

Evaluación de la compactación de mezclas SMA con caucho de NFVU y aditivo de mezclas semicalientes

Juan Gallego ,
juan.gallego@upm.es
Ana María Rodríguez Alloza,
arodrial@ull.es

Leticia Saiz Rodríguez,
lsaiz@signus.es

Las mezclas asfálticas SMA exhiben un excelente comportamiento: son altamente resistentes a la fisuración reflejada y a la deformación permanente, además de proporcionar a la superficie de rodadura una textura óptima. Sin embargo, las temperaturas de producción y compactación son similares a la de las mezclas convencionales, lo que significa que hay un consumo significativo de energía, así como emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). La tecnología de mezclas semicalientes que se ha desarrollado en los últimos años podría permitir temperaturas de producción y compactación más bajas sin comprometer el comportamiento mecánico de las mezclas. Además, en las últimas décadas, las mezclas con caucho han demostrado ser efectivas para mejorar el comportamiento y ser sostenibles, pero requieren temperaturas de producción más altas que las mezclas convencionales. Para profundizar en el conocimiento de las mezclas SMA con caucho de neumáticos al final de su vida útil (NFVU) y fabricadas a temperaturas semicalientes, en este estudio se evalúa el efecto de un aditivo químico de mezclas semicalientes sobre la compactabilidad y la sensibilidad al agua de las mezclas SMA con caucho, comparando dos compactadores, el compactador Marshall y el compactador giratorio. La investigación ha demostrado que el compactador giratorio es más adecuado para estudiar la compactabilidad y la sensibilidad al agua de mezclas SMA con caucho y aditivos de mezclas semicalientes.

Palabras Clave: Mezcla SMA; mezclas semicalientes; caucho; compactador giratorio; compactador Marshall

SMA mixtures offer excellent performance in terms of resistance to reflective cracking and permanent deformation. The texture of the surface is suitable for the wearing course of roads and highways. Nevertheless, SMA mixtures are usually manufactured at high temperature, which means a significant amount of energy consumption and consequently, greenhouse gases. The addition of crumb rubber from end of life tires (ELT) has proved to be useful to enhance the performance of asphalt mixtures. Nevertheless, this modifier demands higher production temperatures. On the other side, the warm asphalt mix technologies developed over the last decade could allow lower production and compaction temperatures for rubberised SMA mixtures, without compromising the mechanical performance. The present paper reports the study of an SMA mixture incorporating ELT crumb rubber and produced at warm temperatures. The specimens were compacted by the Marshall compactor as well as the gyratory compactor. According to the results obtained, the gyratory compactor is more appropriate than the Marshall procedure to study the compactability and the water sensitivity of these asphalt mixtures.

Keywords: SMA mixture; warm asphalt mixtures; rubber; gyratory compactor; Marshall compactor.

Evaluación de la compactación de mezclas SMA con caucho de NFVU y aditivo de mezclas semicalientes

1. INTRODUCCIÓN

Las mezclas SMA ofrecen una mayor durabilidad, son altamente resistentes a la deformación permanente y a la fisuración reflejada además de proporcionar una superficie de rodadura con una textura adecuada. Estas características se basan en el alto contenido de ligante que se logra con un buen esqueleto mineral, una alta proporción de filler y frecuentemente la incorporación de aditivos, especialmente fibras de celulosa, que permiten un mayor contenido de ligante sin riesgo de escurrimiento.

Las fibras, incluidas las de celulosa, procedentes del reciclaje de cartón, y las fibras de poliamida son los aditivos estabilizadores más comunes para la prevención del escurrimiento del ligante [1]. Estos tipos de fibras de celulosa procedentes del reciclaje le dan a la mezcla SMA un excelente rendimiento contra el escurrimiento, la deformación plástica y la sensibilidad al agua [2]. Sin embargo, si las fibras funcionan como inhibidores de drenaje, se requiere un modificador como el estireno-butadieno-estireno (SBS) para lograr una modificación real del comportamiento reológico de la mezcla bituminosa [3].

El caucho, procedente de neumáticos al final de su vida útil (NFVU), también se puede incorporar en las mezclas SMA. Se ha demostrado que la incorporación de caucho en el ligante hace innecesaria la adición de fibras de celulosa en las mezclas de SMA, ya que los ligantes con caucho no son propensos al escurrimiento [4]. Se ha estudiado ampliamente la modificación de mezclas SMA con caucho existiendo un consenso sobre el hecho de que la modificación con caucho mejora la resistencia a las deformaciones plásticas [5,6]. También se ha demostrado que la incorporación de caucho de NFVU en una mezcla bituminosa mejora su módulo y su comportamiento a la fatiga [7]. También se ha observado que el uso de betún con caucho en capas de rodadura tiene un efecto sonorreductor, limitando la contaminación acústica del tráfico [8,9].

Sin embargo, las mezclas con caucho generalmente se producen a altas temperaturas debido a la elevada viscosidad del ligante, lo que a su vez resulta en un mayor consumo de energía y en una mayor producción de gases de efecto invernadero (GEI). La tecnología de mezclas semicalientes (WMA en inglés) puede reducir las temperaturas de fabricación y compactación, mejorando las condiciones de trabajo en obra y la sostenibilidad ambiental durante su vida de servicio. Esta tecnología se ha utilizado con frecuencia en mezclas sin cau-

cho en Europa [10] y en todo el mundo [11,12]. En el caso de mezclas con caucho, las principales tecnologías aplicadas en la reducción de temperatura son los aditivos orgánicos y los químicos [13], no siendo frecuente la aplicación de tecnologías de betún espumado.

Los aditivos orgánicos suelen ser ceras, con puntos de fusión de alrededor de los 110 ° C, que disminuyen la viscosidad del ligante con caucho y, por lo tanto, las temperaturas de fabricación y compactación. Con respecto a los aditivos químicos, según la literatura, por lo general están formados por un paquete de productos como tensioactivos, agentes emulsionantes, mejoradores de la envuelta y aditivos anti-stripping, y se agregan al ligante durante el proceso de fabricación. No reducen la viscosidad del ligante, pero favorecen la adhesión del árido-ligante a través de mecanismos que mejoran la envuelta.

En cuanto a la reducción de temperatura que se puede lograr con estas técnicas, depende del aditivo utilizado. Cuando se usan ceras orgánicas, se puede determinar la reducción de temperatura atendiendo a la reducción de viscosidad que ocasionan en el ligante. Sin embargo, es imprescindible estudiar la compactabilidad de las mezclas bituminosas para verificar que se compacten adecuadamente. En el caso de los aditivos químicos, el estudio de viscosidad no aporta nada, ya que estos aditivos no actúan sobre la viscosidad del ligante, y por tanto el estudio a realizar es el de compactabilidad de la mezcla bituminosa.

