

Compactabilidad y propiedades mecánicas de mezclas con caucho y aditivos de mezclas semicalientes

Ana M. Rodríguez , anamaria.rodriguez.alloza@upm.es

Juan Gallego , juan.gallego@upm.es

Universidad Politécnica de Madrid

Las mezclas semicalientes permiten disminuir el consumo de energía y las correspondientes emisiones de gases de efecto invernadero al reducir las temperaturas de fabricación y puesta en obra de las mezclas asfálticas. Por otro lado, las mezclas con caucho reutilizan de forma efectiva un producto de desecho como son los neumáticos fuera de uso. La combinación de ambas tecnologías harían de las mezclas con caucho y aditivos de mezclas semicalientes un excelente material para la construcción de carreteras respetuoso con el medio ambiente. Sin embargo, el efecto de los aditivos sobre la compactabilidad y propiedades mecánicas al disminuir las temperaturas de producción / compactación, especialmente para el caso de las mezclas con caucho, no está suficientemente estudiado. Por lo tanto, en esta investigación se estudia, a través de una serie de ensayos de laboratorio, las características compactabilidad y propiedades mecánicas de mezclas con caucho y aditivos de mezclas semicalientes. Los resultados han indicado que los aditivos seleccionados pueden disminuir las temperaturas de producción/compactación de las mezclas sin comprometer la compactabilidad, ni la fatiga, que la resistencia a las deformaciones plásticas resultó notablemente mejorada, que la sensibilidad al agua disminuyó ligeramente y que el módulo de rigidez depende de la temperatura de fabricación.

Palabras Clave: caucho, mezclas semicalientes, compactabilidad, propiedades mecánicas.

Warm Mix Asphalt (WMA) allow to reduce the energy consumption and the corresponding emissions of greenhouse gases (GHG) by reducing the production and compaction temperatures of the asphalt mixtures. On the other hand, the asphalt rubber mixtures effectively reuse a waste product such as end-of-life tyres. The combination of both technologies would make asphalt rubber mixtures with warm mix asphalt additives an excellent and environmental-friendly material for roads. However, the effect of the additives on the compactability and mechanical properties when lowering the production / compaction temperatures, especially in the case of mixtures with rubber, is not sufficiently studied. Therefore, this research studies, through a series of laboratory tests, the characteristics of compactability and mechanical properties of asphalt rubber mixtures with warm mix asphalt additives. The results have indicated that the selected additives can decrease the production / compaction temperatures of the mixtures without compromising the compactability, nor the fatigue, that the resistance to the plastic deformations was significantly improved, that the water sensitivity decreased slightly and that the stiffness depends on the manufacturing temperature.

Keywords: rubber, warm mix asphalt mixtures, compactability, mechanical properties.

1. Introducción

Los pavimentos que contienen polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso ofrecen una resistencia mejorada a la formación de roderas, a la fatiga y a la fisuración térmi-

ca, reducen los costes de mantenimiento y el ruido del tráfico así como prolongan la vida útil del pavimento [1,2,3]. Sin embargo, estas mezclas presentan un importante inconveniente: la temperatura de fabricación debe aumentarse en comparación con las mezclas asfálticas convencionales. Su temperatura de

Compactabilidad y propiedades mecánicas de mezclas con caucho y aditivos de mezclas semicalientes

fabricación oscila entre 175 °C y 180 °C en el caso de betunes de alta viscosidad con caucho [4] y, por lo tanto, se consume más energía al producirlas y, en consecuencia, se emiten mayores cantidades de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) al compararlas con mezclas bituminosas convencionales.

El Protocolo de Kyoto y el Acuerdo de París reconocen que los países desarrollados son los principales responsables de los altos niveles actuales de GEI que se emiten a la atmósfera como resultado de la actividad industrial [5]. Por lo tanto, en los últimos años la protección ambiental y el desarrollo sostenible se han convertido en importantes temas globales y la industria de los pavimentos ha buscado y desarrollado una forma de reducir la temperatura de fabricación y puesta en obra mediante la tecnología denominada como mezclas semicalientes. Esta tecnología ofrece soluciones prometedoras para los inconvenientes de las mezclas con caucho gracias a la utilización de aditivos que son capaces de reducir la viscosidad del ligante y disminuir las temperaturas de fabricación sin afectar el rendimiento de las mezclas a temperaturas de servicio. Si incorporando la tecnología de mezclas semicalientes a las mezclas con caucho se lograra una disminución significativa de la temperatura de fabricación y puesta en obra sin que la compactabilidad y el rendimiento mecánico de estas mezclas se viese afectado, los beneficios tanto para la sociedad como para el medio ambiente serían significativos, ya que con la reducción de tem-

de la producción de los aditivos de mezclas semicalientes.

