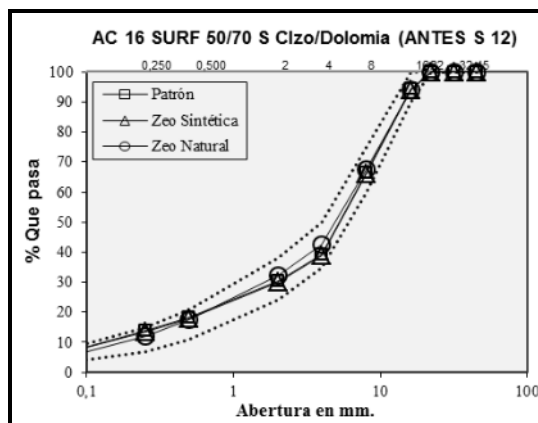


Figura 4. Granulometría de las mezclas.

Análisis de los resultados.

En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos de este primer objetivo, referentes a la estabilidad Marshall, deformación, densidad y porcentaje de huecos en la mezcla y en los áridos.

Tabla 3: Resultados de los parámetros Marshall evaluados en las mezclas.

	Densidad (g/cm ³)	Estabilidad (kN)	Deformación (mm)	Huecos Mezcla (%)	Huecos Áridos (%)
Patrón	2,503	15,22	2,82	3,7	14,6
Zeolita sintética	2,481	11,70	2,63	4,6	15,4
Zeolita natural	2,483	11,33	2,90	6,0	16,7

- Al utilizar zeolita en las mezclas la densidad disminuye respecto a la patrón, debido a que la temperatura de fabricación empleada (130°-140°C), puede afectar la compactación de la mezcla.

- Relacionado con los valores de densidad, el empleo de zeolita afecta el porcentaje de huecos. Este parámetro en la mezcla con la zeolita natural es superior al obtenido con la zeolita sintética.
- La utilización de zeolita en las mezclas hace que la estabilidad disminuya con respecto a la mezcla patrón. La pérdida de resistencia está relacionada con la reducción de la densidad dada por las bajas temperaturas empleadas en el mezclado y la compactación.
- La deformación de las mezclas con zeolitas respecto a la mezcla patrón no muestra prácticamente variaciones. La mayor estabilidad corresponde a la mezcla patrón, sin embargo no es la que presenta mayor deformación, por lo que se puede deducir que las mezclas con zeolita son más deformables que la mezcla patrón, por lo cual sería aconsejable profundizar en los estudios sobre las variaciones en la deformación.

2.2.2- Adición de zeolita como arena.

Otro de los objetivos a evaluar fue la adición de zeolita natural en forma de arena (0-4mm), ya que este material puede obtenerse en diferentes tamaños. Así, se trabajó en el análisis de la influencia del incremento de zeolita, añadiendo cuatro porcentajes diferentes de arena (2%, 6%, 10% y 20%).

En la tabla 4 se presenta el peso específico de los áridos combinados (PE_{comb}) el cual tuvo variación en todas las mezclas dada la incorporación de diferentes porcentajes de arena de zeolita.

Tabla 4. Peso específico de los áridos combinados para las mezclas con adición de zeolita natural como arena.

	Adición de zeolita en arena				
	Patrón	2%	6%	10%	20%
PE áridos comb (g/cm^3)	2,83	2,79	2,77	2,75	2,69

La figura 5 muestra la granulometría de las mezclas evaluadas.

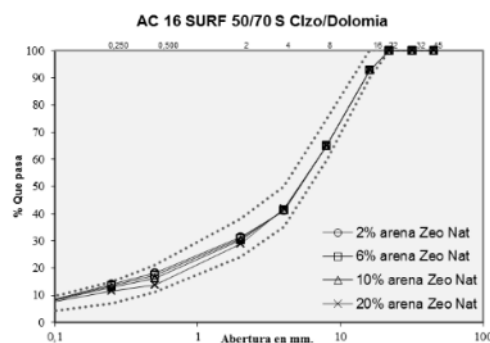


Figura 5. Granulometría de las mezclas con zeolita natural como arena.