Según Wang et al. [13], dependiendo de la tecnología utilizada, se lograron reducciones de temperatura de entre 20 y 30 ° C. Y según Oliveira et al. [14] se obtuvieron reducciones de temperatura de 30 ° C en una mezcla SMA con un aditivo tensioactivo. A través de un estudio de la curva de compactación Marshall, determinaron esta reducción de temperatura y verificaron que hubo un ligero empeoramiento en la resistencia a la deformación plástica, mientras que el resto de las propiedades permanecieron aproximadamente constantes. Rodríguez-Alloza y Gallego [15,16] mostraron que la temperatura de trabajo de una mezcla discontinua con betún modificado con caucho podría reducirse en 30 ° C mediante la adición de ceras orgánicas. Sin embargo, la relación de tensión indirecta (ITSR) disminuyó con respecto a los valores para la mezcla de referencia. El método de compactación fue el Marshall, y se admitió un aumento en el contenido de huecos del 1%. Akisetty et al. también admitieron la misma tolerancia con respecto al con-

tenido de huecos [17], y obtuvieron una reducción de 30 °C en una mezcla densa con caucho y una cera, utilizando en este caso un compactador giratorio. Otras investigaciones han comparado los resultados obtenidos por Marshall y la compactación giratoria en mezclas SMA con caucho que incorporan ceras o aditivos químicos [18,19]. Las pruebas se realizaron para temperaturas de compactación de 160 y 144 ° C. Se observó que la compactación giratoria permitía una mejor distinción entre los diferentes aditivos y temperaturas. Al estudiar una mezcla con caucho densa, Lee et al. [20] encontraron que el estudio de la compactibilidad giratoria fue más sensible que el estudio con el compactador Marshall. Sin embargo, en mezclas sin caucho, ambos compactadores eran adecuados.

Uno de los problemas que se han observado al trabajar con mezclas con caucho a temperaturas reducidas ha sido el empeoramiento de la resistencia al ataque de agua. Este hecho quizás esté relacionado con la desestabilización de la estructura coloidal del betún debido a la absorción de aceites por el caucho reportado por Xu et al. [21] El ensayo ITSR ha sido el procedimiento más utilizado para estudiar la sensibilidad al agua de mezclas calientes sin caucho [22] y ha permitido establecer que el árido ácido es problemático y que la reducción de la temperatura exige un aditivo antistripping que supere los valores mínimos de ITSR admitidos en las especificaciones de las mezclas en caliente. Por ejemplo, Khedmati et al. [23] utilizaron un aditivo antistripping junto con una cera para mejorar la resistencia al agua de una mezcla SMA semicaliente con áridos síliceos, logrando una mejora significativa en los valores de ITSR. Para la fabricación de las probetas se usó la compactación giratoria. En otro estudio de una mezcla SMA con caucho y un aditivo tensioactivo que se diluyó al 99% de agua, con basalto como árido grueso y árido fino calizo, el valor de ITSR cayó del 85% al 75% al reducir la temperatura de trabajo de 180 a 160 ° C. Las probetas se compactaron con un compactador Marshall [24].

Con los resultados anteriores, parece claro que la reducción del ITSR puede verse influenciada por el tipo de aditivo utilizado, la magnitud de la reducción de temperatura y también por el método de compactación de las muestras. Sin embargo, en las mezclas semicalientes con caucho, que pueden ser difíciles de compactar, la influencia del método de compactación está poco estudiada. Debe tenerse en cuenta que cada procedimiento de compactación puede conducir a una reorganización diferente de las partículas minerales. Por ejemplo,

la compactación giratoria tiene un efecto de amasado que no se encuentra en la compactación Marshall. De acuerdo con Vega-Zamanillo et al. [25], al estudiar mezclas densas con aditivos de mezclas semicalientes y sin modificar con caucho, los valores de ITSR mejoraron cuando las muestras se compactaron con el compactador giratorio. Jiang et al. [26] también mostraron con el compactador Marshall que las propiedades mecánicas pueden disminuir un 20% respecto las de las muestras compactadas hasta la misma densidad, con una placa de vibración vertical. Varios estudios que han comparado los procedimientos de compactación de laboratorio con la compactación a escala real [27-29] han concluido que el compactador giratorio puede representar mejor la compactación de campo que otros compactadores de laboratorio.

Recientemente se han elaborado especificaciones para mezclas SMA en España (Art. 544 del PG-3). Aunque el método de compactación para el cálculo de huecos en mezcla sigue siendo el Marshall, se admite el compactador giratorio en el caso de mezclas SMA semicalientes. Sin embargo, en cuanto a la compactación de probetas para el ensayo de sensibilidad al agua, se menciona únicamente el compactador Marshall, sin distinguir si la mezcla es caliente o semicaliente. Sin embargo, los laboratorios de todo el mundo están usando cada vez más el compactador giratorio [30].

Teniendo en cuenta la información mencionada anteriormente, esta investigación tuvo como objetivo comparar los compactadores Marshall y giratorio para determinar el procedimiento óptimo para estudiar la compactibilidad y para la fabricación de probetas para ensayar la sensibilidad al agua (ITSR) de mezclas de SMA con caucho y un aditivo de mezclas semicalientes de origen vegetal. Este tipo de mezcla puede ofrecer un campo excelente para comparar ambos métodos, ya que la conjunción del caucho y la temperatura reducida puede requerir una mayor atención al proceso de compactación.

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1. Materiales

2.1.1. Ligantes, caucho, polímero y aditivo de mezclas semicalientes

En este estudio se utilizaron dos ligantes vírgenes diferentes: betunes de penetración 50/70 y 160/220. El caucho fue

Evaluación de la compactación de mezclas SMA con caucho de NFVU y aditivo de mezclas semicalientes

fabricado por molienda mecánica a temperatura ambiente. La granulometría del caucho se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Granulometría del caucho

Tamiz (mm) (UNE EN 933-2)	Pasa (%)
2	100
1,5	100
1	100
0,5	94,1
0,25	23,7
0,125	3,7
0,063	0,4

El contenido de caucho fue del 10% sobre el peso del ligante. También se añadió SBS (estireno-butadieno-estireno), que es un elastómero termoplástico sintético, en una proporción del 2,5% sobre el peso del ligante. El aditivo químico seleccionado para reducir las temperaturas de compactación fue un producto líquido, de origen vegetal, con propiedades tensioactivas. Además, es termorresistente y estable al almacenamiento, y mejora la adhesividad árido-ligante. Está formulado con compuestos naturales de origen vegetal exentos de cualquier calificación de peligrosidad. El proveedor recomienda una dosis del 0,5% sobre el peso del ligante. En este estudio se denominará con la letra "T".

El ligante modificado para esta investigación se fabricó en el laboratorio teniendo en cuenta la experiencia previa de los autores. En cuanto al procedimiento para modificar ligantes en el laboratorio, se tomó una porción de 600 g de betún virgen en un baño de aceite a 140 ° C manteniendo la temperatura con

una precisión de ± 1 ° C. Después de esto, los aditivos químicos se añadieron al betún y se mezclaron durante 15 minutos a 900 rpm. La mezcla se calentó hasta 185 ° C, luego se añadió el caucho y la muestra se agitó durante 45 minutos a 4000 rpm. Después de eso, se añadió el polímero SBS, el ligante se agitó durante 15 minutos a 4000 rpm y, finalmente, la temperatura se ajustó a 165°C y se mezcló a 900 rpm durante 15 minutos. El ligante así fabricado se incorporó a la fabricación de mezclas de SMA. La composición de los ligantes modificados en este estudio se basó en una formulación estándar para producir un PMB 45/80-65C con un rango de 45–80 × 10–1 mm para penetración (EN-1426) y una temperatura de anillo y bola igual o superior a 65 ° C. Es común preparar primero un betún base compuesto de 50/70 × 10–1 mm de penetración y 160/200 × 10–1 mm de penetración. En este caso particular, la proporción fue del 50% al 50%. Posteriormente, se añadió el aditivo T, el caucho y el polímero SBS. La Tabla 2 presenta una caracterización básica del punto de reblandecimiento (EN 1427), penetración (EN 1426) y recuperación elástica (EN 13398) de los ligantes vírgenes y modificados en esta investigación.