Si bien previamente se han realizado investigaciones para estudiar las propiedades de las mezclas semicalientes, existen todavía incógnitas y preocupaciones con respecto a la aplicación de esta novedosa tecnología para las mezclas con caucho.

En esta investigación se presenta el efecto de los aditivos sobre la compactabilidad y propiedades mecánicas al disminuir las temperaturas de producción/compactación. Se realizaron una serie de ensayos de laboratorio de compactabilidad, sensibilidad al agua, de resistencia a las deformaciones permanentes y a la fatiga y de módulo de rigidez, comparándose la mezcla con caucho y aditivo de mezcla semicaliente con una mezcla denominada de control, que contiene caucho pero no aditivo de mezcla semicaliente.

2. Materiales

2.1 Betún

El betún usado en esta investigación es un betún 50/70. En la Tabla 1 se pueden observar las especificaciones de dicho betún, donde la penetración se determinó de acuerdo con la norma EN 1426, mientras que el punto de reblandecimiento se determinó con la norma UNE EN 1427. El betún se sometió también a un fraccionamiento de los betunes asfálticos según la norma NLT 373/94.

Tabla 1. Especificaciones del betún 50/70

Propiedades	Unidad	Resultados
Penetración (25°C)	0.1 mm	55,4
Punto de reblandecimiento	°C	51,1
Composición	Unidad	Resultados
Asfaltenos	(%)	13,8
Saturados	(%)	9,7
Naftenos-aromáticos	(%)	48,5
Aromáticos-polares	(%)	28,0

peratura se logra un menor consumo de energía, de combustibles y de costes además de menores emisiones de dióxido de carbono, elemento clave en el desarrollo sostenible. Para conocer con precisión cuáles serían los beneficios ambientales sería necesario contabilizar en el análisis de ciclo de vida de la producción de estas mezclas el impacto indirecto de las emisiones

2.2 Polvo de neumático

El polvo de neumático de caucho fue fabricado por trituración mecánica a temperatura ambiente, 50% a partir de neumáticos para camiones y 50% a partir de neumáticos de automóvil. Para garantizar la coherencia, se utilizó un solo lote de

polvo de neumáticos en este estudio. Su granulometría se presenta en la Tabla 2 y fue proporcionada por el proveedor.

Tabla 2. Características generales

Tamiz (mm) (UNE EN 933-2)	Acumulado (%)
2	100
1,5	100
1	100
0,5	94.1
0,25	23.7
0,125	3.7
0,063	0.4

2.3 Aditivos de mezcla semicalientes

Se han seleccionado dos ceras: una cera Fischer-Tropsch (F-T) y una cera de amidas de ácidos grasos. Las ceras F-T están dentro de la categoría de ceras denominadas sintéticas y consisten en hidrocarburos de muy alto peso molecular, con un punto de fusión entre los 85 °C y 115 °C y que presentan una alta dureza [6, 7]. Esta cera es denominada en este estudio como C1.

Las ceras de amidas de ácido graso se caracterizan por ser producidas sintéticamente mediante la reacción de amidas con grasas ácidas y el punto de fusión se encuentra entre los 141 °C y 146 °C. Por simplicidad, esta cera es denominada como C2 [8].

2.4 Preparación de los ligantes

Para obtener los ligantes con caucho y aditivos de mezclas semicalientes, se calentaron 750 g de betún 50/70 a 140 °C. Después, los aditivos orgánicos se añadieron al betún y se mezclaron durante 15 minutos a 4.000 rpm. Posteriormente, la mezcla resultante de betún y aditivo se calentó a 185 °C y a continuación se incorporó el caucho. Después el ligante resul-

tante se mezcló 30 minutos a 2.000 rpm y de nuevo durante 30 minutos a 900 rpm, todo ello a 185 °C.