Análisis de los resultados.

En las figuras de la 6 a la 10 se muestran los resultados de los ensayos realizados a las mezclas correspondientes al ensayo Marshall (densidad, estabilidad, deformación, huecos mezclas y áridos).

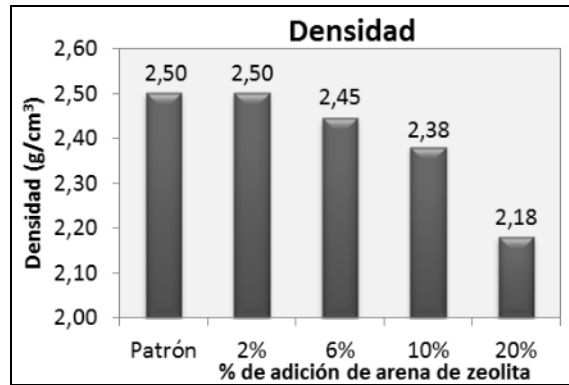


Figura 6. Densidad de las mezclas (arena de zeolita).

- A medida que aumenta el porcentaje de arena de zeolita natural, disminuye la densidad de las mezclas. Como la zeolita tiene menor densidad que los áridos a los cuales sustituye, su incremento produce reducción de la densidad de la mezcla, además de la reducción de las temperaturas de mezclado y compactación.
- La mezcla con 2% de arena de zeolita no experimenta cambios en la densidad. Posiblemente el incremento de zeolita no es significativo para producir los cambios de densidad.

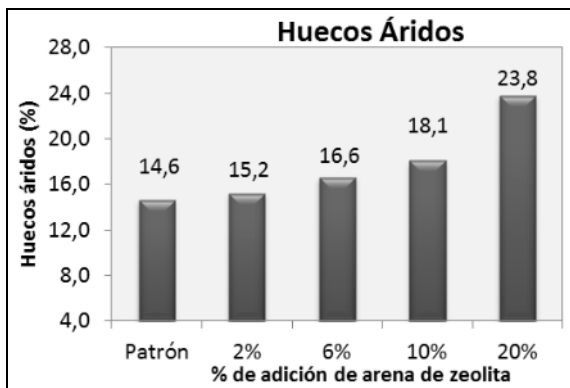


Figura 7. Huecos en los áridos (arena de zeolita).

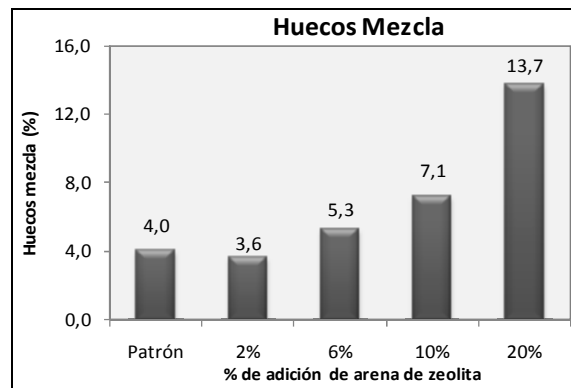


Figura 8. Huecos en la mezcla (arena de zeolita).

- El comportamiento de los huecos (áridos y mezcla) está en correspondencia con los valores de las densidades de las mezclas. A medida que disminuye la densidad aumentan los porcentajes de huecos en la mezcla y en los áridos, a tal punto que para el 20% de arena, la mezcla no cumple con las condiciones impuestas para soportar las cargas del tráfico más exigentes.

