



SIGNUS

SISTEMA COLECTIVO DE GESTIÓN DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO

M EZCLAS SEMICALIENTES CON POLVO DE CAUCHO PROCEDENTE DEL NEUMÁTICO AL FINAL DE SU VIDA ÚTIL

AUTORES

© Copyright SIGNUS ECOVALOR
Depósito legal:

Juan Gallego Medina

Profesor Titular
Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

Ana María Rodríguez Alloza

Profesora Ayudante Doctor
Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

Leticia Saiz Rodríguez

Directora de Desarrollo e Innovación
SIGNUS Ecovalor

Roberto Pérez Aparicio

Técnico de Desarrollo e Innovación
SIGNUS Ecovalor

CON LA COLABORACIÓN DE:

Fernando Moreno Navarro

Profesor Titular del Área de Ingeniería de la
Construcción, Universidad de Granada
Subdirector del Grupo LabIC.UGR

M^a Carmen Rubio Gámez

Catedrática del Área de Ingeniería de la
Construcción, Universidad de Granada
Directora del Grupo LabIC.UGR

ISBN: 978-84-09-11306-4



RESEÑA

SIGNUS Ecovalor es una entidad sin ánimo de lucro creada como sistema colectivo de responsabilidad ampliada del productor a disposición de todos aquellos fabricantes e importadores (productores) que debe cumplir sus obligaciones legales en relación con los neumáticos fuera de uso.

La misión de SIGNUS es responder a la necesidad que tiene la sociedad de vivir en un entorno sostenible, garantizando el adecuado tratamiento de los neumáticos fuera de uso desde su generación hasta su transformación en materias primas con valor.

Una de las más importantes aplicaciones para maximizar ese valor es la utilización del polvo de neumático procedente de los que han llegado al final de su vida útil en mezclas bituminosas, confiriéndoles unas propiedades específicas y cerrando el ciclo del concepto de Economía Circular.





AGRADECIMIENTOS

SIGNUS quiere agradecer a los autores de este documento su compromiso y dedicación en la elaboración de esta publicación, así como a los técnicos de laboratorio de ambas Universidades que realizaron los correspondientes ensayos experimentales.

Además, desde aquí SIGNUS tiene el deseo de reconocer la labor que realizan los autores de forma desinteresada para contribuir al fomento y desarrollo de la utilización del polvo de caucho procedente del NFVU en las carreteras españolas.



00

INTRODUCCIÓN	8
---------------------	---

01

CAPÍTULO I	
MEZCLAS BITUMINOSAS SEMICALIENTES CON CAUCHO	10
1.1 Mezclas con caucho de NFVU	11
1.2 Mezclas bituminosas semicalientes	12
1.3 Mezclas bituminosas semicalientes con caucho	15
1.4 Conclusiones del capítulo	18

02

CAPÍTULO II	
METODOLOGÍA DE ESTUDIO EN LABORATORIO	20
2.1 Peculiaridades de las mezclas semicalientes con caucho	21
2.2 Proceso de diseño de las mezclas semicalientes con caucho	22
2.3 Caracterización avanzada de mezclas semicalientes con caucho	27

03

CAPÍTULO III	
ADITIVOS PARA MEZCLAS SEMICALIENTES CON CAUCHO	28
3.1 Aditivos orgánicos	29
3.2 Aditivos químicos	30
3.3 Aspectos prácticos para la incorporación de los aditivos en betún caucho	30
3.4 Control de la temperatura de mezcla y compactación en el laboratorio	30

04

CAPÍTULO IV	
CASOS PRÁCTICOS DE FABRICACIÓN DE MEZCLAS SEMICALIENTES CON CAUCHO EN LABORATORIO	32
Caso práctico A.	
Mezcla semicaliente SMA con caucho y aditivos químicos de origen vegetal	34
Caso práctico B.	
Mezcla AC16 S con caucho y aditivo químico de origen vegetal	46
Caso práctico C.	
Fabricación de una mezcla semicaliente BBTM 11A con betún modificado con alto porcentaje de caucho	56

05

CAPÍTULO V	
CONCLUSIONES	65

— INDICE

—INTRODUCCIÓN



Hace dos décadas que en España se está trabajando con mezclas bituminosas con caucho procedente del neumático¹. Desde entonces se han pavimentado más de 1.600 kilómetros de autopistas, carreteras y viales urbanos, y lo que es más importante, se han desarrollado especificaciones técnicas que recogen toda esta experiencia y que continúan evolucionando en el momento actual para incorporar todo el conocimiento generado por los distintos agentes que intervienen en el sector de la pavimentación. Las tecnologías desarrolladas en España están siendo exportadas fuera de nuestro país, aplicadas por empresas españolas con proyección internacional.

Dentro de esa evolución tecnológica, la aplicación de tecnologías de fabricación a temperatura reducida se plantea ya como una necesidad para las mezclas con caucho por la ventaja medioambiental que suponen. A pesar de que los datos reportados en la bibliografía indican que es factible la fabricación de mezclas bituminosas semicalientes con caucho incorporando aditivos convencionales, la experiencia que hay de esta tecnología a nivel de campo es todavía insuficiente.

Este documento nace con el objetivo de poner a disposición del sector información técnica que anime a la aplicación de estas técnicas semicalientes con caucho en proyectos a escala real, para poner en juego todas las potencialidades de las mezclas bituminosas con caucho de neumáticos al final de su vida útil (NFVU).

A lo largo del presente documento se revisará el estado del conocimiento sobre el tema, las tecnologías más adecuadas en el caso de las mezclas con caucho, los protocolos de trabajo en laboratorio y estudios de casos concretos a nivel de laboratorio.

Esta publicación junto con otras anteriores² formarían parte de un plan de acción diseñado por SIGNUS Ecovalor para fomentar la utilización del polvo de caucho en carreteras. De esta forma, se contribuye a cumplir con los requisitos adicionales establecidos a través del Plan Estratégico Marco de Residuos 2016-2022 del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, y las políticas de fomento de la sostenibilidad de la actividad económica impulsado por el denominado paquete de Economía Circular de la Comisión Europea.



“En España hay más de 1.600 kilómetros de carreteras asfaltadas con polvo de neumático”

¹ A lo largo del documento se usa indistintamente la denominación polvo de neumático, polvo de caucho o polvo de NFVU para hacer referencia a la fracción más pequeña del caucho obtenido del proceso de transformación del neumático al final de su vida útil.

² “20 años de mezclas asfálticas con polvo de neumático en las carreteras españolas” (2018)
“Guía para la fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas con polvo de neumático” (2017)
“Guía para la fabricación de betunes con polvo de neumático” (2014)

MEZCLAS BITUMINOSAS SEMICALIENTES CON CAUCHO

En este capítulo se presenta el estado del conocimiento sobre las mezclas semicalientes destacando sus beneficios y las tecnologías más adecuadas en el caso de las mezclas con caucho.



1.1 MEZCLAS CON CAUCHO DE NFVU

1.1.1 Tipos de ligantes y mezclas bituminosas con caucho de NFVU

El caucho, como es sabido, puede incorporarse a las mezclas bituminosas por vía húmeda o por vía seca. En el primer caso, se fabrica un ligante betún-caucho que garantiza que la digestión del caucho en el betún ha alcanzado un grado suficiente. Posteriormente, en el momento de la fabricación de la mezcla bituminosa el betún-caucho se incorpora en el mezclador de la central junto con

“Las mezclas bituminosas semicalientes son aquellas que se fabrican a temperaturas entre 20 y 40°C por debajo de las habituales”

los áridos. Actualmente, la normativa española recoge los betunes mejorados con caucho, los betunes modificados con caucho y los betunes de alta viscosidad con caucho.

En la vía seca, sin embargo, el caucho se incorpora a la mezcla bituminosa en el momento de su fabricación, junto con los áridos y el betún. En este caso, debe observarse un tiempo de digestión mínimo que depende de varios factores, antes del cual no puede extenderse la mezcla ni permitir

que se enfríe, puesto que la insuficiente digestión del caucho puede limitar su comportamiento en servicio.