2.1.2. Áridos

Los siguientes áridos se usaron para producir las mezclas SMA modificadas con caucho (RSMA); ofita como árido grueso, piedra caliza como árido fino y filler calcáreo. Las diferentes fracciones y porcentajes se pueden ver en la Tabla 3 y en la Figura 1.

Tabla 2. Nombre, composición y caracterización básica de los ligantes

Nombre	Composición	Punto de reblandecimiento (°C) EN 1427	Penetración (10 ⁻¹ mm) EN 1426	Recuperación elástica (%) EN 13398
B	50% 50/70 + 50% 160/220	43,2	98,0	2,0
B+2.5S+10R	50% 50/70 +50% 160/220 +0,5%T +10% caucho +2,5%SBS	66,6	55,0	83,0

Tabla 3. Áridos

Áridos	Pasa (%)	Pasa (%)
Ofita	8/11	36,2
Ofita	4/8	36,0
Caliza	2/4	2,0
Caliza	0,5/2	9,0
Caliza	0,25/0,5	4,0
Caliza	0,063/0,25	4,0
Filler calcáreo		8,8

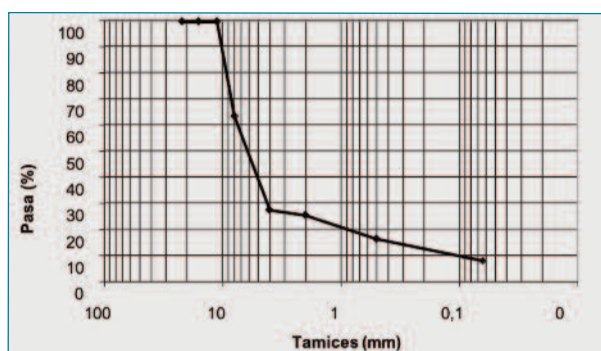


Figura 1. Curva granulométrica de las mezclas

2.1.3. Mezcla de control RSMA y mezclas W-RSMA+T

En este estudio, se fabricaron dos mezclas bituminosas diferentes: la mezcla de control es una mezcla SMA con caucho, la cual se ha denominado RSMA. Y luego están las mezclas SMA con caucho y con aditivo de mezclas semicalientes, denominadas W-RSMA+T, las cuales fueron fabricadas a diferentes temperaturas. Todas las mezclas contenían 6,2% de betún modificado sobre el peso de los áridos. En la Tabla 4 se presenta una lista de las mezclas estudiadas. Se incluye el nombre del ligante, así como el contenido de caucho, SBS y aditivo semicaliente T, y las temperaturas seleccionadas para la producción de las mezclas.

La temperatura de fabricación de la mezcla de control RSMA fue la temperatura habitual para este tipo de mezclas (165 °C). Las tem-

peraturas de fabricación de las mezclas W-RSMA+T fueron la misma que la de la mezcla de control (165 °C) y, para evaluar la eficacia del aditivo químico, también 155 °C, 145 °C y 135 °C.

2.2. Ensayos

2.2.1. Compactibilidad

Los ensayos se realizaron de acuerdo con la norma europea EN 12697-10. Esta norma considera dos procedimientos de prueba: impacto o compactación giratoria. Con la compactación por impacto, las muestras se prepararon a las temperaturas seleccionadas y se compactaron usando el compactador Marshall siguiendo la norma EN 12697-30 (preparación de muestras por compactador de impacto), con la energía de 100 golpes en cada lado, establecida en la norma de compactibilidad EN 12697-10. La variación en el espesor de la muestra fue monitoreada en función del número de golpes y registrada durante la operación de compactación. Se analizaron cuatro muestras para cada mezcla en estudio. Por otro lado, con la compactación giratoria (EN 12697-31, preparación de muestras mediante compactador giratorio), la variación de la densidad de la mezcla se representa en función del número de giros. Los parámetros del compactador fueron una aplicación de presión vertical de 600 kPa, un ángulo interno de compactación de 0.82 ° y una velocidad de 30 rpm. Se analizaron tres probetas para cada temperatura para obtener una curva de densidad media, a lo largo de los 200 giros que establece la norma de compactibilidad EN-12697-10.

Tanto en la compactación Marshall como en la compactación giratoria, estas curvas de densificación a diferentes temperaturas se compararon posteriormente para determinar la reducción de temperatura teóricamente admisible. En este estudio, la nomenclatura de cada mezcla se refiere a su temperatura de fabricación. Sin embargo, en todos los casos, las temperaturas de compactación se establecieron a 10 °C por debajo de la temperatura de fabricación para considerar la pérdida de temperatura durante el transporte de la mezcla desde la central de mezclas hasta el tajo de extendido.

Tabla 4. Mezclas estudiadas

Mezcla	Ligante	SBS (%)	Caucho (%)	Aditivo Semicalientes (%)	Tª Fabricación (°C)
RSMA	B + 10R + 2,5 S	2,5	10	0	165
W-RSMA+T	B + 0,5 T + 10 R + 2,5 S	2,5	10	0,5	165, 155, 145, 135

Evaluación de la compactación de mezclas SMA con caucho de NFVU y aditivo de mezclas semicalientes

2.2.2. Sensibilidad al agua

La sensibilidad al agua de las mezclas asfálticas se determinó de acuerdo con EN 12697-12. Este procedimiento es el más utilizado para estudiar la resistencia al ataque de agua en mezclas bituminosas [22]. Se fabricaron una serie de muestras con el compactador de impacto Marshall y una segunda serie con el compactador giratorio. Independientemente del método de compactación, se reservaron cuatro muestras secas a temperatura ambiente (20 °C), mientras que se colocaron cuatro especímenes en un baño termostático de agua durante tres días a 40 °C. Después de este período, todas las muestras se colocaron en un baño termostático a 15 °C durante dos horas antes de someterlas al ensayo de resistencia a tracción indirecta (ITS), de acuerdo con EN 12697-23. Finalmente, para analizar la sensibilidad al agua, se calculó la relación (ITSR) entre los resultados de resistencia promedio de las muestras húmedas (ITS_w) y secas (ITS_d). En todos los casos, se determinó la densidad máxima (EN 12697-5), la densidad aparente (EN-12697-6) y el contenido de huecos por el método de superficie seca saturada (EN 12697-8).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Compactibilidad con el compactador Marshall

Las curvas de compactibilidad con el compactador Marshall para la mezcla de control RSMA a 165 °C y las mezclas W-RSMA+T a diferentes temperaturas se presentan en la Figura 2. Se incluye un aumento de las curvas para una observación más precisa de la posición relativa entre las curvas. La temperatura recomendable para la fabricación de las mezclas W-RSMA+T se corresponde a la temperatura a que se logra una curva de densificación lo más cercana posible a la curva de referencia de la mezcla RSMA fabricada a 165 °C.

Puede observarse en la Figura 2 que, a medida que se redujo la temperatura de fabricación de las mezclas W-RSMA+T, la densidad disminuyó. La curva de la mezcla de control (RSMA 165 °C) y la curva W-RSMA+T a 155 °C están prácticamente superpuestas, lo que significa una posible reducción de aproximadamente 10 °C. Debe destacarse que ésta es una reducción pequeña en la temperatura. Parece que el aditivo vegetal no es eficiente o que el método Marshall no puede evaluar adecuadamente su efecto sobre la compactibilidad de la mez-

cla asfáltica.