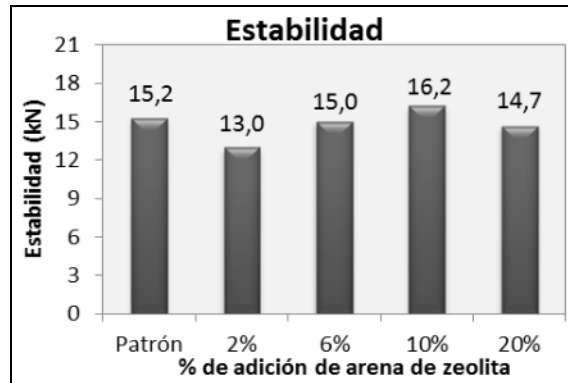


Figura 9. Estabilidad Marshall (arena de zeolita).

- Para el tipo de mezcla y contenido de betún ensayado, el aumento de la cantidad de zeolita natural como arena, hace que aumente la estabilidad Marshall de las mezclas hasta el 10%, a partir del cual comienza a disminuir. El incremento de zeolita como arena favorece la estabilidad de las mezclas, llegando a obtenerse incluso valores comparables con la mezcla patrón.

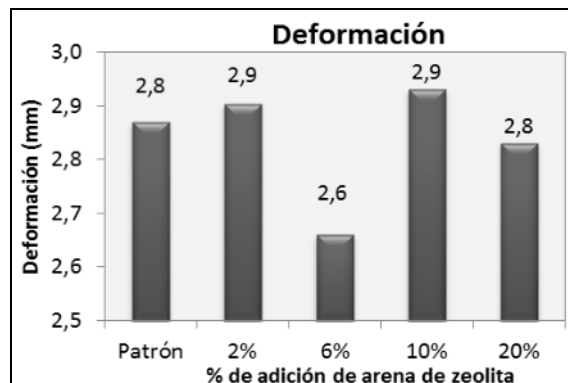


Figura 10. Deformación de las mezclas (arena de zeolita).

- La deformación muestra un comportamiento similar para todos los casos de adición de zeolita natural y para la mezcla patrón, manteniéndose en el rango de 2,6 a 2,9mm.

2.2.3- Influencia del incremento del filler de zeolita.

Tras comprobar que los resultados obtenidos para las mezclas con zeolita en forma de arena, no eran significativamente superiores a los obtenidos en los ensayos con filler, se decidió centrar el estudio en el empleo de la zeolita en forma de filler ya que además constituía un ahorro considerable de material.

Por tanto se decidió evaluar la influencia del aumento del filler de zeolita, para lo cual se compararon tres porcentajes (0,3%; 0,6% y 1%).

Los datos relacionados con los pesos específicos de los áridos combinados para los diferentes porcentajes de filler de zeolita se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Peso específico de los áridos combinados para las mezclas con adición de zeolita natural como filler.

Adición de filler de zeolita			
Patrón	0,3%	0,6%	1%

PE áridos comb (g/cm³)	2,83	2,80	2,84	2,82
--	------	------	------	------

Análisis de los resultados.

Seguidamente se presentan los resultados de los ensayos llevados a cabo para estas mezclas, estabilidad Marshall, deformación, densidad, huecos en la mezcla y en los áridos (figura 11 (a), (b), (c), (d) y (e)), tracción indirecta tanto en condiciones húmedas y secas (figura 12 (a) y (b)) y sensibilidad al agua (figura 13).