Recientemente ha aparecido otra técnica, que ha dado en denominarse semihúmeda, en la que el polvo de caucho tiene algún tratamiento previo que facilita su digestión e integración en el betún, de modo que puede añadirse directamente en el momento de fabricar la mezcla bituminosa como si se tratase de vía seca, pero precisa poco o ningún tiempo de digestión previamente a su extendido como en la vía húmeda. Esta técnica no se incluyó en los casos prácticos porque en su momento todavía no se había extendido su uso.

Las mezclas bituminosas con caucho pueden destinarse tanto a la capa de rodadura como a capas más profundas. Al igual que las mezclas que incorporan otro tipo de modificador, las mezclas de granulometría discontinua (BBTM A y B), las mezclas SMA (Stone Matrix Asphalt) y las porosas (PA) se destinan a capa de rodadura, mientras que las mezclas tipo hormigón bituminoso (AC) se colocan en capas inferiores, aunque en carreteras de tráfico medio o bajo también en capa de rodadura.

1.1.2 Comportamiento de betunes y mezclas con caucho

En general, la incorporación de caucho a los betunes supone una modificación de sus características reológicas en la misma dirección que la modificación con otros polímeros y que se caracteriza frente a los betunes base por una menor susceptibilidad térmica, una mayor flexibilidad y elasticidad, y una mejor resistencia al envejecimiento.



Por su parte, las mezclas bituminosas con caucho de NFVU -por vía húmeda, seca o semihúmeda- presentan mejor comportamiento a las deformaciones plásticas, a la fatiga y a la fisuración que sus materiales homólogos sin caucho.

Por tanto, se trata de unos materiales excelentes para la pavimentación desde el punto de vista mecánico. No obstante, conviene señalar que debido a la presencia del caucho es preciso trabajar a temperaturas 5-10°C por encima de lo habitual en mezcla sin caucho. De ahí la necesidad de integrar las tecnologías de baja temperatura de fabricación en este tipo de mezclas, de modo que converjan todos los factores medioambientales que presentan.

1.2 MEZCLAS BITUMINOSAS SEMICALIENTES

Se denominan mezclas bituminosas semicalientes aquéllas que se fabrican a temperaturas que vienen a estar entre 20 y 40°C por debajo de las habituales para cada tipo de mezcla y ligante. Para lograrlo existen varias técnicas que se ven con detalle en los apartados siguientes que, en definitiva, permiten trabajar a temperaturas más bajas.

1.2.1 Objetivos de las tecnologías semicalientes

La reducción de temperatura persigue varios objetivos:

- Reducir el consumo energético durante la fabricación, al calentar los áridos hasta temperaturas no tan altas como en las mezclas en caliente convencionales
- Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, consecuencia directa del menor consumo de combustibles [1]
- Mejorar las condiciones de salud en el trabajo para todo el personal ocupado en las diversas tareas de pavimentación [2]
- Generar menos molestias en la vecindad de las centrales de fabricación de mezclas bituminosas y de los lugares de extendido.
- Reducir los costes de producción

No obstante, estas técnicas, que facilitan no sólo la fabricación si no la compactación a menores temperaturas, pueden aprovecharse para fabricar a temperaturas de mezclas en caliente, lo que permite mayor holgura cuando se trata de:

- Distancias de transporte largas, durante las que puede enfriarse la mezcla bituminosa y presentar en el tajo de extendido problemas de trabajabilidad y compactibilidad
- Climas muy fríos, en los que incluso a distancias de transporte normales la mezcla puede sufrir un enfriamiento considerable durante el transporte, con los consiguientes problemas de compactación si no se trabaja con tecnologías de mezclas semicalientes

Sin embargo, se han señalado algunos inconvenientes que aparecen cuando se emplean técnicas de semicalientes. Pueden mencionarse los costes asociados al empleo de aditivos o dispositivos especiales en las centrales, lo que podría ser total o parcialmente compensado por la reducción de energía consumida en calentar los áridos. Incluso aspectos como el menor envejecimiento del ligante durante la etapa de fabricación de la mezcla, que de entrada ha de considerarse un efecto positivo, se ha citado como posible causante a posteriori de deformaciones plásticas. O la menor resistencia al ataque del agua debido a que, al trabajar a temperaturas menores, podría quedar cierta humedad en los áridos lo que ocasionaría una adherencia ligante-árido deficiente y el riesgo de daños por humedad en el futuro.

Estos potenciales riesgos pueden detectarse y prevenirse en la etapa de laboratorio y durante la fabricación y puesta en obra, por lo que no parece que vayan a ser obstáculo para unas tecnologías cuya generalización, por sus consecuencias ambientales y económicas, hoy parece imparable.

1.2.2 Tecnologías disponibles para mezclas bituminosas semicalientes

La clasificación más sencilla y práctica podría dividir las tecnologías de semicalientes en tres grupos diferenciados por los mecanismos en los que se basa la reducción de temperatura [3]. Son los siguientes:

- **Aditivos orgánicos**

Se trata en general de productos que reducen la viscosidad del ligante a temperaturas altas, de modo que se mejora la trabajabilidad y la compactibilidad de la mezcla bituminosa. Son habituales ceras de cadena larga y parafinas, cuyos puntos de fusión están entre 90 y 110°C, por lo que acentúan la bajada de la viscosidad por encima de dichas temperaturas. Sin embargo, a temperaturas más bajas aportan consistencia y a temperaturas bajo cero pueden incluso favorecer la fragilidad del betún del ligante y por ende de la mezcla bituminosa. Estos aditivos orgánicos están en estado sólido a temperatura ambiente, por lo que suelen servirse en forma de escamas o granulado. No obstante, se mezclan muy bien con el betún, por lo que unos minutos en un mezclador de baja velocidad, a 140°C, son suficientes para conseguir una integración homogénea del producto en el ligante.

- **Aditivos químicos**

En este caso los productos y los mecanismos con que actúan son más variados. Pueden encontrarse surfactantes que reducen la tensión superficial, permitiendo una correcta envuelta a temperaturas menores que las habituales. En otros casos se trata de promotores de la envuelta que generan una mayor afinidad electroquímica entre la superficie de los áridos y el ligante, lo que permite una correcta envuelta a temperaturas más bajas de lo habitual. Es frecuente que estos aditivos sumen a su mecanismo principal un efecto lubricante por encima de los 90°C, lo que aporta también trabajabilidad y compactibilidad durante las labores de extendido y compactación.

Es frecuente que estén en estado líquido a temperatura ambiente y que se mezclen con facilidad con el betún. Existe la idea de que los aditivos orgánicos basados en las ceras tienen



“Los beneficios que presentan las mezclas semicalientes son ambientales, económicos y en algunas ocasiones se ha observado un mejor comportamiento de los firmes”

estabilidad térmica, es decir, pueden mezclarse con el betún, que se sirve a obra ya aditivado, y se almacena en los tanques de la central a elevada temperatura. Sin embargo, algunos aditivos químicos podrían ser inestables si se someten a altas temperaturas durante horas, lo que obliga a incorporarlos al betún poco antes de fabricar la mezcla bituminosa. En cualquier caso, y ante la duda, debería comprobarse experimentalmente la estabilidad térmica del aditivo químico, es decir, su eficacia para permitir la reducción de temperaturas de trabajo incluso después de haber estado incorporado en el betún durante horas.

- **Espumación de betunes**

Consiste en la inyección de pequeñas cantidades de agua (en torno al 3%) en betún a elevada temperatura, de tal modo que el agua pasa al estado de vapor, dando lugar a una especie de espuma que facilita la envuelta de los áridos. Sin embargo, esta espuma tiende a reducir su volumen en cuestión de segundos o minutos, lo que implica que la mezcla con los áridos ha de hacerse inmediatamente después de la espumación.

Se trata de una técnica contrastada y en auge en mezclas convencionales, sin bien es verdad que para su aplicación de forma efectiva es necesaria la instalación de espumadores en las centrales de fabricación de mezclas bituminosas. También existen métodos de espumación indirecta (con zeolitas o filleres hidrofilicos).

Sin embargo, dado que no se han encontrado experiencias contrastadas de espumación de betunes con caucho de NFVU hacen que en este documento se centre la atención en los aditivos químicos y las ceras, de los que sí existe amplia experiencia, al menos en laboratorio, en mezclas con caucho.