3.2. Compactibilidad con compactador giratorio

De acuerdo con Lee et al. [20], el compactador Marshall parece ser menos sensible a la reducción de temperatura que el compactador giratorio. Por lo tanto, el estudio de compactibilidad se repitió utilizando el compactador giratorio. La Figura 3 presenta las curvas de compactibilidad. Usando este método, se obtuvo la variación del porcentaje de densidad máxima (% Gmm) frente al número correspondiente de giros. Se incluye un detalle aumentado de la sección final de las curvas de densificación para que las curvas puedan analizarse en detalle y pueda hacerse una estimación de la reducción de temperatura admisible. Para las mezclas W-RSMA+T con aditivo (Figura 3), la reducción alcanzable de la temperatura de producción es de alrededor de 20 °C. Cabe señalar que la curva de la mezcla de control (RSMA 165 °C) y la curva de mezcla producida a 145 °C (W-RSMA + T 145 °C) casi se superponen.

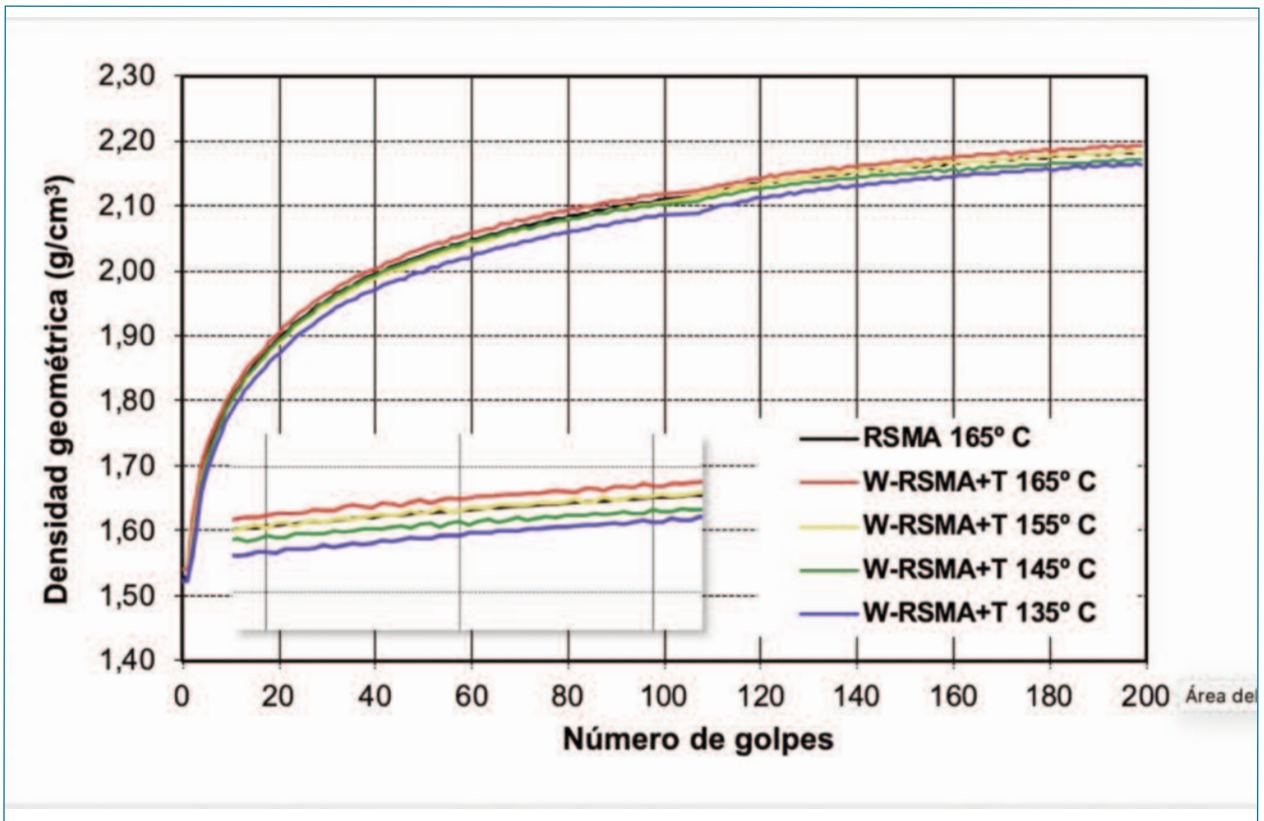


Figura 2. Compactibilidad con compactador Marshall

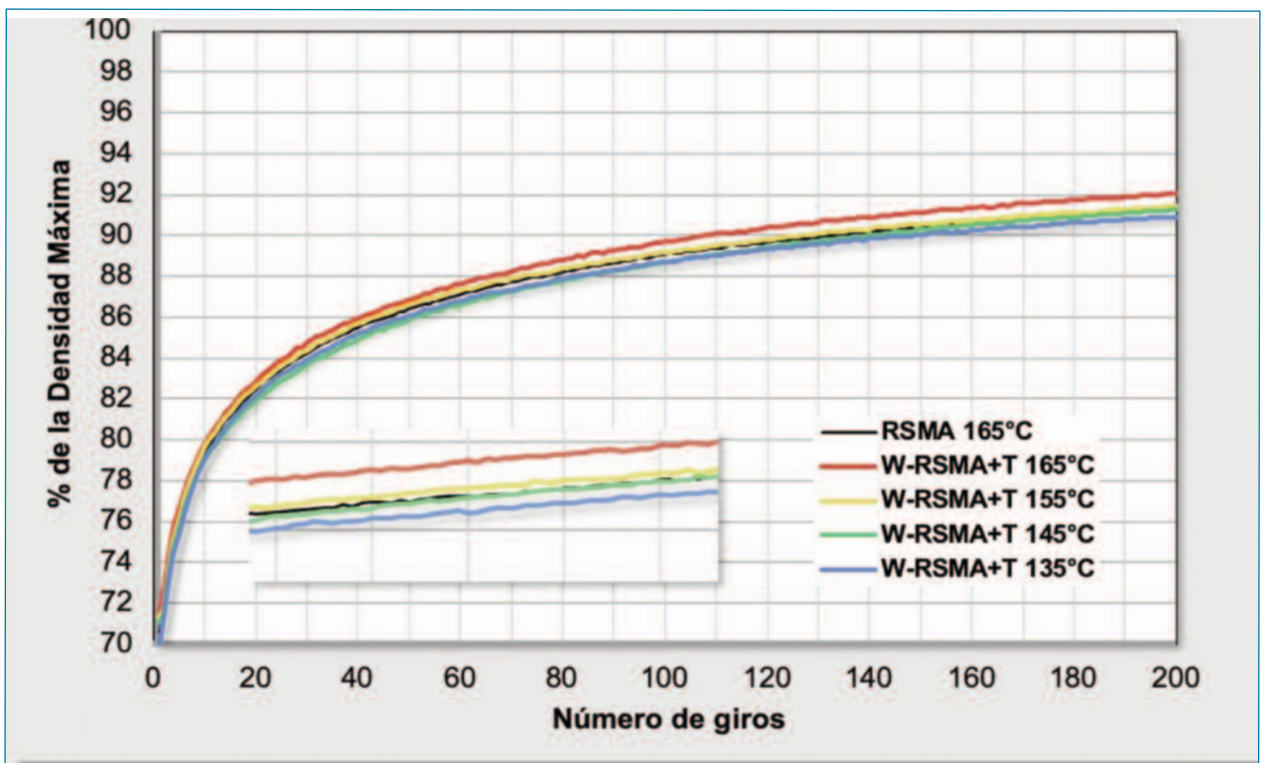


Figura 3. Compactibilidad con el compactador giratorio.