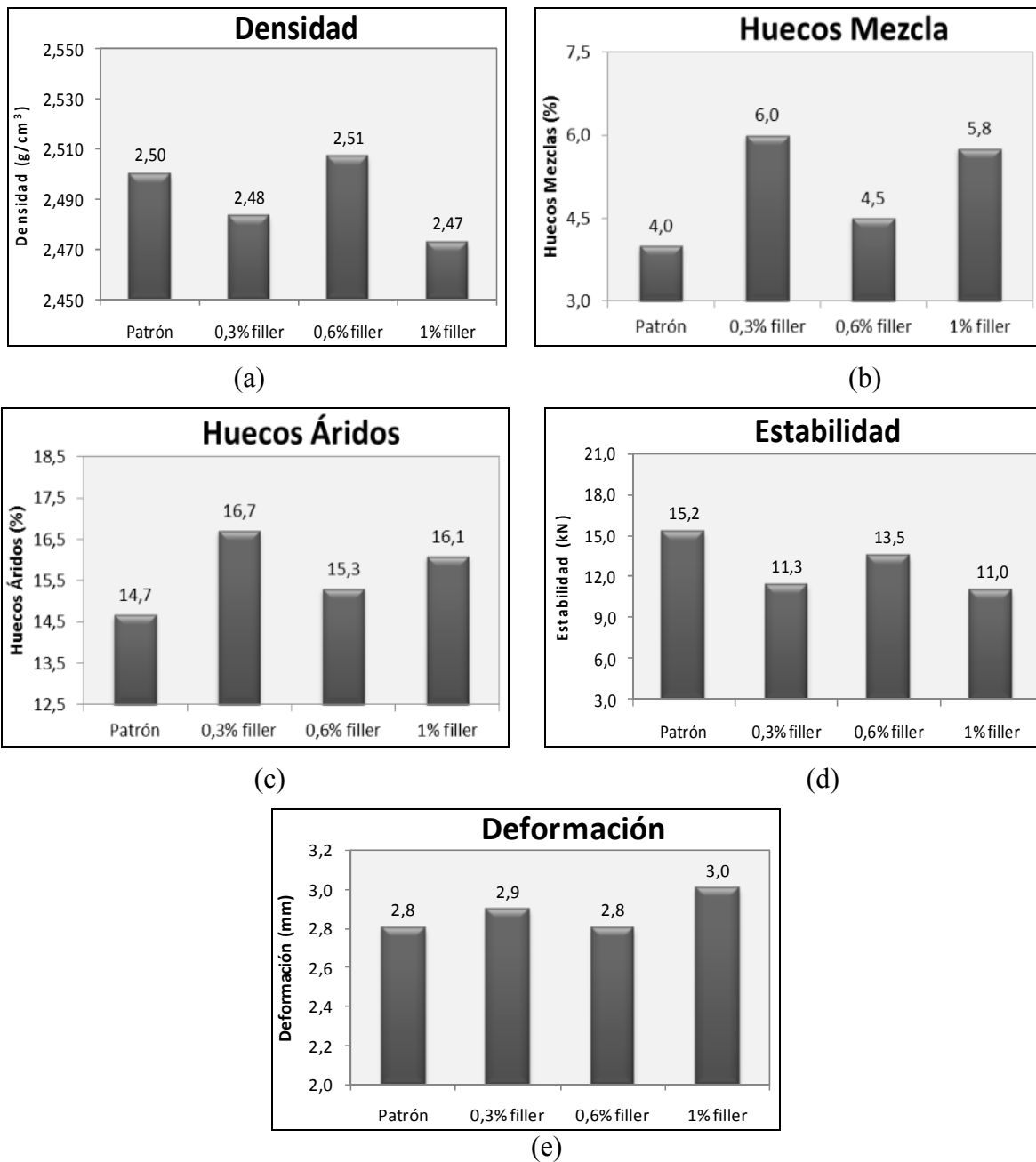


Figura 11. Resultados de los ensayos de densidad (a), porcentaje de huecos en la mezcla (b) y en los áridos (c), estabilidad (d) y deformación (e) de las mezclas ensayadas

- Se observa que el incremento de filler de zeolita para el tipo de mezcla y el contenido de betún ensayado, para todos los parámetros ensayados, tiene mejor comportamiento para la adición de 0,6%. En el caso de la densidad (figura 16 (a)), al añadir 0,6%, se obtienen valores similares que la mezcla patrón. Como en los análisis anteriores los resultados de los huecos mezclas (figura 16 (b)) y áridos (figura 16 (c)) se mantienen en correspondencia con los de las densidades, así como para la deformación que no muestra variaciones respecto a la mezcla patrón. Respecto a la estabilidad también se observa un mejor resultado para el 0,6% de filler, aunque los resultados son inferiores a la mezcla patrón.