2.5 Áridos

Los áridos empleados para obtener las mezclas de esta investigación han sido milonita, caliza y filler. Las diferentes fracciones se pueden observar en la Tabla 3 y la granulometría en

Tabla 3. Áridos

Áridos	Tamaño
Milonita	8/11
Milonita	4/8
Caliza	2/4
Caliza	0/2

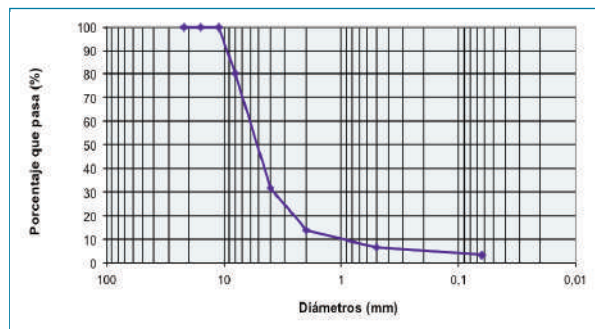


Figura 1: Granulometría de las mezclas estudiadas

la Figura 1.

La denominada mezcla de control es aquella que no contiene aditivo, solo contiene un 9% de ligante del cual un 20% es caucho. Las mezclas objeto de estudio son aquellas que, además de un 9% de ligante con caucho, llevan un 4% sobre el peso del mismo de ceras, es decir, son las mezclas con caucho y aditivos de mezclas semicalientes, que en este estudio han sido denominadas como mezclas MSC.

En la Tabla 4 se presentan las diferentes mezclas de este estudio: su nombre, el tipo de mezcla, el contenido de caucho, el tipo de aditivo y su contenido así como las temperaturas de

Tabla 4. Nombre y tipos de mezclas estudiadas y sus correspondientes temperaturas de producción/compactación

Nombre de la mezcla	Tipo de mezcla	Caucho (%)	Tipo de cera	Aditivo (%)	Tª de producción	Tª de compactación
Control	Mezcla con caucho	20	-	-	180	170
MSC-C1	Mezcla con caucho y cera	20	Cera F-T (C1)	4	170,160,150	160,150,140
MSC-C2	Mezcla con caucho y cera	20	Cera de amidas de ácidos grasos (C2)	4	170,160,150	160,150,140

Compactabilidad y propiedades mecánicas de mezclas con caucho y aditivos de mezclas semicalientes

compactación y fabricación. Los contenidos de caucho y de aditivo se refieren al peso del ligante modificado.

La selección de las temperaturas de producción y compactación de la mezcla de control están basadas en estudios anteriores que consideran que la temperatura de fabricación de estas mezclas con caucho oscilan entre 175°C y 180°C [4]. Las mezclas con caucho y ceras, es decir, las mezclas MSC, son evaluadas y comparadas con la mezcla de control de manera que se pueda establecer cuál es el efecto del aditivo cuando las temperaturas son disminuidas 10 °C, 20 °C y 30 °C.

El diseño de la mezcla se llevó a cabo de acuerdo con trabajos experimentales previos donde se tiene en cuenta el contenido de huecos, la sensibilidad al agua y la resistencia a deformaciones permanentes [4], [9]. El principal propósito de este tipo de mezclas es evitar el fisuramiento y prolongar la vida del pavimento. Por esta razón, tiene un alto contenido de ligante, un 9% sobre el peso de los áridos. Estas mezclas, para evitar las deformaciones plásticas permanentes, tienen un alto porcentaje de huecos comparado con las mezclas densas. Esto permite la expansión térmica del ligante cuando hay altas temperaturas sin que se produzcan roderas.

3. Metodología

Se realizaron una serie de ensayos de compactabilidad conforme a la norma UNE EN 12697-10:2003 y las probetas se prepararon conforme a la norma UNE EN 12697-30:2013. Para estudiar la temperatura de fabricación de las mezclas MSC, estos ensayos se llevaron a cabo a diferentes temperaturas. Las probetas se prepararon a las temperaturas seleccionadas, usando el compactador Marshall dando 200 golpes, 100 por cara, tal y como establece la norma UNE EN 12697-10:2003. Durante la compactación se fue registrando el espesor de cada una de las probetas. En el estudio de compactabilidad, las densidades con las que se obtiene la curva de compactabilidad es geométrica y se calcula con el espesor de las probetas.