1.2.3 Beneficios de las tecnologías de mezclas bituminosas semicalientes

Los beneficios que se obtienen en la utilización de mezclas semicalientes son ambientales y económicos, y en numerosas ocasiones se ha observado un mejor comportamiento de los firmes que incorporan este tipo de mezclas.

Al reducir las temperaturas de trabajo es posible consumir menor cantidad de combustible en el calentamiento del ligante y sobre todo de los áridos, que son aproximadamente un 95% de la mezcla bituminosa. Dependiendo del autor consultado, las reducciones de temperatura de trabajo suelen estar entre 20 y 35°C, y las reducciones en energía consumida por tonelada de mezcla bituminosa fabricada (combustible y electricidad) suponen un porcentaje del orden del 15 o el 20%. Se ha observado en algunos casos que, si bien el consumo de combustible para calentar los materiales descendió, el de electricidad se incrementó ligeramente, lo que se ha referido a una posible disminución de la trabajabilidad por excesiva reducción de la temperatura o por ineficacia del aditivo, lo que supuso un mayor esfuerzo para los motores que accionan el mezclador y otros mecanismos de la central.

Al reducirse el consumo de combustible, la emisión de gases también disminuye. Es sabido que el calentamiento de los materiales bituminosos en las etapas de fabricación y extendido da lugar a vapores y gases, compuestos de productos de combustión, compuestos orgánicos volátiles e hidrocarburos aromáticos policíclicos. Existe práctica unanimidad en que con el uso de mezclas bituminosas semicalientes se consigue una reducción significativa de las emisiones de CO₂ y también de óxidos de nitrógeno NOx. Sin embargo, podría incrementarse la emisión de CO, fruto de combustiones incompletas. En cuanto a la cantidad de compuestos orgánicos volátiles, en algunos casos se ha visto incrementada con la reducción de la temperatura de trabajo. Se precisa mayor investigación en esta línea para cuantificar las reducciones en emisiones gaseosas en función del tipo de central de fabricación, del rango de reducción de temperatura y de la tecnología de semicalientes que se utilice.

Un aspecto muy importante, relacionado con el anterior, viene dado por las molestias e incluso potenciales problemas de salud que podrían ocasionar emisiones de las mezclas bituminosas a los trabajadores en la planta y en el tajo de extendido. Gracias a la reciente aplicación de la fotoionización, que permite la detección de compuestos orgánicos en mezclas de gases, se ha demostrado que la generación de estas emisiones baja notablemente por debajo de 160°C (lo que se consigue con las técnicas semicalientes). Además, mediante sistemas de olfato artificial se ha comprobado que no sólo la cantidad total de emisiones descende, sino que su nivel de molestia (huella de olor) es menor para los trabajadores, lo que mejora sus condiciones de trabajo.

La disminución del consumo de energía, más allá de sus implicaciones medioambientales, puede conllevar ahorros económicos en la fabricación. El coste del combustible ahorrado se puede calcular directamente. Sin embargo, hay que tener en cuenta que estos ahorros pueden estar parcialmente contrarrestados por el coste de los aditivos y por la amortización de los dispositivos de dosificación de aditivos en planta, o por el dispositivo espumador si la tecnología utilizada es la de espumación.

1.3 MEZCLAS BITUMINOSAS SEMICALIENTES CON CAUCHO

Todo lo dicho en el apartado anterior sobre mezclas bituminosas semicalientes es directamente aplicable a las mezclas bituminosas semicalientes con caucho de neumáticos. Sin embargo, las peculiaridades de las mezclas con caucho introducen matices que no pueden obviarse.

1.3.1 Temperaturas de mezclas con caucho / mezclas convencionales

La presencia del caucho por vía húmeda, formando parte del ligante, tiene como consecuencia un incremento de la viscosidad, lo que obliga a elevar la temperatura de trabajo para conseguir una trabajabilidad y compactibilidad adecuadas. El incremento de temperatura, sobre una mezcla similar sin caucho, está entre 5 y 10°C dependiendo del contenido de caucho que tenga el ligante.

En el caso de caucho incorporado por vía seca, la necesidad de que el proceso de digestión betún-caucho se produzca durante el tiempo que la mezcla bituminosa permanece caliente y el hecho de que el incremento de temperatura dinamiza dicho proceso implica que se recomiende trabajar a temperaturas de unos 10°C por encima que en mezclas análogas sin caucho.

Por otro lado, se ha referido el olor característico de las mezclas bituminosas con caucho, acentuado sin duda por esos grados adicionales en la temperatura de trabajo.

Aunque no parece que este olor tenga efectos sobre la salud, es cierto que puede resultar molesto para algunos de los trabajadores. El empleo de tecnologías de mezclas bituminosas semicalientes permite en las mezclas con caucho reducir la temperatura de trabajo por debajo de los 160°C, umbral por debajo del cual las emisiones disminuyen y la huella de olor resulta menos intensa.

Considerando estos aspectos, resulta evidente la conveniencia de aplicar las técnicas de mezclas semicalientes a las mezclas con caucho: se reduce su temperatura de trabajo, se ahorra en combustible y se reducen las emisiones y los olores en la planta y el tajo de extendido.

1.3.2 Tecnologías semicalientes más adecuadas para las mezclas con caucho

Conviene decir que la mayoría de las experiencias documentadas hasta ahora de mezclas semicalientes con caucho de neumáticos se refieren al ámbito del laboratorio. Además, los experimentos reportados se refieren mayoritariamente a la utilización de aditivos orgánicos o aditivos químicos. Parece ser que la espumación de betunes con caucho ha sido poco desarrollada, probablemente porque el tiempo de estabilidad de la espuma se ve acortado por la mayor viscosidad de estos ligantes y por la presencia de partículas de caucho en suspensión, con las que siempre hay que contar en este tipo de betunes.

Aunque se verá con mayor detalle en el siguiente apartado, puede adelantarse aquí que probablemente los más usados han sido los aditivos orgánicos para reducir la alta viscosidad, que es, como se ha dicho, uno de los aspectos más característicos de los ligantes con caucho.

No obstante, algunos aditivos químicos combinan un mecanismo que promueve la adecuada envuelta de los áridos con un efecto lubricante a alta temperatura, que mejora su trabajabilidad y compactibilidad. Además, muchos de estos aditivos comenzaron utilizándose como promotores de la adhesividad, por lo que pueden aportar beneficios en este aspecto.

Uno de los parámetros que más fidedignamente cuantifica la adecuada envuelta de los áridos por parte de un betún con caucho es el ensayo de sensibilidad al agua de la mezcla bituminosa.

Al ser el ligante un sistema compuesto por betún-caucho, que más allá de su mezcla precisa también digestión, la envuelta puede verse afectada por el grado de digestión alcanzado, que se podría ver recompensado en algunos casos por la adhesividad procedente de los aditivos semicalientes.

En definitiva, los aditivos químicos para mezclas semicalientes en las mezclas bituminosas con caucho de neumáticos no sólo permiten reducir la temperatura mientras se fabrica o compacta, sino que pueden dotar a estas mezclas de una mayor durabilidad al potenciar la resistencia al ataque del agua, un aspecto al que hay que prestar particular atención en las mezclas con caucho.

1.3.3 Propiedades observadas en las mezclas semicalientes con caucho

Aunque las técnicas de mezclas bituminosas semicalientes y las de mezclas bituminosas con caucho están muy estudiadas, tanto en laboratorio como en proyectos de pavimentación a escala real, las mezclas bituminosas semicalientes con caucho han sido investigadas mucho menos. Probablemente no porque presenten mayores dificultades sino porque las tecnologías semicalientes comenzaron aplicándose a mezclas bituminosas convencionales y a medida que se ha ganado experiencia con ellas se han ido extendiendo a mezclas de diversas granulometrías, con betunes-polímero, con betunes-caucho, etc.