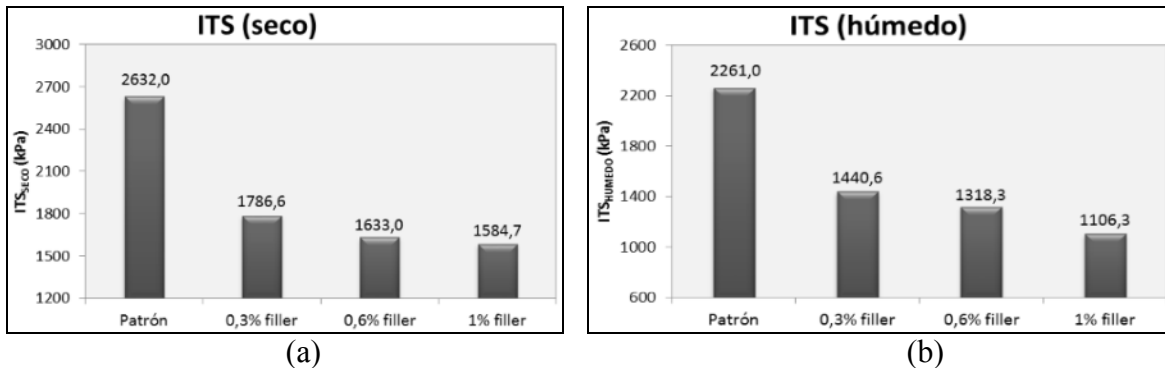


Figura 12. Resistencia a la tracción de las mezclas ensayadas en condiciones húmedas (a) y secas (b).

- Se observa una disminución de la resistencia a la tracción indirecta al añadir zeolita natural a las mezclas asfálticas, así como una disminución de la resistencia a tracción a medida que aumenta el contenido de filler, tanto para las probetas ensayadas en seco como en húmedo.

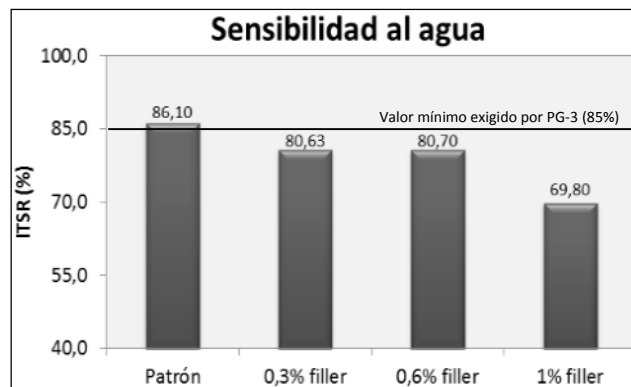


Figura 13. Sensibilidad al agua.

El PG-3 establece para mezclas de capa de rodadura un valor mínimo de 85%, se observa que las tres adiciones de zeolita se alejan un poco de este requerimiento, siendo el 0,3% y el 0,6% los resultados más cercanos a la especificación. Por lo cual en las mezclas con zeolita natural se pone de manifiesto ciertos problemas ante la presencia de agua, tal y como ya habían apuntado otras investigaciones en torno a mezclas semicalientes (Vaitkus, Čygas et al. 2009; Xiao and Amirkhanian 2010; Zaumanis 2010).