Evaluación de la compactación de mezclas SMA con caucho de NFVU y aditivo de mezclas semicalientes

3.3. Sensibilidad al agua con especímenes Marshall

Los contenidos de huecos de las probetas preparadas con el compactador Marshall con 50 golpes / cara se muestran en la Tabla 5.

como en la Figura 4. Puede observarse que cuando se agrega el aditivo T, para mezclas semicalientes, los resultados de ITS son ligeramente peores y los valores de ITSR disminuyen a medida que disminuyen las temperaturas de producción.

En términos de especificaciones que deben cumplirse, pue-

Tabla 5. Características volumétricas de las mezclas, compactación Marshall, 50 golpes / cara.

	Especimen	Densidad aparente (g/cm ³) EN-12697-6		Huecos (%) EN-12697-8	
RSMA 165 °C	#1	2,295	Av = 2,295 SD = 0,0052	5,13	Av = 5,13 SD = 0,213
	#2	2,295		5,13	
	#3	2,289		5,37	
	#4	2,298		5,00	
	#5	2,304		4,75	
	#6	2,289		5,37	
	#7	2,291		5,29	
	#8	2,298		5,00	
	W-RSMA+T 165 °C	#1		2,305	
#2		2,314	4,34		
#3		2,299	4,96		
#4		2,312	4,42		
#5		2,307	4,63		
#6		2,313	4,38		
#7		2,303	4,80		
#8		2,305	4,71		
W-RSMA+T 155 °C		#1	2,289	Av = 2,295 SD = 0,0041	5,37
	#2	2,296	5,08		
	#3	2,296	5,08		
	#4	2,295	5,13		
	#5	2,295	5,13		
	#6	2,298	5,00		
	#7	2,289	5,37		
	#8	2,301	4,88		
	W-RSMA+T 135 °C	#1	2,272		Av = 2,276 SD = 0,0061
#2		2,274	5,58		
#3		2,282	5,62		
#4		2,278	6,04		
#5		2,279	5,58		
#6		2,275	5,79		
#7		2,269	5,95		
#8		2,278	5,54		

Para verificar que las medias de los huecos en la mezcla de las muestras de cada grupo fueran diferentes, se realizó un análisis de varianza de un solo factor (el tipo de mezcla de asfalto). Para un nivel de significación del 95%, el estadístico F tenía un valor de 57,71759259, mayor que el valor crítico $F = 2,641465186$, lo que indica que la hipótesis nula de la igualdad de las medias de todos los grupos es falsa y, por lo tanto, los grupos, estadísticamente, tienen diferentes índices de huecos.

Los resultados de ITS y ITSR se muestran en la Tabla 6, así

de observarse en la Figura 4 que cuando la temperatura de compactación de las mezclas W-RSMA+T es la misma que la mezcla de control (RSMA 165 °C), el valor ITSR es muy similar y superior al 90 % requerido para la capa de rodadura. Sin embargo, a medida que disminuyen las temperaturas de compactación, los valores de ITSR empeoran. Incluso las mezclas producidas a 155 °C no cumplen el requisito del 90% para la sensibilidad al agua de una capa superficial en España (nuevo artículo 544 del PG-3). Este empeoramiento de la sensibilidad al agua puede estar relacionado con el aumento en el índice de huecos en la mezcla, como se presenta en la Figura 4. La

falta de eficiencia de los aditivos de mezclas semicalientes con el compactador Marshall resulta en un alto contenido de huecos, haciendo que las mezclas sean más vulnerables al ataque de agua. Estos resultados obtenidos con probetas preparadas con el compactador Marshall significan que, con la compactación de impacto, a nivel fabricación en laboratorio, no se consigue el cumplimiento de especificaciones para las mezclas semicalientes. Sin embargo, esos valores bajos de ITSR no deben traducirse en que a nivel de obra no se conseguirán buenos resultados. Al menos hasta que se disponga de los resultados de ITSR en probetas preparadas con el compactador giratorio.

sensibilidad al agua de una capa superficial en España (nuevo artículo 544 del PG-3). Este empeoramiento de la sensibilidad al agua puede estar relacionado con el aumento en el índice de huecos en la mezcla, como se presenta en la Figura 4. La falta de eficiencia de los aditivos de mezclas semicalientes con el compactador Marshall resulta en un alto contenido de huecos, haciendo que las mezclas sean más vulnerables al ataque de agua. Estos resultados obtenidos con probetas preparadas con el compactador Marshall significan que, con la compactación de impacto, a nivel fabricación en laboratorio, no se consigue el cumplimiento de especificaciones para las mezclas se-

Tabla 6. Resultados del ensayo de sensibilidad al agua para las mezclas preparadas con el compactador Marshall

Mezclas	Tª de producción(°C)	ITSd (MPa) EN 12697-12	ITSw (MPa) EN 12697-12	ITSR (%) EN 12697-23
RSMA	165	2,129	1,975	92,8
W-RSMA + T	165	1,858	1,687	90,8
	155	1,915	1,591	83,1
	145	1,785	1,396	78,2
	135	1,954	1,248	63,9

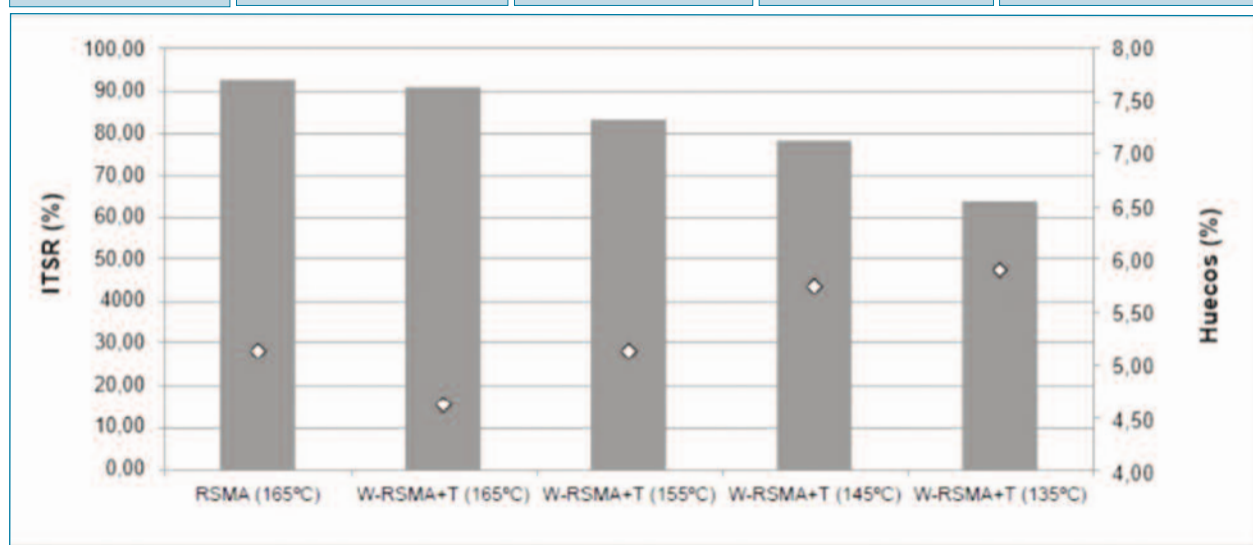


Figura 4. Resultados ITSR para muestras preparadas con el compactador Marshall.