El ensayo de la sensibilidad al agua se llevó a cabo de acuerdo con la norma UNE EN 12697-12 y la determinación de la resistencia a la tracción indirecta conforme a la norma UNE EN 12697-23. El ensayo para evaluar las deformaciones permanentes se realizó según la norma UNE EN 12697-22 y las mezclas se compactaron según la norma UNE EN 12697-33. El módulo de rigidez se determinó con la norma NLT 349/90 a 20 °C y la frecuencia usada fue de 10 Hz. La resis-

tencia a fatiga se determinó mediante el ensayo a flexión en cuatro puntos de acuerdo con la norma UNE EN 12697-24, a una frecuencia de 10 Hz y a 20 °C.

4. Resultados

4.1 Compactabilidad

Con el estudio de compactabilidad es posible obtener una serie de curvas donde se puede observar la evolución de las densidades, que en este caso son obtenidas geoméricamente, según van disminuyendo los espesores de las probetas con los impactos de la compactadora. Una vez se obtienen estas curvas se puede determinar cuánto es posible disminuir la temperatura de producción comparando las mezclas MSC con la mezcla de control. Se podrá reducir tanta temperatura mientras la mezcla objeto de estudio tenga una densidad similar a la de referencia.

Los resultados obtenidos se pueden observar en la Figura 2 y en la Figura 4 donde se presentan las curvas de compactabilidad de la mezcla de control y de las mezclas MSC a diferentes temperaturas de compactación. En la Figura 3 y en la Figura 5 se presentan, para su mejor observación, una ampliación de las curvas de compactabilidad desde los 120 °C a los 160 °C.

La compactación, se llevó a cabo con una reducción de la temperatura de 10 °C, 20 °C y 30 °C en comparación con la mezcla de control que fue compactada a 170 °C. También se decidió presentar las curvas hasta 160 golpes en vez de los 200 golpes que se efectuaron para una mejor observación de la gráfica.

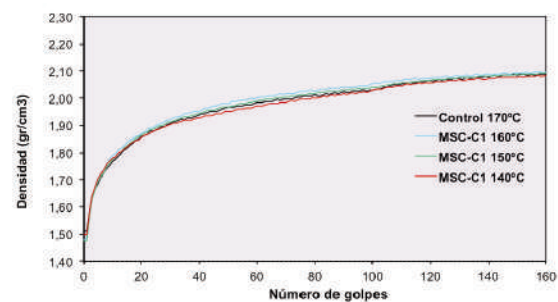


Figura 2: Compactabilidad de las mezclas de control y MSC-C1

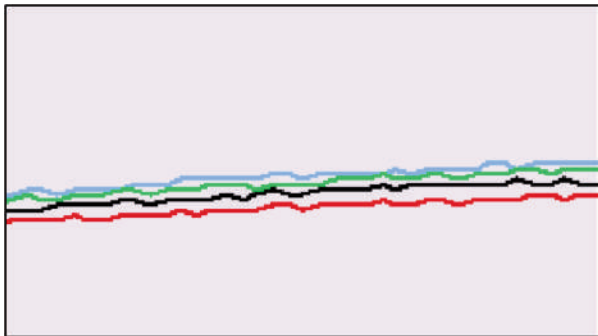


Figura 3: Detalle de las curvas de compactabilidad de las mezclas de control y MSC-C1 de los 120 °C a 160 °C

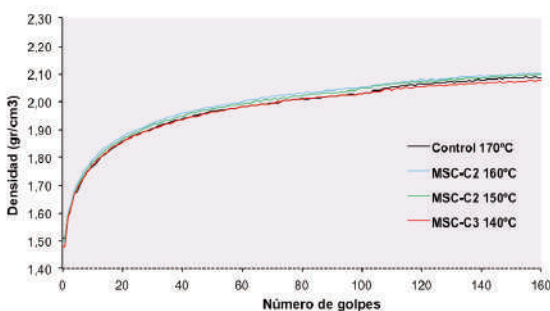


Figura 4: Compactabilidad de la mezclas de control y MSC-C2

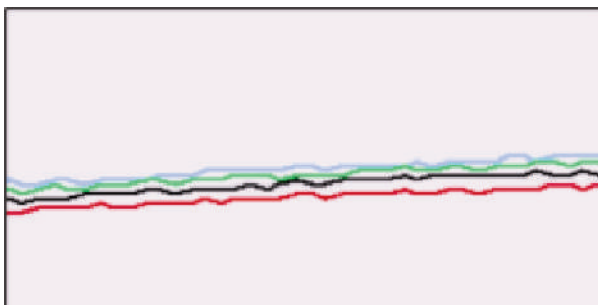


Figura 5: Detalle de las curvas de compactabilidad de las mezclas de control y MSC-C2 de los 120 °C a 160 °C