A continuación, se presentan algunos estudios tomados de la bibliografía en los que las técnicas semicalientes se aplican a mezclas con betunes-caucho. Se pueden encontrar casos de estudio con aditivos orgánicos, con aditivos químicos e incluso algún caso con betunes espumados.

a. Estudios con aditivos orgánicos

El aditivo orgánico más utilizado ha sido el producto denominado Sasobit. Se trata de una cera Fischer-Tropsch, con punto de fusión entre 90 y 110°C. Cuando el betún sobrepasa estas temperaturas, su viscosidad disminuye más que sin este aditivo. En un estudio sobre mezclas SMA, Rodríguez y Gallego [4] mostraron que en betunes de alta viscosidad con caucho (20% de caucho sobre el peso de betún modificado) el aditivo al 4% sobre ligante permitía reducir la temperatura de fabricación de 170 a 150°C. Las mezclas a temperatura reducida con Sasobit mostraron una resistencia a la acción del agua algo menor y una

resistencia a las deformaciones plásticas mejorada, respecto a las mezclas sin aditivo fabricadas a 170°C. Aunque la fatiga parecía poco afectada, al sustituir la cera Fischer-Tropsch por una cera de amidas de ácidos grasos la fatiga se vio beneficiada.

En otro estudio sobre mezclas SMA, Leng et al [5] incorporaban el producto Sasobit al 3% en un betún que incluía en su composición un 18% de caucho. Esto permitió reducir la temperatura de fabricación de 176 a 160°C. Estos autores reportaron una réplica del estudio, añadiendo en este caso sólo un 1,5% de cera de parafinas. Obtuvieron resultados muy similares, que en ambos casos daban lugar a pocos cambios en las propiedades de las mezclas bituminosas. Para betunes con un 18% de caucho Wen et al [6] reportaron un estudio para estimar la reducción de temperaturas en mezclas SMA y mezclas AC. Los estudios de viscosidad realizados sobre betunes incluyeron que las temperaturas podían reducirse unos 10°C con un 4% de Sasobit, y en el caso de la cera de polietileno unos 5°C. No reportaron ensayos mecánicos de mezclas bituminosas.

Aunque sin reducir la temperatura de fabricación, Razmi y Mirsayar [7] comprobaron las propiedades de una mezcla AC fabricada con un betún modificado con un 20% de caucho y aditivado con un 3% de Sasobit. Observaron que la modificación con caucho contrarresta el efecto rigidizador del Sasobit a bajas temperaturas, por lo que caucho y ceras parecen complementar sus propiedades.

b. Estudios con aditivos químicos

En este caso, los aditivos no actúan directamente sobre la viscosidad del ligante, sino que tienen diferentes mecanismos. Un trabajo reportado por Oliver et al [8] utiliza un producto surfactante al 0,5% en un ligante cuya composición incluye un 21% de caucho. La utilización del aditivo permitió reducir la temperatura de una mezcla del tipo AC desde 175 a 145°C. A pesar de la reducción de temperatura, la sensibilidad al agua mejoró, lo que se atribuye a los cambios en las interacciones en la interfase entre el árido y el ligante. Sin embargo, la resistencia a las deformaciones plásticas disminuyó debido a un ligero ablandamiento del ligante y otros parámetros como el módulo o la fatiga sufrieron poco cambio.

Incluso se encuentran estudios en los que se mezclan tres técnicas medioambientalmente favorables, como la valorización del caucho, las tecnologías semicalientes y la utilización del material reciclado de pavimentos (RAP). Es el caso reportado por Yang et al. [9], en el que una mezcla tipo AC incluye en su composición un betún con caucho fabricado en terminal de betunes (habitualmente estos ligantes no incorporan más de un 12% de caucho), un 30% de RAP y Evotherm (3G) incorporado al 0,3% de ligante. La utilización del aditivo permitió reducir la temperatura de fabricación desde 157 a 130°C. Además, gracias a su efecto promotor de la adhesividad se mejoró la sensibilidad al agua. La resistencia a las roderas no se vio afectada y la resistencia a la fisuración a baja temperatura tampoco.

Otro caso de estudio interesante es el reportado por Franesqui et al [10], en el que una mezcla tipo AC se fabrica con árido volcánico, un betún que incluye un 10% de caucho y el aditivo Cecabase RT al 0,3% en peso del ligante. Estos áridos presentan gran absorción, son rugosos y suelen mostrar dificultades de compactación. A pesar de ello, el aditivo permite bajar de los 180 hasta los 165°C cumpliendo especificaciones. Por debajo de esa temperatura el empeoramiento de la sensibilidad al agua y la resistencia a las deformaciones plásticas resultaban excesivos.

c. Estudios de espumación de betunes-caucho

Esta vía es probablemente la menos explorada. Wang et al. [11] reportaron un estudio de mezclas bituminosas tipos AC y SMA mediante espumación de un ligante que contenía un 18% de caucho. Para facilitar la espumación se incorporaba al agua un 10% del producto surfactante Evotherm DAT H5. En este caso el efecto era doble, por un lado, el de la espumación para hacer posible el trabajo a temperatura reducida, y por otro lado, el efecto surfactante, reductor de la tensión superficial, que facilita una mejor adhesividad entre el ligante y la superficie de los áridos. En cuanto al comportamiento de la mezcla bituminosa, se observó que la reducción de temperatura de 180 a 160°C para mantener las condiciones de trabajabilidad se traducía después en el empeoramiento de la sensibilidad al agua y la resistencia a las deformaciones plásticas.

1.3.4 Proyectos de pavimentación a escala real de mezclas semicalientes con caucho

Se han realizado trabajos de pavimentación de mezclas bituminosas semicalientes con caucho a escala real en Estados Unidos, Europa e incluso en España. Pero la documentación sobre ellos es menos abundante que en el caso de estudios de laboratorio.

Puede decirse que las tecnologías más utilizadas a escala real han sido las de aditivos orgánicos y las de aditivos químicos, en general con buenos resultados.

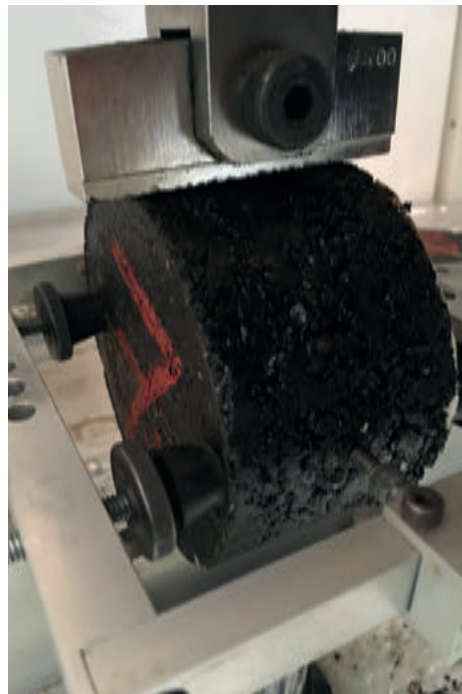
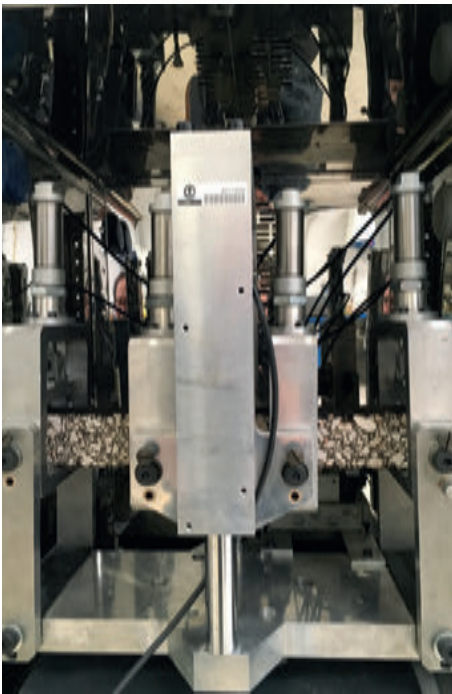
1.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

De todo lo dicho hasta ahora, resulta obvia la conveniencia de aplicar las técnicas de mezclas bituminosas semicalientes a las mezclas bituminosas con caucho. La reducción de la temperatura de trabajo supone beneficios ambientales que pueden tener en el caso de las mezclas con caucho mayor valor añadido al constituirse como una forma más limpia de valorizar el caucho de los NFVU.

Sin embargo, como se ha visto en los casos de mezclas semicalientes con caucho tomados de la bibliografía, existe disparidad de técnicas semicalientes y de materiales bituminosos con caucho. Asimismo, los resultados obtenidos por los investigadores varían desde experiencias muy positivas hasta otras en las que se reporta el empeoramiento de propiedades que son importantes para las altas prestaciones que se esperan de este tipo de mezclas.