En términos de especificaciones que deben cumplirse, puede observarse en la Figura 4 que cuando la temperatura de compactación de las mezclas W-RSMA+T es la misma que la mezcla de control (RSMA 165 °C), el valor ITSR es muy similar y superior al 90 % requerido para la capa de rodadura. Sin embargo, a medida que disminuyen las temperaturas de compactación, los valores de ITSR empeoran. Incluso las mezclas producidas a 155 °C no cumplen el requisito del 90% para la

micahentes. Sin embargo, esos valores bajos de ITSR no deben traducirse en que a nivel de obra no se conseguirán buenos resultados. Al menos hasta que se disponga de los resultados de ITSR en probetas preparadas con el compactador giratorio.

3.4. Sensibilidad al agua con el compactador giratorio

Como la resistencia al ataque de agua en las probetas fa-

Evaluación de la compactación de mezclas SMA con caucho de NFVU y aditivo de mezclas semicalientes

bricadas con el compactador Marshall mostraron resultados no satisfactorios, se decidió compactar las muestras para este ensayo con el compactador giratorio, de acuerdo con Vega-Zaramillo et al. [25]. El uso del compactador giratorio para mezclas calientes con caucho también ha sido recomendado por Tarefder et al. [28]. Los resultados para la densidad aparente y el contenido de huecos de las muestras se muestran en la Tabla 7.

un análisis de varianza de un factor (tipo de mezcla) para un nivel de significación del 95%. Se obtuvo un valor estadístico $F = 39,86452242$, más alto que el valor crítico $F = 2,641465186$, que mostró que las medias de los grupos son diferentes entre sí. Por lo tanto, dependiendo del tipo de mezcla, las muestras alcanzaron un grado de compactación diferente. Los resultados de ITS para las muestras preparadas con 120 giros con el compactador giratorio se muestran en la Tabla 8 y la Figura 5.

Tabla 7. Características volumétricas de las mezclas

	Specimen	Bulk density (g/cm ³) EN-12697-6		Air void (%) EN-12697-8	
RSMA 165 °C	#1	2,298	SD=0,003	5,00	SD=0,11
	#2	2,292		5,25	
	#3	2,294		5,17	
	#4	2,299		4,96	
	#5	2,3		4,92	
	#6	2,295		5,13	
	#7	2,295		5,13	
	#8	2,297		5,04	
W-RSMA+T 165 °C	#1	2,303	AAV=2,306 SD=0,004	4,79	Av=4,67 SD=0,154
	#2	2,309		4,55	
	#3	2,311		4,46	
	#4	2,307		4,63	
	#5	2,308		4,59	
	#6	2,299		4,96	
	#7	2,306		4,67	
	#8	2,307		4,63	
W-RSMA+T 155 °C	#1	2,301	Av=2,300 SD=0,003	4,88	Av=4,92 SD=0,128
	#2	2,303		4,80	
	#3	2,298		5,00	
	#4	2,303		4,80	
	#5	2,303		4,79	
	#6	2,299		4,96	
	#7	2,295		5,13	
	#8	2,297		5,04	
W-RSMA+T 145 °C	#1	2,294	Av=2,391 SD=0,002	5,46	Av=5,29 SD=0,100
	#2	2,292		5,25	
	#3	2,287		5,54	
	#4	2,291		5,37	
	#5	2,294		5,25	
	#6	2,29		5,46	
	#7	2,289		5,21	
	#8	2,292		5,25	
W-RSMA+T 135 °C	#1	2,287	Av=2,289 SD=0,003	5,46	Av=5,35 SD=0,125
	#2	2,292		5,25	
	#3	2,285		5,54	
	#4	2,289		5,37	
	#5	2,292		5,25	
	#6	2,287		5,46	
	#7	2,293		5,21	
	#8	2,292		5,25	

Para determinar si los valores promedio para el contenido de huecos en cada mezcla eran diferentes entre sí, se realizó

Este nivel de compactación se seleccionó para lograr un contenido de huecos en la mezcla de control RSMA (5.07%, Ta-

bla 7) similar a lo logrado por 50 golpes / cara con el compactador Marshall (5,13%, Tabla 5), en ambos casos a 165 °C.

de lograr un menor contenido de huecos en comparación con el compactador de impacto Marshall al reducirse las temperatu-

Tabla 8. Resultados de la sensibilidad al agua para las mezclas fabricadas con el compactador giratorio.

Mezclas	Tª de producción(°C)	ITSd (MPa) EN 12697-12	ITSw (MPa) EN 12697-12	ITSR (%) EN 12697-23
RSMA	165	2,04	2,082	98,0
W-RSMA + T	165	1,962	1,923	98,0
	155	1,845	1,826	99,9
	145	1,886	1,843	97,7
	135	1,819	1,692	93,0

Cuando el aditivo T se incorpora a las mezclas fabricadas a 165 °C, que es la temperatura de producción de la mezcla de control, presentan valores de ITSR similares a los de la mezcla de control (Figura 5). Incluso a temperaturas más bajas (155 °C – 135 °C) los valores de ITSR son similares a los de la mezcla de control y siempre superiores al 90% requerido en el nuevo artículo 544 del PG3.

ras de fabricación con el aditivo de mezclas semicalientes. Sin embargo, la diferencia en el contenido de huecos entre las muestras producidas con el compactador Marshall y el compactador giratorio es de alrededor del 1%, mientras que los valores de ITSR oscilan entre 63% y 93% entre ambos casos. Se necesitaría realizar más investigaciones para confirmar que el efecto de amasado, además de mejorar la eficiencia de la den-

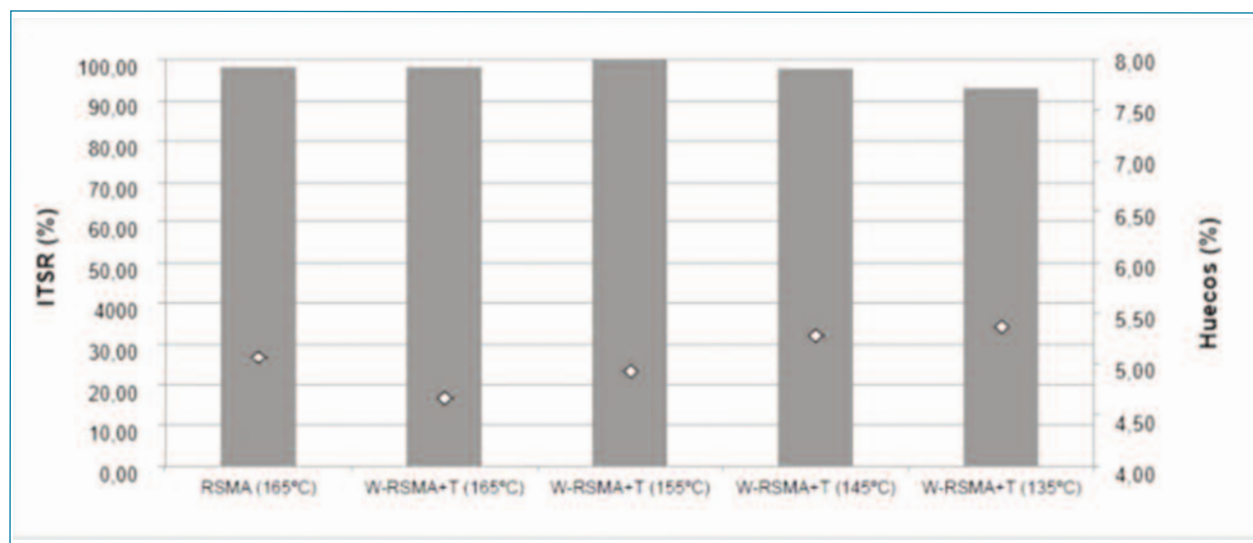


Figura 5. Resultados ITSR para especímenes preparados con el compactador giratorio.