Comparando las curvas de compactación obtenidas, se puede observar que las diferentes temperaturas a las cuales se han compactado las mezclas tienen un efecto sobre la compactabilidad de las mezclas, ya que cuando estas temperatu-

ras disminuyen, también lo hacen las densidades. También se puede observar que la curva de MSC-C1 a 150 °C se solapa con la curva de la mezcla de control, compactada a 170 °C, luego la temperatura de compactación se puede reducir 20 °C y la densidad de esta sería la misma que la de control. De forma análoga, para la mezcla MSC-C2, la temperatura podría disminuirse en 25 °C ya que la mezcla de control se encuentra entre las mezclas producidas a 140 °C y 150 °C.

Debe señalarse que la densidad del estudio de compactabilidad se calcula con la evolución del volumen geométrico de la probeta, por lo tanto, depende de la evolución del espesor de la misma. En ambos casos, tanto con la adición de la cera C1 y de la cera C2, se ha logrado disminuir significativamente la temperatura de fabricación/compactación.

4.2 Sensibilidad al agua

Los resultados de la resistencia a la tracción indirecta expresada en porcentaje (o resistencia conservada) ITSR y de resistencia a la tracción indirecta del grupo de probetas húmedas/húmedas, ITSw y ITSD respectivamente, se presentan en la Tabla 5.

Para la mezclas MSC, la resistencia a la tracción indirecta tanto de las probetas húmedas como de las secas, disminuyen al disminuir la temperatura de compactación, debido probablemente al aumento del contenido de huecos que experimenta las mezclas al disminuir las temperaturas de fabricación/compactación.

A la vista de los resultados, se puede observar que la cera C1 empeoró la resistencia conservada con respecto a la mezcla de control, ya que esta que tiene un valor de un 96% mientras que la mezcla MSC-C1, tiene un valor entorno al 88%, independientemente de las diferentes temperaturas de fabricación/compactación. Este resultado puede ser debido al efecto que tiene la cera con respecto a la adhesión y a la cali-

Tabla 5. Resultados de sensibilidad al agua

Mezcla	Tª de compactación	ITSw (MPa)	ITSd (MPa)	ITSR (%)	Huecos (%)
Control	170	1,047	1,085	96	7,00
MSC-C1	160	0,866	0,978	89	6,95
	150	0,861	0,973	88	7,37
	140	0,783	0,887	88	7,67
MSC-C2	160	0,986	1,035	95	6,91
	150	0,818	0,888	92	7,25
	140	0,786	0,869	90	7,46

Compactabilidad y propiedades mecánicas de mezclas con caucho y aditivos de mezclas semicalientes

dad del mástico. Sin embargo, ese valor de más de un 88% está muy cercano a cumplir con los requisitos de sensibilidad de agua para una capa de rodadura, que exigen un 90% de la resistencia conservada [10]. Además, este problema se puede solucionar con la adición de un activante directamente incorporado al ligante tal y como establece la propia normativa.

En cuanto a la cera C2, también disminuyó la resistencia conservada con respecto a la mezcla de control, pero en este caso incluso cuando se disminuyen 30 °C la temperatura de fabricación de la mezcla, cumple con el requisito de sensibilidad de agua para una capa de rodadura.

4.3 Resistencia a deformaciones permanentes

La evolución de la profundidad de la rodera (RD) en aire de la mezcla de control y de las mezclas MSC con el número de ciclos de carga a 60 °C se puede observar en la Figura 6 y en la Figura 7. Debido a la incorporación de las ceras, las curvas de las mezclas MSC se han desplazado hacia abajo considerablemente a cualquiera de las temperaturas de compactación.

Esto significa que ambas ceras permiten una reducción notable de la RD y que las mezclas son más consistentes a 60 °C. Se puede observar en que al disminuir la temperatura de compactación, los valores de la RD aumentan, pero siguen siendo notablemente más bajos que los de la mezcla de control. Esto puede atribuirse a un mayor contenido de huecos que se produce según las temperaturas de compactación disminuyen y que podría contribuir a una post-compactación de la mezcla.