2. Conclusiones.

- 1- Es posible emplear zeolita natural cubana para el desarrollo de mezclas asfálticas semicalientes dada la similitud de la composición y características con la zeolita sintética y los resultados de los ensayos realizados a mezclas con ambos aditivos.
- 2- Parece más adecuado añadir la zeolita natural como filler de aportación en la mezcla, ya que los resultados obtenidos en forma de arena no son significativamente muy superiores, lo que representa un ahorro del aditivo. La adición de zeolita natural en forma de arena puede ser empleada siempre que el contenido de aditivo satisfaga, tanto las propiedades de las mezclas como los beneficios medioambientales que representa la utilización de este recurso (zeolita).
- 3- Para los materiales, mezclas y condiciones de ensayos de esta investigación, los mejores resultados en el ensayo Marshall y sensibilidad al agua (ITSR) fueron para la adición de 0,6% de filler de zeolita.
- 4- La cantidad de agua que aporta la zeolita al proceso, lógicamente se incrementa con la cantidad de material incorporado y existe un punto en el cual se supere el óptimo necesario para reducir la viscosidad del betún hasta los niveles deseados, para ese tiempo y temperatura de mezclado.

A pesar de la profundidad del estudio aquí presentado, resultaría interesante seguir profundizando en el comportamiento de este mineral natural como aditivo para la fabricación de mezclas bituminosas semicalientes. Así, sería bueno analizar el comportamiento a fatiga y a deformaciones plásticas de mezclas semicalientes con zeolita natural, su empleo en otro tipo de mezclas como son las porosas o discontinuas, o el estudio de aditivos que contrarresten el efecto de la humedad remanente en las mezclas y contribuyan a mejorar la sensibilidad al agua de este tipo de mezclas.

Referencias.

Comunicación libre: Mezclas semicalientes con Aspha-Min®. Ecología en acción.

Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). (2004)

Zeolita: ¿Dónde está el mineral del siglo? Juventud Rebelde. Santa Clara, Villa Clara. (nov 2007)

Bueche, N. Warm Asphalt Bituminous Mixtures with regards to energy, emissions and performance. Laboratoire des Voies de Circulation (LAVOC), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Switzerland. (2009)

D'Angelo, J., et al. Warm-Mix Asphalt: European Practice; International Technology Scanning Program. Washington, DC, USA, FHWA-HPIP, U.S. Department of Transportation. (2008)

del Val, M. A. Consideraciones ambientales sobre las mezclas asfálticas. Reciclado de mezclas. Mezclas semicalientes. (2005)

Goh Shu, W., et al. Laboratory Evaluation and Pavement Design for Warm Mix Asphalt. Proceedings of the 2007 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Center for Transportation Research and Education, Iowa State University, Ames, Iowa. (2007)

- Gutiérrez Duque, M. Planta compacta potabilizadora de aguas superficiales con zeolita. Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”, Cuba.
- Harnischfeger, S. Aspha-min Retrospectives and Prospects. BAST, Germany, Presentation to WMA Scan Team. (2007)
- Hirsch, V. Warm Mix Asphalt Technologies. BAST, Germany, Presentation to WMA Scan Team. (may 2007)
- Prowell, B. D. Warm Mix Asphalt. The International Technology Scanning Program, Summary Report. (2007)
- Reyes Ortiz, O. J., et al. El Proyecto Fénix en La UPC. Mezclas Semicalientes. (2010)
- Romier, A., et al. Low Energy Asphalt with the performance of Hot-Mix Asphalt. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board No. 1962(Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C.): 101-112. (2004)
- Vaitkus, A., et al. Analysis and evaluation of possibilities for the use of Warm Mix Asphalt in Lithuania. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering vol. 4, no. 2. (2009)
- Von Devivere, M., et al. Warm Asphalt Mixes by adding Aspha-min® a Synthetic Zeolite. Proceedings of the 22nd World Road Congress, PIARC, Durban, South Africa. (2003)
- Xiao, F. and Amirkhanian, S. Effects of liquid antistrip additives on rheology and moisture susceptibility of water bearing warm mixtures. Construction and Building Materials 24: 1649–1655. (2010)
- Zaumanis, M. Warm Mix Asphalt Investigation. Department of Civil Engineering. Denmark, Technical University of Denmark. Master of Science. (2010)