Todo ello pone de relieve la necesidad de disponer de procedimientos sistemáticos para determinar si un aditivo o técnica son realmente eficaces para reducir las temperaturas de trabajo de una mezcla bituminosa con caucho, cuantificar la reducción de temperatura posible y establecer así las condiciones de fabricación y puesta en obra de la mezcla.

El siguiente capítulo, sobre procedimientos de dosificación y caracterización en laboratorio, se ha redactado precisamente con ese propósito.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Almeida-Costa, A., Benta, A. Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt, *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, pp. 2308-2317 (2016). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.077>
- [2] Kristjansdottir, O. Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving (Tesis doctoral), University of Washington, Seattle, WA, USA (2006). Disponible en: <https://www.wsdot.wa.gov/research/reports/fullreports/650.1.pdf>
- [3] Rubio, M. C., Martínez, G., Baena, L., Moreno, F. Warm mix asphalt: an over-view, *Journal of Cleaner Production*, vol. 24, pp. 76-84 (2012). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.053>
- [4] Rodríguez, A. M., Gallego, J. Compactibilidad y propiedades mecánicas de mezclas con caucho y aditivos de mezclas semicalientes, *Asfalto y Pavimentación*, vol. 8, pp. 15-22 (2018). Disponible en: <http://www.asefma.es/wp-content/uploads/2018/10/Revista-Asfalto-y-Pavimentaci%C3%B3n-30.pdf>
- [5] 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, *Construction and Building Materials*, vol. 144, pp. 291-299 (2017). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.208>
- [6] Wen, Y., Wang, Y., Zhao, K., Chong, D., Huang, W., Hao, G., Mo, S. The engineering, economic, and environmental performance of terminal blend rubberized asphalt binders with wax-based warm mix additives, *Journal of Cleaner Production*, vol. 184, pp. 985-1001 (2018). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.011>
- [7] Razmi, A., Mirsayar, M. M. Fracture resistance of asphalt concrete modified with crumb rubber at low temperatures, *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 11 (3), pp. 265-273 (2018). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.10.003>
- [8] Oliveira, J., Silva H., Abreu, L., Fernandes, S. Use of a warm mix asphalt additive to reduce the production temperatures and to improve the performance of asphalt rubber mixtures, *Journal of Cleaner Production*, vol. 41, pp. 15-22 (2013). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.047>
- [9] Yang, X., You, Z., Hasan, M. R. M., Diab, A., Shao, H., Chen, S., Ge, D. Environmental and mechanical performance of crumb rubber modified warm mix asphalt using Evotherm, *Journal of Cleaner Production* vol. 159, pp. 346-358 (2017). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.168>
- [10] Franesqui, M. A., Yepes, J., García-González, C., Gallego, J. Sustainable low-temperature asphalt mixtures with marginal porous volcanic aggregates and crumb rubber modified bitumen, *Journal of Cleaner Production*, vol. 207, pp. 44-56 (2019). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.219>
- [11] Wang, Y., Zhu, J., Liu, L., Sun, L. Gradation Evaluation of Asphalt Rubber Mixture with Warm-mix Additive, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 96, pp. 31-38 (2013). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.007>



METODOLOGÍA DE ESTUDIO EN LABORATORIO

En este capítulo se dan una serie de recomendaciones para diseñar en el laboratorio la fórmula de trabajo cuando se utiliza polvo de caucho en la fabricación de una mezcla bituminosa semicaliente.

En el diseño de mezclas bituminosas es conveniente disponer de protocolos de trabajo que permitan abordar el procedimiento de una forma sistemática, de modo que con el menor número de ensayos posibles se llegue a una formulación que no omita ningún aspecto importante y que, abordada por distintos técnicos o laboratorios, conduzca a resultados muy similares. En el caso de las mezclas semicalientes aparecen nuevos parámetros que deben fijarse en la fórmula de trabajo, como el tipo de aditivo de mezclas semicalientes, el porcentaje del aditivo y la temperatura de trabajo, menor que la de la mezcla sin aditivos.

Con carácter general, se recomienda que el protocolo de trabajo se ordene según las siguientes etapas:

1. Obtención del contenido óptimo de ligante en la mezcla sin aditivos de semicalientes, como si se tratase de una mezcla en caliente.
2. Comprobación de las propiedades de la mezcla con aditivo de semicalientes (se puede utilizar el porcentaje recomendado por el fabricante), con varios escalones de temperatura más bajos, por ejemplo con descensos sucesivos de 10°C.
3. Comparación de los resultados para cada escalón de temperatura con las propiedades que se exigen en especificaciones de las mezclas en caliente (propiedades volumétricas, sensibilidad al agua, resistencia a las roderas, etc.) para establecer la bajada de temperatura aceptable con el contenido de aditivo utilizado.
4. Análisis de los resultados y decisión sobre la idoneidad del aditivo y del porcentaje del mismo que se ha incorporado en el ligante.

Existe cierta discrepancia sobre si el contenido óptimo de ligante (paso 1 de la relación anterior) debería obtenerse con el aditivo de mezclas semicalientes ya incluido o no. Para comprender mejor la diferencia, debe considerarse que los aditivos mejoran la compactabilidad de la mezcla bituminosa, lo que a temperatura de mezcla convencional se traducirá en una reducción de los huecos en mezcla y probablemente a un menor contenido de ligante para satisfacer este requisito volumétrico. Por tanto, la incorporación de aditivo a temperaturas convencionales conduciría a contenidos óptimos de betún menores de lo debido, lo que puede influir negativamente en las propiedades de la mezcla. De ahí la recomendación de acometer la formulación de partida sin aditivo de semicalientes y a la temperatura de fabricación convencional.

2.1 PECULIARIDADES DE LAS MEZCLAS SEMICALIENTES CON CAUCHO

Todo lo anterior aplica también a las mezclas bituminosas semicalientes con caucho. No obstante, conviene no perder de vista durante todo el proceso de dosificación algunas peculiaridades de las mezclas con caucho, que pueden resultar críticas cuando se pretende fabricar a temperaturas más bajas.

En primer lugar, los betunes con caucho, en diferente grado según el contenido que se incorpore en el ligante, dan lugar a incrementos apreciables de la viscosidad. Es decir, en principio constituye un reto mayor conseguir trabajar a temperaturas de semicalientes con mezclas bituminosas con caucho.



“Se recomienda definir la formulación de partida sin aditivo de semicalientes y a la temperatura de fabricación convencional”

También se ha observado que las mezclas con caucho presentan valores de resistencia a tracción indirecta y de sensibilidad al agua ligeramente inferiores a los de sus homólogas, sin caucho. Por tanto, cualquier protocolo de trabajo deberá prestar atención preferente a estas propiedades.

Sin embargo, en general, las mezclas bituminosas con caucho presentan buena resistencia a las deformaciones plásticas y, salvo en el caso de aditivos que ablanden sensiblemente el ligante, no serán de esperar problemas de roderas, excepto las que estén originadas por compactaciones insuficientes relacionadas con reducciones de temperatura excesivas o con la ineficacia del aditivo empleado.

2.2 PROCESO DE DISEÑO DE LAS MEZCLAS SEMICALIENTES CON CAUCHO

En la Figura 2.1 se identifican los parámetros de diseño y las propiedades que debe incorporar un protocolo de diseño de mezclas semicalientes con caucho.

El enfoque que se muestra a continuación es una vez seleccionado el ligante o el tipo de tecnología con caucho que se va a utilizar. Es decir, ya están definidas las características del ligante, incluido el contenido de caucho si se trata de la vía húmeda o el contenido de caucho de la mezcla en el caso de incorporarse por la vía semihúmeda o seca. Por tanto, se trata de aplicar una tecnología de semicalientes a una técnica de incorporación de caucho preexistente.

Los factores críticos que debe incluir el esquema de trabajo son la adecuada envuelta de los áridos, las características volumétricas de la mezcla (especialmente los huecos de aire), la sensibilidad al agua y la resistencia a la deformación plástica.

Más allá del diseño, se puede hacer una caracterización avanzada de la mezcla incluyendo módulo de rigidez, fatiga, resistencia a la fisuración, etc., de modo que puedan optimizarse materiales a partir de opciones semicalientes que ya cumplen las especificaciones.