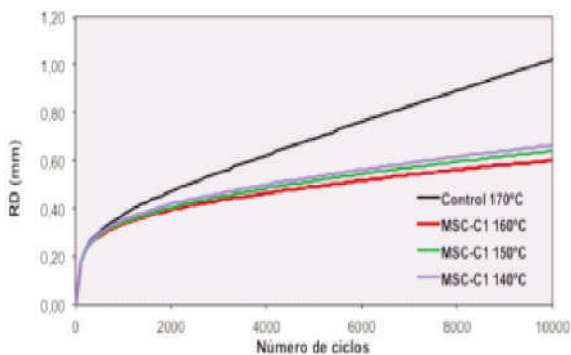


Figura 6: Evolución de la profundidad de la rodera de las mezclas de control y MSC-C1

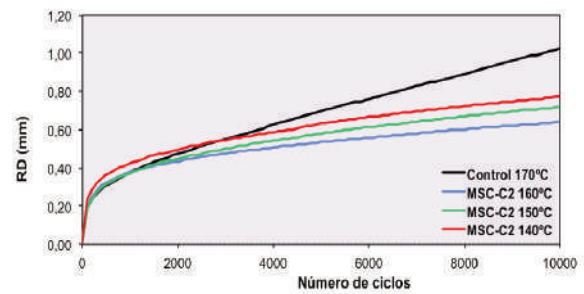


Figura 7: Evolución de la profundidad de la rodera de las mezclas de control y MSC-C2

Por otro lado, se puede observar en la Figura 8 y en la Figura 9 que los valores de la pendiente media de deformación (WTS) se redujeron notablemente comparado con la mezcla de control. En todos los casos, los valores de WTS están dentro de un intervalo de 0,03 a 0,04 mm/103 ciclos; es decir, aproximadamente la mitad del valor de mezcla de control. Conforme a estos resultados, se puede afirmar que las ceras seleccionadas mejoran notablemente la resistencia a las deformaciones permanentes con respecto a la mezcla de control.

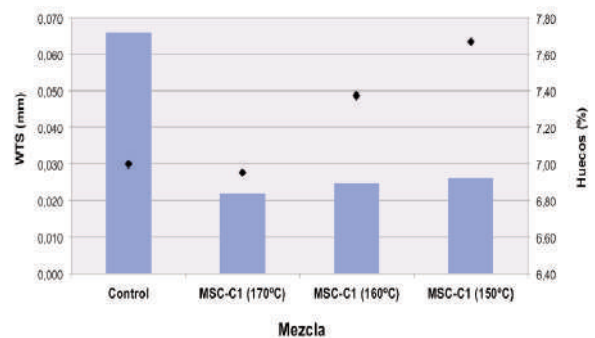


Figura 8: Pendiente media de la deformación en pista de las mezclas de control y MSC-C1

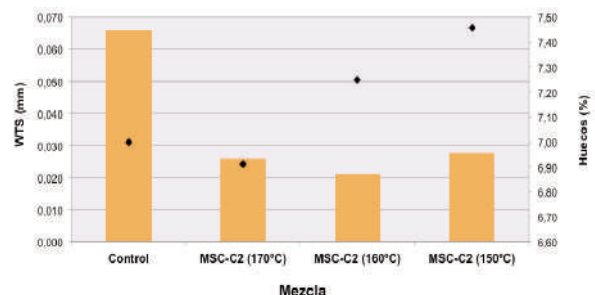


Figura 9: Pendiente media de la deformación en pista de las mezclas de control y MSC-C2

4.4 Módulo de rigidez

Los resultados del módulo de rigidez se presentan en la Fi-

gura 10.