Aunque, debido a la reducción de temperatura hubo un ligero incremento de los huecos en mezcla, la resistencia al agua se vio poco afectada (Figura 5). Entonces, en términos de resistencia al ataque de agua, la temperatura de fabricación podría reducirse hasta en 30 °C. A partir de estos resultados, es evidente que no sólo la tecnología de mezclas semicalientes afecta la sensibilidad al agua de las mezclas, como lo afirman Xu et al. [22]. El método de compactación tiene una fuerte influencia; el efecto de amasado del compactador giratorio pue-

sificación (y evitar la entrada de agua) es capaz de mejorar la adhesividad de los ligantes, como se sugirió en investigaciones previas [25,26].

3.5. Reducción alcanzable de la temperatura de fabricación

De acuerdo con los resultados de las Secciones 3.1 a 3.4, sería posible reducir las temperaturas de producción de las mez-

Evaluación de la compactación de mezclas SMA con caucho de NFVU y aditivo de mezclas semicalientes

clas en estudio, gracias al uso del aditivo de origen vegetal empleado en este trabajo. Sin embargo, esta reducción depende de la propiedad analizada y del método de compactación. En el caso del compactador Marshall, no se recomendaría una reducción de la temperatura de producción ya que la sensibilidad al agua cae por debajo de los valores mínimos admitidos para capas de rodura. Sin embargo, considerando los resultados obtenidos en las mezclas fabricadas con el compactador giratorio, puede recomendarse una reducción de temperatura de hasta 30 °C, aunque podría ser aconsejable limitar esta reducción a 20 °C, para limitar también el reducido incremento de huecos en mezcla que se produce al disminuir la temperatura.

4. CONCLUSIONES

El objetivo de esta investigación fue determinar el tipo de compactación en laboratorio más apropiado para el estudio de mezclas SMA con caucho de neumáticos al final de su vida útil y aditivos de mezclas semicalientes. Recientemente se han elaborado especificaciones para mezclas SMA en España (Art. 544 del PG-3). Aunque el método de compactación para el cálculo de huecos en mezcla sigue siendo el Marshall, se admite el compactador giratorio en el caso de mezclas SMA semicalientes. Sin embargo, en cuanto a la compactación de probetas para el ensayo de sensibilidad al agua, se menciona únicamente el compactador Marshall, sin distinguir si la mezcla es caliente o semicaliente. Algunos investigadores, no obstante, vienen planteando que el método de compactación giratoria es más adecuado para este tipo de mezclas.

Para contribuir a aclarar esta cuestión, el presente estudio evaluó los efectos de un aditivo químico de origen vegetal para mezclas semicalientes sobre la compactabilidad de una mezcla asfáltica SMA con caucho de neumáticos al final de su vida útil. Las pruebas realizadas fueron las de compactabilidad, evaluadas por dos procedimientos diferentes (impacto y compactación giratoria) y sensibilidad al agua, en probetas compactadas con el compactador Marshall y con el compactador giratorio.

El contenido de ligante de la mezcla de control SMA fue de un 6,2% de betún modificado sobre el peso de los áridos, incluyendo un 10% de caucho y un 2,5% de SBS sobre el peso del betún. Las mezclas SMA con caucho y aditivo de mezclas semicalientes (denominadas en este estudio mezclas W-RSMA+T) además incorporaron un 0,5% de aditivo para

semicalientes sobre el peso del ligante. La mezcla de control se fabricó a 165 °C y las mezclas W-RSMA+T se prepararon a 165 °C, 155 °C, 145 °C y 135 °C. De los resultados de las pruebas realizadas, se pueden extraer las siguientes conclusiones.

En cuanto a los resultados de compactabilidad, dependiendo del procedimiento utilizado (impacto o giratorio), se obtuvieron diferentes resultados que recomendaban también diferentes reducciones de la temperatura de compactación. Parece que la compactación giratoria ofrece un mejor criterio a la hora de distinguir la presencia del aditivo WMA en comparación con el procedimiento Marshall. Agregando el aditivo de semicalientes, cuando se utiliza el procedimiento Marshall, la temperatura de fabricación de las mezclas podría reducirse sólo unos 10 °C. En cambio, con el compactador giratorio, puede lograrse una reducción de 20 °C.

En cuanto a la sensibilidad al agua, cuando las muestras se prepararon con el compactador Marshall, la relación de tracción indirecta (ITSR) de las mezclas semicalientes con aditivos W-RSMA+T no cumplía los requisitos de sensibilidad al agua en España (90%), excepto para las mezclas preparadas a 165 °C (la misma temperatura de fabricación de la mezcla de control). Por lo tanto, con este criterio, no se recomienda reducir la temperatura, incluso con la presencia del aditivo de mezclas semicalientes. Sin embargo, cuando las muestras se prepararon con el compactador giratorio, los valores ITSR de las mezclas W-RSMA+T a temperaturas más bajas permanecieron por encima del 90% requerido, incluso al fabricar a 30 °C por debajo de la temperatura de referencia. Teniendo en cuenta que la mayoría de los autores en la revisión de la literatura realizada mostraron la buena correspondencia de las muestras compactadas en giratoria con los testigos de campo, este resultado parece indicar que la reducción de la temperatura con el uso del aditivo de mezclas semicalientes seleccionado podría alcanzar los 30 °C. Aunque por el criterio de compactabilidad, si se quiere conservar el contenido de huecos de la mezcla de referencia, debería prescribirse una reducción de temperatura no mayor de 20°C.

Finalmente, el resultado de esta investigación muestra que el compactador giratorio es preferible a la compactación Marshall para diseñar y ensayar mezclas SMA, especialmente cuando se añade caucho y un aditivo de mezclas semicalientes.

En cuanto a necesidades de nueva investigación, sería conveniente avanzar en los estudios a escala real, para cotejar el

grado de coincidencia entre el comportamiento de capas del firme compactadas con rodillos compactadores, y el obtenido en laboratorio con distintos métodos de compactación, para evaluar la representatividad de estos últimos.