2.2.1 Adecuada envuelta de los áridos

Al disminuir la temperatura de trabajo en una mezcla bituminosa una de las primeras consecuencias puede ser la envuelta deficiente de los áridos. Puede llegar a ser perceptible a simple vista, pero la evaluación de esta propiedad viene afectada por factores subjetivos, como la habilidad del operador, el color natural de los áridos (resulta más fácil detectar una envuelta incorrecta en un árido de color claro) o la granulometría de los mismos.

No obstante, una envuelta de baja calidad tendrá repercusión posterior en la susceptibilidad al agua de la mezcla bituminosa, por lo que el aspecto visual de la mezcla, a diferentes temperaturas con y sin aditivo de semicalientes, puede servir de alarma temprana sólo en casos muy evidentes. En el resto de situaciones será el ensayo de resistencia de la mezcla bituminosa al ataque del agua el que sancione definitivamente la calidad de la envuelta.

2.2.2 Compactibilidad

La compactibilidad es la facilidad que presenta una mezcla bituminosa para ser compactada. Para un procedimiento y energía de compactación determinados, la acomodación de las partículas minerales y la reducción de huecos de aire depende de diferentes factores, siendo la temperatura de compactación la más influyente. Al disminuir la temperatura de una mezcla bituminosa, la compactación resulta más difícil. De ahí la importancia de las técnicas semicalientes, que permiten compactaciones eficientes a temperaturas reducidas.

La compactibilidad se estudia en laboratorio experimentalmente mediante uno de los dos métodos siguientes:

1. Aplicando una energía determinada mediante algún tipo de compactador de los habitualmente empleados y evaluando la densidad que se ha conseguido, o bien los huecos en aire que han quedado en la mezcla. Suele medirse en continuo a medida que avanza la compactación. Probablemente es el más utilizado.

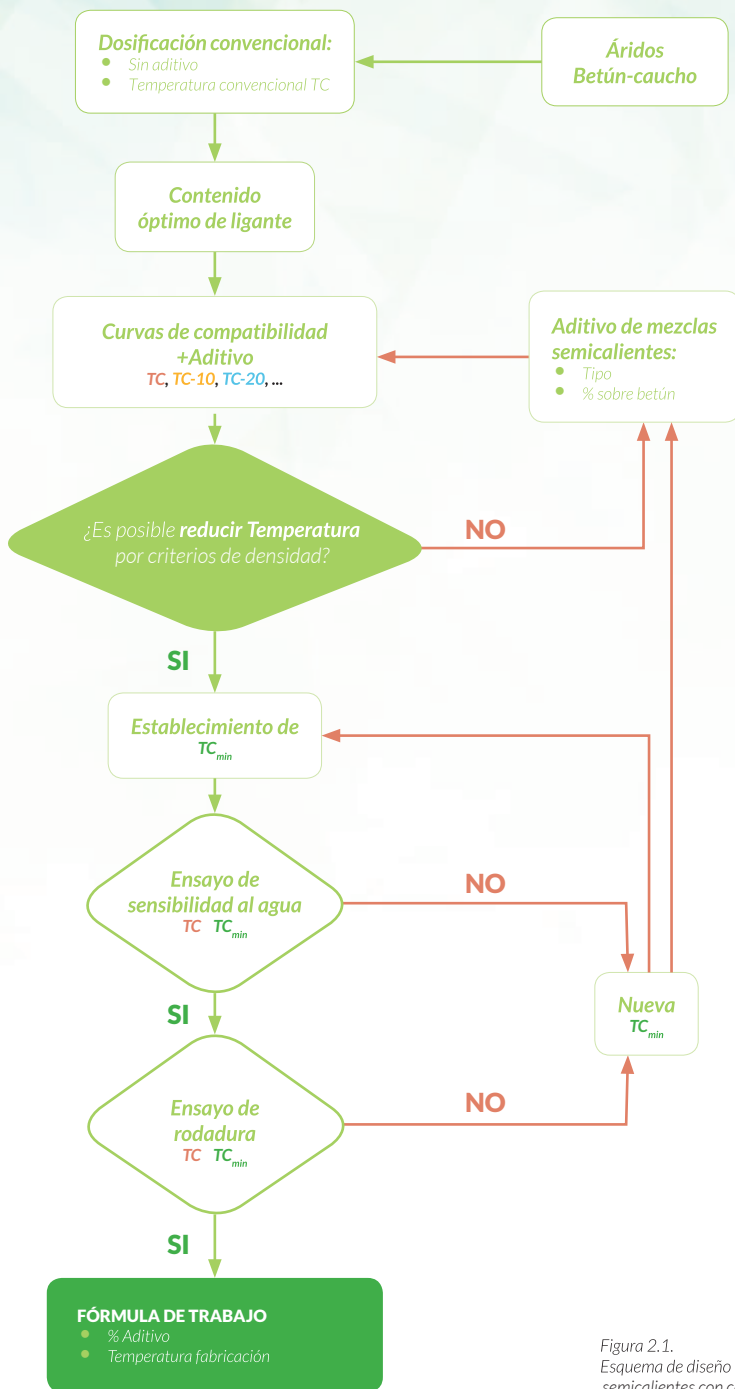


Figura 2.1.
Esquema de diseño de mezclas
semicalientes con caucho

2. Estableciendo una densidad determinada (contenido de huecos) y midiendo la energía necesaria para conseguirla con un procedimiento de compactación.

El procedimiento acaba cuando se alcanza la densidad requerida o se sobrepasa un determinado nivel de energía de compactación que se considera poco práctica.

Los compactadores más utilizados son la maza Marshall y el compactador giratorio. Existe, en ambos casos, un procedimiento normalizado en el estándar UNE-EN 12697-10, que permitiría con cualquiera de los dos compactadores estudiar las características de compactabilidad de una mezcla, y lo que es más importante, de distintas opciones de aditivos de semialientes y temperaturas de compactación.

Cuando se utiliza la maza Marshall se elabora una gráfica en la que se representa la evolución de la densidad con el número de golpes que ha recibido la probeta, entre 0 y 200, aplicando 100 por una cara y otros 100 por la otra. En el caso del compactador giratorio la curva representa el porcentaje de la densidad máxima con el número de giros aplicados, que también varía entre 0 y 200.

Para ambos procedimientos se han definido unos índices de compactibilidad que permiten expresar en un único valor las características de compactabilidad de una mezcla bituminosa a una temperatura determinada. Sin embargo, puede ser más útil visualizar las curvas en toda su evolución y deducir la mayor o menor compactibilidad de la muestra en función de la posición relativa entre curvas.

En la Figura 2.2 se presenta un ejemplo de curvas de este tipo obtenidas con el aparato Marshall para una misma mezcla bituminosa fabricada a distintas temperaturas. Para interpretarla correctamente debe tenerse en cuenta que cuanto más alta discurre una curva, más compactable es la mezcla, dado que la densidad aparente que alcanza la probeta es mayor. En este caso, la curva en color negro corresponde a la mezcla que más fácilmente se compacta, mientras que la de color azul representa la mezcla bituminosa con más dificultades de compactación.

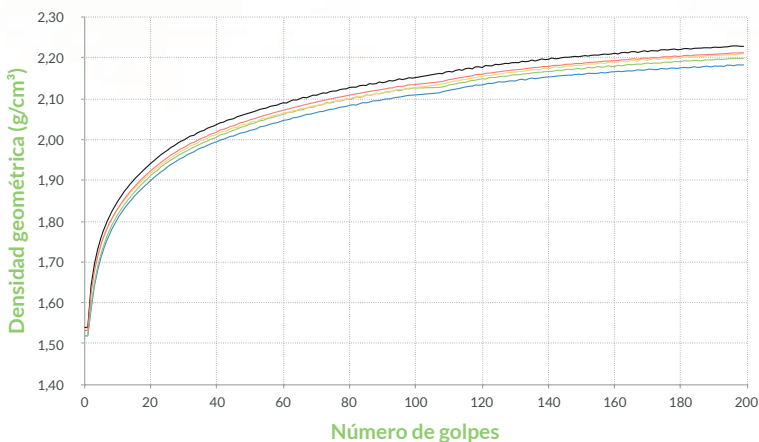


Figura 2.2
Curvas de compactibilidad
con el aparato Marshall

En el estudio con compactador giratorio que se muestra en la Figura 2.3 se observa que la forma de las curvas es similar, pero en este caso representan el porcentaje de la densidad máxima de la mezcla bituminosa. Cuanto más alta es la curva de evolución, mejor es la compactabilidad de la mezcla. En este caso, la mezcla correspondiente a la curva en color negro se compacta mejor que las mezclas correspondientes a las otras curvas. La que más dificultades de compactación ofrece es la que se representa en color azul.