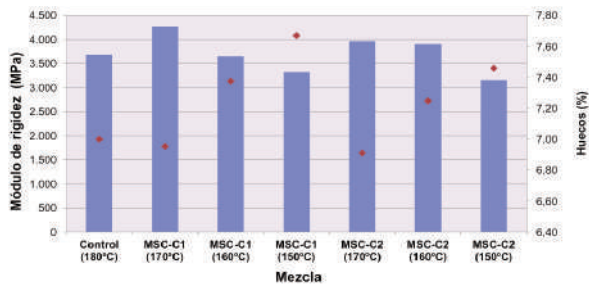


Figura 10: Módulo de rigidez de las mezcla de control y MSC a 10 Hz y 20 °C

Para ambas mezclas MSC, cuando las temperaturas de compactación se redujeron, el contenido de huecos aumentó y, en consecuencia, el módulo de rigidez disminuyó. Por otra parte, para determinar el efecto de las ceras, se debe comparar la mezcla control y las mezclas MSC con un contenido de huecos similar, que en este caso son la mezclas MSC a 170 °C. Estas mezclas presentan un mayor módulo de rigidez en comparación con la mezcla de control, por lo que las ceras endurecen las mezclas a 20 °C. Esto está en consonancia con el hecho de que las ceras tienen temperaturas de fusión superiores a la temperatura a la que se realizó la prueba, lo que significa que a temperaturas más bajas las ceras ayudan a endurecer las mezclas. En resumen, el módulo de rigidez cambia debido a la combinación de dos factores: el aditivo, que aumenta la rigidez, y el mayor contenido de huecos, lo que disminuye el módulo de rigidez.

4.5 Fatiga

Aunque el tipo de mezcla objeto de estudio está pensada como capa de rodadura y, por lo tanto, no fallará a fatiga, para tener una mejor comprensión de la misma, se decidió hacer el ensayo de fatiga pero solo a una de las temperaturas de fabricación/compactación, la que se corresponde con 20 °C menos que la mezcla de control, siendo representativa del comportamiento del material. Del ensayo a flexión en cuatro puntos se puede obtener las líneas de fatiga que se muestran en la Figura 11.

La resistencia a la fatiga de la mezcla MSC-C1 fue similar a la de la mezcla de control, mientras que la de la mezcla MSC-C2 mostró una mejora notable. La vida de la fatiga se compara a menudo en términos del valor de la deformación ϵ_6 , que corresponde a 10^6 ciclos. Estos valores se muestran en la Tabla 6.

En general, las ceras no comprometen el rendimiento de la fatiga.

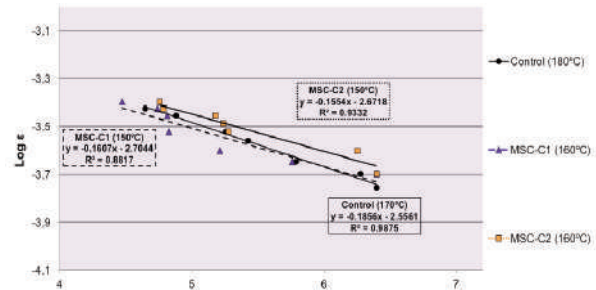


Figura 11: Leyes de fatiga de las mezclas de control y MSC a 10 Hz y 20 °C

Tabla 6. Valores de deformación ϵ_6 de las mezclas de control y MSC

Mezcla	Log ϵ_6
Control	-3.67
MSC-C1	-3.67
MSC-C2	-3.60

5. Conclusiones

Este estudio evaluó los efectos de una cera Fischer-Tropsch (cera C1) y de una cera de amidas de ácidos grasos (cera C2) sobre la compactabilidad y el comportamiento mecánico de mezclas con caucho y aditivos de mezclas semicalientes (9% de betún modificado sobre el peso de los áridos, 20% de caucho sobre el peso del betún neto). La mezcla de control se fabricó a 180°C y las mezclas con caucho y aditivos de mezclas semicalientes (denominadas en este estudio como mezclas MSC) se fabricaron a 170 °C, 160 °C y 150 °C. Se estudió la compactabilidad y se evaluó la sensibilidad al agua, el módulo de rigidez, la resistencia a la deformación permanente y la resistencia a fatiga. Las principales conclusiones fueron las siguientes:

Según el estudio de compactabilidad, la presencia de las ceras en la mezclas logran disminuir la temperatura de fabricación/compactación entre 20 °C y 25 °C. El contenido de huecos disminuyó cuando las mezclas MSC se fabricaron a 10 °C por debajo de la mezcla de control y aumentaron ligeramente cuando se fabricaron a 20 °C y 30 °C por debajo de la temperatura de producción de la mezcla de control. Este aumento nunca fue más del 0,4% y 0,7% en el caso de la cera C1 y la cera C2 respectivamente.