6. REFERENCIAS

- [1] Yadykina, V.; Tobolenko, S.; Trautvain, A.; Zhukova, A. The influence of stabilizing additives on physical and mechanical properties of stone mastic asphalt concrete. *Procedia Eng.* 2015, 376–381. doi:10.1016/j.proeng.2015.08.181.
- [2] Putman, B.J.; Amirkhanian, S.N. Utilization of waste fibers in stone matrix asphalt mixtures. *Resour. Conserv. Recycl.* 2004, 265–274. doi:10.1016/j.resconrec.2004.04.005.
- [3] Mokhtari, A.; Nejad, F.M. Mechanistic approach for fiber and polymer modified SMA mixtures. *Constr. Build. Mater.* 2012, 36, 381–390. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.05.032.
- [4] Manosalvas-Paredes, M.; Gallego, J.; Saiz, L.; Bermejo, J.M. Rubber modified binders as an alternative to cellulose fiber—SBS polymers in Stone Matrix Asphalt. *Constr. Build. Mater.* 2016, 121, 727–732. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.06.028.
- [5] Fontes, L.P.T.L.; Trichês, G.; Pais, J.C.; Pereira, P.A.A. Evaluating permanent deformation in asphalt rubber mixtures. *Constr. Build. Mater.* 2010, 24, 1193–1200. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.12.021.
- [6] Moreno, F.; Sol, M.; Martín, J.; Pérez, M.; Rubio, M.C. The effect of crumb rubber modifier on the resistance of asphalt mixes to plastic deformation. *Mater. Des.* 2013, 47, 274–280. doi:10.1016/j.matdes.2012.12.022.
- [7] Pasquini, E.; Canestrari, F.; Cardone, F.; Santagata, F.A. Performance evaluation of gap graded Asphalt Rubber mixtures. *Constr. Build. Mater.* 2011, 25, 2014–2022. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.11.048.
- [8] Paje, S.E.; Luong, J.; Vázquez, V.F.; Bueno, M.; Miró, R. Road pavement rehabilitation using a binder with a high content of crumb rubber: Influence on noise reduction. *Constr. Build. Mater.* 2013, 47, 789–798. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.008.
- [9] Sangiorgi, C.; Tataranni, P.; Simone, A.; Vignali, V.; Lantieri, C.; Dondi, G. Stone mastic asphalt (SMA) with crumb rubber according to a new dry-hybrid technology: A laboratory and trial field evaluation. *Constr. Build. Mater.* 2018, 182, 200–209. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.06.128.
- [10] D'Angelo, J.; Harm, E.; Bartoszek, J.; Baumgardner, G.; Corrigan, M.; Cowser, J.; Harman, T.; Jamshidi, M.; Jones, W.; Newcomb, D.; et al. Warm-Mix Asphalt: European Practice; Report No. FHWA-PL-08-007; Federal Highway Administration: Washington DC, USA, 2008. Available online: <https://international.fhwa.dot.gov/pubs/pl08007/pl08007.pdf> (accessed on 7 January 2020)
- [11] Rubio, M.C.; Martínez, G.; Baena, L.; Moreno, F. Warm Mix Asphalt: An overview. *J. Clean. Prod.* 2012, 24, 76–84. doi:10.1016/j.jclepro.2011.11.053.
- [12] Capitão, S.D.; Picado-Santos, L.G.; Martinho, F. Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. *Constr. Build. Mater.* 2012, 36, 1016–1024. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.06.038.
- [13] Wang, H.; Liu, X.; Apostolidis, P.; Scarpas, T. Review of warm mix rubberized asphalt concrete: Towards a sustainable paving technology. *J. Clean. Prod.* 2018, 177, 302–314. doi:10.1016/j.jclepro.2017.12.245.
- [14] Oliveira, J.R.M.; Silva, H.M.R.D.; Abreu, L.P.F.; Fernandes, S.R.M. Use of a warm mix asphalt additive to reduce the production temperatures and to improve the performance of asphalt rubber mixtures. *J. Clean. Prod.* 2013, 41, 15–22. doi:10.1016/j.jclepro.2012.09.047.
- [15] Rodríguez-Alloza, A.M.; Gallego, J. Mechanical performance of asphalt rubber mixtures with warm mix asphalt additives. *Mater. Struct.* 2017, 50, 147. doi:10.1617/s11527-017-1020-z.
- [16] Rodríguez-Alloza, A.M.; Gallego, J. Volumetric characteristics and compactability of asphalt rubber mixtures with organic warm mix asphalt additives. *Mater. Constr.* 2017, 67. doi:10.3989/mc.2017.03616.
- [17] Akisetty, C.K.; Lee, S.J.; Amirkhanian, S.N. Effects of Compaction Temperature on Volumetric Properties of Rubberized Mixes Containing Warm-Mix Additives. *J. Mater. Civ. Eng.* 2009, 21, 409–415. doi:10.1061/ASCE0899-1561200921:8409.
- [18] Yu, H.; Leng, Z.; Dong, Z.; Tan, Z.; Guo, F.; Yan, J. Workability and mechanical property characterization of asphalt rubber mixtures modified with various warm mix

Evaluación de la compactación de mezclas SMA con caucho de NFVU y aditivo de mezclas semicalientes

- asphalt additives. *Constr. Build. Mater.* 2018, 175, 392–401. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.04.218.
- [19] Leng, Z.; Yu, H.; Zhang, Z.; Tan, Z. Optimizing the mixing procedure of warm asphalt rubber with wax-based additives through mechanism investigation and performance characterization. *Constr. Build. Mater.* 2017, 144, 291–299. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.208.
- [20] Lee, S.J.; Amirkhanian, S.N.; Kwon, S.Z. The effects of compaction temperature on CRM mixtures made with the SGC and the Marshall compactor. *Constr. Build. Mater.* 2008, 22, 1122–1128. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.03.003.
- [21] Xu, H.; McIntyre, A.; Adhikari, T.; Hesp, S.; Marks, P.; Tabib, S. Quality and durability of warm rubberized Asphalt cement in Ontario, Canada. *Transp. Res. Rec.* 2013, 26–32. doi:10.3141/2370-04.
- [22] Xu, S.; Xiao, F.; Amirkhanian, S.; Singh, D. Moisture characteristics of mixtures with warm mix asphalt technologies—A review. *Constr. Build. Mater.* 2017, 142, 148–161. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.069.
- [23] Khedmati, M.; Khodaii, A.; Haghshenas, H.F. A study on moisture susceptibility of stone matrix warm mix asphalt. *Constr. Build. Mater.* 2017, 144, 42–49. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.121.
- [24] Wang, Y.; Zhu, J.; Liu, L.; Sun, L. Gradation Evaluation of Asphalt Rubber Mixture with Warm-mix Additive. *Procedia Soc. Behav. Sci.* 2013, 96, 31–38. doi:10.1016/j.sbspro.2013.08.007.
- [25] Vega-Zamanillo, Á.; Calzada-Pérez, M.A.; Sánchez-Alonso, E.; Gonzalo-Orden, H. Density, Adhesion and Stiffness of Warm Mix Asphalts. *Procedia Soc. Behav. Sci.* 2014, 160, 323–331. doi:10.1016/j.sbspro.2014.12.144.
- [26] Jiang, Y.; Deng, C.; Li, Q.; Liu, H. Effect of Compaction Methods on Physical and Mechanical Properties of Asphalt Mixture. *J. Mater. Civ. Eng.* 2019, 31. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002732.
- [27] Hartman, A.M.; Gilchrist, M.D.; Walsh, G. Effect of mixture compaction on indirect tensile stiffness and fatigue. *J. Transp. Eng.* 2001, 127, 370–378. doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(2001)127:5(370).
- [28] Tarefder, R.A.; Ahmad, M. Effect of compaction procedure on air void structure of asphalt concrete. *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 2016, 90, 151–157. doi:10.1016/j.measurement.2016.04.054.
- [29] Consuegra, A.; Little, D.N.; von Quintus, H.; Burati, J. Comparative evaluation of laboratory compaction devices based on their ability to produce mixtures with engineering properties similar to those produced in the field. *Transp. Res. Rec.* 1989, 1228, 80–87.
- [30] Pérez-Jiménez, F.; Martínez, A.H.; Miró, R.; Hernández-Barrera, D.; Araya-Zamorano, L. Effect of compaction temperature and procedure on the design of asphalt mixtures using Marshall and gyratory compactors. *Constr. Build. Mater.* 2014, 65, 264–269. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.135.
- [31] CEDEX, SMA Mixtures Draft Specifications (SMA-DS). Environment Friendly Asphalt Mixture Project. 2013. Available online: http://www.proyectosma.eu/wp-content/uploads/2018/05/files_524aeb98888f4.pdf (accessed on 10 September 2019).