Cuando estas curvas de compactibilidad se utilizan con mezclas semicalientes con caucho, el haz de curvas suele incluir la mezcla de referencia, sin aditivo de mezclas semicalientes, y varias curvas más que se corresponden con mezclas que sí incorporan aditivo de semicalientes y están fabricadas a temperaturas cada vez más bajas. En términos de compactibilidad, la temperatura de la mezcla podrá reducirse hasta que la curva correspondiente se sitúe bajo la curva de la mezcla de referencia, indicando que la compactación ya es menos eficiente que en aquélla.

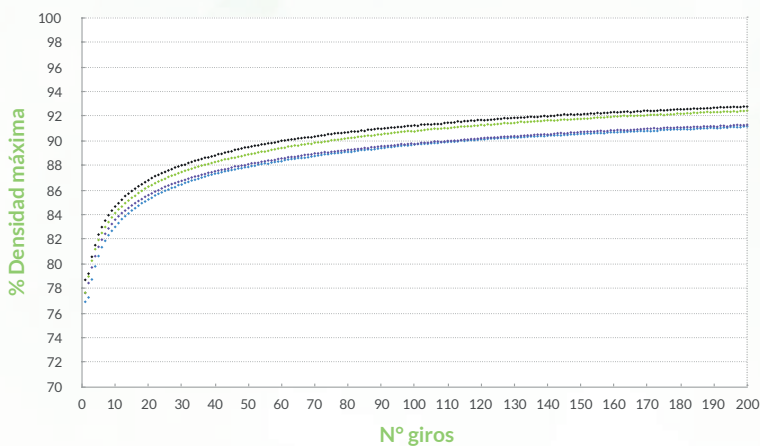
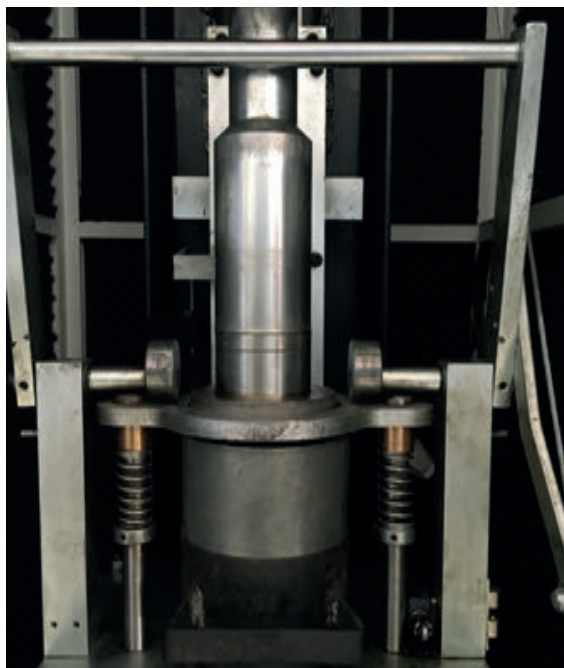


Figura 2.3.
Curvas de compactibilidad
en compactador giratorio



Aunque estos dos métodos deberían, teóricamente, llegar a la misma conclusión en cuanto a la temperatura más baja que sigue permitiendo una adecuada compactación, no parece ser así. Se ha observado que, al menos en el caso de las mezclas semicalientes con caucho, el ensayo de compactibilidad con compactador giratorio es más sensible, es decir, permite discriminar con más precisión la compactibilidad a distintas temperaturas.

No obstante, puede darse el caso, y no es infrecuente, en el que al adoptar la temperatura de fabricación semicaliente según el criterio de las curvas de compactibilidad, anteriormente descrito, otras propiedades de la mezcla fallen. Son absolutamente necesarios los ensayos de sensibilidad al agua y en buena medida también los de resistencia a las deformaciones plásticas para validar la temperatura de fabricación elegida según el criterio de compactibilidad.

2.2.3 Sensibilidad al agua

La sensibilidad de una mezcla bituminosa a la acción del agua se refiere a su vulnerabilidad frente a la humedad. Una mezcla bituminosa consiste en un conjunto de partículas minerales rodeadas de una película de ligante. Esa película puede ser desplazada por la humedad y en tal caso la resistencia general de la mezcla y su durabilidad disminuyen drásticamente.

La temperatura de fabricación es uno de los factores con mayor influencia en la calidad de la adherencia. De aquí que la sensibilidad al agua constituya uno de los fallos observados en mezclas semicalientes cuando el aditivo utilizado no es suficientemente eficiente.

En España, el control de la sensibilidad al agua se realiza mediante el estándar UNE-EN 12697-12, que consiste básicamente en la fabricación de 8 probetas de mezcla bituminosa con la dosificación deseada. De ellas, cuatro se acondicionan en baño de agua a 40°C durante 72 horas y las cuatro restantes se dejan al aire. Transcurrido ese tiempo todas las probetas se rompen a tracción indirecta (UNE-EN 12697-22), a 15°C, obteniéndose la media ITS (resistencia a tracción indirecta) de cada grupo. Habitualmente el agua debilita la resistencia de las probetas sumergidas a 40°C. Se define el ratio de resistencia conservada (ITSR) como el cociente ITS_w/ITS_d de las probetas sumergidas

respecto a las acondicionadas en seco, expresado en tanto por ciento.

Es necesario, por tanto, fabricar grupos de probetas a las diversas temperaturas que se están chequeando para comprobar que la reducción de temperatura no ha reducido el valor de la ITSR por debajo de los estipulados en las especificaciones para mezclas en caliente del mismo tipo y para la misma capa del firme. Es decir, se trata de comprobar que a la temperatura seleccionada la mezcla semicaliente cumple las especificaciones para mezclas en caliente.

En uno de los casos de estudio que se presentan en el Capítulo 4 se pone de manifiesto que los valores de ITSR pueden ser diferentes según cómo se hayan fabricado las probetas para dicho ensayo, con compactador Marshall o compactador giratorio. Se ha observado que las probetas de mezclas semicalientes con caucho compactadas con el compactador giratorio presentan ratios ITSR más altos que las compactadas con el procedimiento Marshall. Podría referirse este resultado al efecto de reamasado que consigue el compactador giratorio y que podría lograr una mejora de la adhesividad árido ligante que después se registra en el ensayo de sensibilidad al agua. En este sentido, y teniendo en cuenta los comentarios que se hicieron cuando se habló de los ensayos de compactibilidad, el procedimiento de compactación giratoria parece más adecuado que el Marshall para mezclas semicalientes con caucho de NFVU.

No obstante, conviene decir que algunos de los aditivos químicos de mezclas semicalientes tienen también un efecto promotor de la adhesividad, lo que en muchos casos además de permitir una bajada de la temperatura de trabajo protegen la mezcla frente al ataque del agua. Sin embargo, los aditivos orgánicos, particularmente las ceras, no brindan esta protección a la adhesividad árido/ligante.

“El efecto promotor de la adhesividad de algunos aditivos de mezclas semicalientes mejora la sensibilidad al agua de la mezcla”

2.2.4 Resistencia a las deformaciones plásticas

Con el empleo de ceras, que se presentan en estado sólido hasta temperaturas de unos 90°C, las rodadas no deberían constituir un problema. Los aditivos químicos, sin embargo, sí pueden tener un efecto ablandador del betún, apreciable a veces a pesar del escaso contenido que se incorpora en el ligante. En todos los casos, por descenso excesivo de la temperatura de fabricación y compactación, para las que el aditivo no resulta eficaz, la mezcla bituminosa puede quedar insuficientemente compactada, con más huecos que la mezcla en caliente de referencia. Esta circunstancia puede provocar también la aparición de deformaciones plásticas.