Respecto a la sensibilidad al agua, los resultados muestran

Compactabilidad y propiedades mecánicas de mezclas con caucho y aditivos de mezclas semicalientes

que la adición de las ceras reduce la resistencia conservada hasta cierto grado. La mezcla de MSC-C2 satisface los requisitos de sensibilidad al agua en España (90%) pero no la mezcla MSC-C1 (88%). Esto se debe a la presencia de las ceras en el mástico. También se percibió que a medida que disminuían las temperaturas de producción/compactación, la resistencia conservada era también más baja como consecuencia de un porcentaje ligeramente mayor de huecos. Esta limitación significa que debe estudiarse el uso de activantes para mejorar la sensibilidad al agua de las mezclas MSC.

También se observó que, en comparación con la mezcla de control, las ceras redujeron la profundidad de la rodera a menos de la mitad. Las ceras tienen puntos de fusión por encima de los 90 °C, por lo que parece que por debajo del punto de fusión las ceras ayudan a endurecer las mezclas MSC. Además, las ceras mejoran significativamente el rendimiento de la resistencia a roderas de la mezcla de control a pesar de ser producidas a temperaturas considerablemente más bajas, lo que confirma la eficacia de las ceras en cuanto a resistencia a la deformación permanente.

En cuanto al módulo de rigidez se observó que las mezclas de MSC presentan valores mayores o iguales en comparación con la mezcla de control, excepto para las mezclas producidas a 150 °C. Desde el punto de vista del rendimiento mecánico, un módulo de rigidez más alto es ventajoso porque esto permite una mejor distribución de las cargas de tráfico en las capas inferiores. En otras palabras, con una temperatura de producción de 150 °C, hay un módulo menor a 20 °C que puede provocar daños estructurales en las capas más bajas del pavimento. Sin embargo, como las mezclas MSC se utilizan principalmente para capas superficiales (3-5 cm de espesor), el efecto estructural es limitado.

Respecto a la resistencia a la fatiga las ceras estudiadas no comprometen el rendimiento de la mezcla de control en términos de resistencia a la fatiga a 20°C ya que las mezclas MSC tuvieron la misma o mayor resistencia a la fatiga. Sin embargo, las mezclas de MSC se ven sometidas a deformación por compresión y, dado que el fallo a fatiga está relacionado con la deformación por tracción, desde la perspectiva del comportamiento mecánico, estos resultados particulares son menos relevantes que la sensibilidad al agua, la deformación permanente o el módulo de rigidez.

En definitiva, el estudio sugiere que las ceras elegidas para el estudio logran disminuir las temperaturas de

fabricación/compactación, mejoran la resistencia a las deformaciones permanentes y a la fatiga, empeoran ligeramente la sensibilidad del agua y no afectan significativamente el módulo de rigidez. Por lo tanto, los aditivos de mezclas semicalientes estudiados pueden incorporarse para producir mezclas con caucho más sostenibles, ya que las temperaturas de producción podrían reducirse sin comprometer el comportamiento mecánico de las mismas.

6. Referências bibliográficas

- [1] Huang B, Mohammad LN, Graves PS, Abadie C., "Louisiana experience with crumb rubber-modified hot-mix asphalt pavement." *Transport Res Rec: J Transport Res Board*, vol. 1789:1–13, 2002.
- [2] L. S. Liang RY, "Short-term and long-term aging behavior of rubber modified asphalt paving mixtures," *Transport Res Rec: J Transport Res Board*, vol. 1530:11–7., 1996.
- [3] Shen J, Amirkhanian S, Lee S-J, "Effects of rejuvenating agents on recycled aged rubber modified binders," *Int J Pavement Eng*, vol. 6(4):273–9, 2005.
- [4] CEDEX, "Manual de Empleo de Caucho de NFU en Mezclas Bituminosas". Ministerio de Fomento, Ministerio de Medio Ambiente, 2007.
- [5] United Nations, "Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change," 1992.
- [6] V. Hirsch, "Warm Mix Asphalt Technologies. BAST, Germany, Presentation to WM A Scan Team," 2007.
- [7] M. Nölting, "10 Years of Sasobit Technology Experiences, Applications and Outlook. BAST, Germany, Presentation to WM A Scan Team.", 2007.
- [8] D'Angelo et al, "Warm-mix asphalt: European practice Report No FHWA-PL-08-007," 2008.
- [9] J. Gallego et al, "Thermal sensitivity and fatigue life of gap-graded asphalt mixes incorporating crumb rubber from tire waste," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1998, pp. 132–139, 2007.
- [10] Ministerio de Fomento, " Colección normativa técnica. Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3). Artículo 543: Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas", 2014.