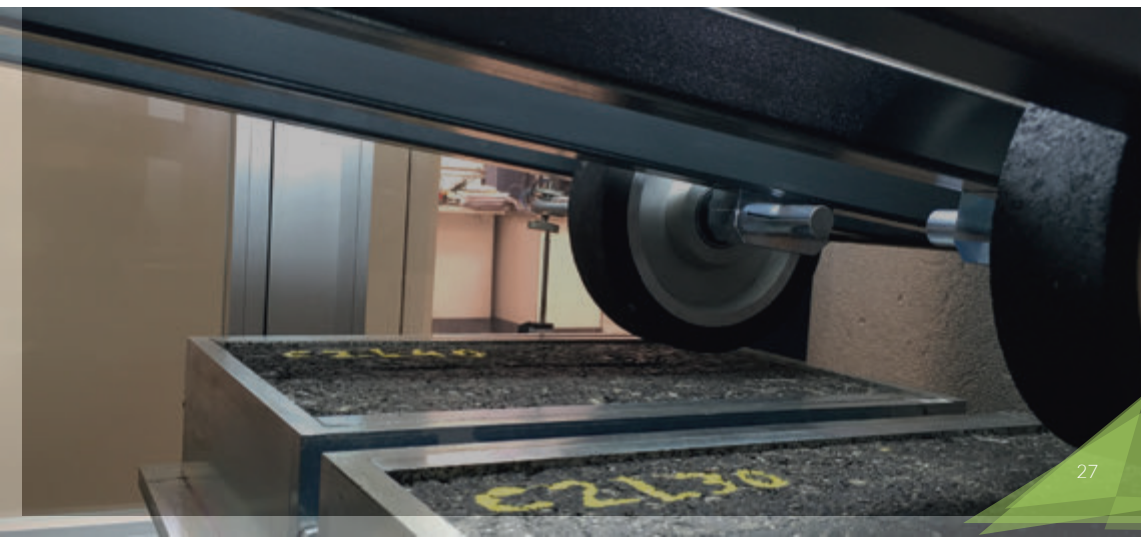
En España, el ensayo más extendido para chequear esta propiedad es el de rodadura, según el estándar UNE-EN 12697-22. En dicho ensayo, una rueda cargada realiza un total de 10.000 pasadas sobre una probeta prismática acondicionada a 60°C. El resultado principal del ensayo es la velocidad de deformación de la rodada entre la pasada 5.000 y la 10.000, parámetro conocido como $WTS_{5000-10000}$.

2.3 CARACTERIZACIÓN AVANZADA DE MEZCLAS SEMICALIENTES CON CAUCHO

El protocolo descrito en los apartados anteriores servirá para determinar el contenido óptimo de ligante, el aditivo más idóneo y su contenido en el ligante, y la temperatura mínima a la que es posible trabajar para cumplir las mismas especificaciones que se exigen a las mezclas en caliente.

No obstante, a nivel de investigación y por las repercusiones que después se pueden derivar para el dimensionamiento estructural de los firmes, una serie de ensayos pueden ofrecer una caracterización avanzada de las mezclas semicalientes con caucho de neumáticos. Nos referimos sobre todo al ensayo de módulo de rigidez (UNE-EN 12697-26) y al de fatiga (UNE-EN 12697-24), cuyos resultados constituyen el input de los métodos de dimensionamiento analítico de firmes. En general, se prefieren materiales con módulo de rigidez medio-alto y leyes de fatiga altas. Estos criterios pueden utilizarse para la optimización de la solución que se adopte en cuanto a la mezcla semicaliente con caucho más adecuada.

Otra propiedad que está tomando relevancia, por constituirse en uno de los fallos más frecuentes en los pavimentos, es la resistencia a la fisuración. Para su estudio a bajas temperaturas existe un ensayo recogido en el estándar UNE-EN 12697-46 (TSRST) que somete una probeta prismática a una carga axial de tracción según disminuye la temperatura. Además, recientemente han aparecido en el contexto español el ensayo FÉNIX, sobre probetas semicilíndricas a tracción, y los ensayos UGR-FACT y WRC sobre probetas prismáticas, todos ellos para realizar a la temperatura que se considere oportuna en función de las condiciones en que vaya a trabajar la capa del firme.



ADITIVOS PARA MEZCLAS SEMICALIENTES CON CAUCHO

En este capítulo se identifican los tipos de aditivos utilizados en mezclas semicalientes con caucho y algunos aspectos prácticos a tener en cuenta para su incorporación.



Como ya se avanzó, existen tres tecnologías en las que pueden agruparse las opciones actuales para fabricar mezclas bituminosas semicalientes: los aditivos orgánicos, los aditivos químicos y los betunes o mezclas espumados.

En el caso concreto de las mezclas semicalientes con caucho las experiencias de espumación son menos frecuentes. Parece ser que los contenidos de humedad que incorporan estas técnicas afectan a la sensibilidad al agua de las mezclas semicalientes con caucho, lo que resulta contraproducente, ya que la vida útil del material podría quedar muy acortada.

Hasta que exista más experiencia, por lo tanto, no pueden recomendarse las técnicas de espumación en mezclas semicalientes con caucho. Los apartados siguientes se centrarán por tanto en los aditivos orgánicos y químicos.

Para formular una mezcla semicaliente con caucho con uno de estos aditivos, conviene tener en cuenta lo siguiente:

- El aditivo debería introducirse en el ligante antes de fabricar la mezcla y no en la mezcla directamente. Aunque se mezclan bien con el betún, la adecuada homogeneidad se consigue mejor utilizando el betún como vehículo.
- Es difícil saber a priori la eficacia que tendrá y en qué porcentaje deberá incorporarse. Para dosificar la mezcla debe comenzarse siguiendo las recomendaciones del fabricante. Mediante el proceso de dosificación de mezclas semicalientes con caucho que se ha definido en el Capítulo 2 se determinará si el aditivo resulta eficaz y a partir de qué contenido lo es.

3.1 Aditivos orgánicos

Bajo este apéndice se reúnen una serie de ceras de cadena larga o amidas grasas, cuyos puntos de fusión suelen estar por encima de 90°C. Mientras el betún caucho esté a temperaturas inferiores, permanecen en estado sólido aportando consistencia al material; al elevarse la temperatura y superar su punto de fusión, se licúan dando lugar a un betún caucho con menor viscosidad de la que le correspondería de no estar aditivado. A temperaturas muy bajas se ha reportado la

fragilización de la mezcla, por lo que cuando se utiliza esta tecnología sería conveniente estudiar el ligante y la mezcla a bajas temperaturas. No obstante, al tratarse de mezclas con caucho esta rigidización estaría atenuada por la menor susceptibilidad térmica que provee el caucho.

Productos utilizados

Existe una variedad de productos que responden a este mecanismo de funcionamiento basado en reducir la viscosidad del ligante. Algunos ejemplos de estos aditivos son:

- Sasobit: constituido por ceras de cadena larga, que al fundirse disminuyen la viscosidad del betún caucho.
- Licomont BS 100: amida de ácidos grasos, que actúa sobre la viscosidad.
- Asphaltan A: cera de Montan obtenida por extracción con solventes de ciertos tipos de lignita y carbón, que reduce la viscosidad.
- Asphaltan B: cera de Montan refinada y mezclada con amidas de ácidos grasos, que actúa sobre la viscosidad.
- LEADCAP: producto basado en ceras con un promotor de la adhesividad. Reduce la viscosidad y a la vez lubrica. Incluye un inhibidor de la cristalización, que evita los problemas de fragilización de otras ceras a bajas temperaturas.
- SonneWarmix: cera parafínica que actúa sobre la viscosidad.





3.2 Aditivos químicos

Los aditivos químicos han supuesto una segunda generación de productos para mezclas semicalientes y son mucho más variados en cuanto a naturaleza y mecanismos de acción que los aditivos orgánicos.

Estos productos trabajan a escala micro en la interfase de los áridos y el betún caucho reduciendo la tensión superficial, lo que permite que el betún moje más fácilmente el árido, a pesar de las temperaturas reducidas. Asimismo, algunos actúan como promotores de la adhesión árido-ligante. Algunos ejemplos de estos productos son:

- Evotherm: compuesto diseñado para mejorar la envuelta, la adhesión y la trabajabilidad de la mezcla bituminosa.
- Rediset: surfactante que mejora también la trabajabilidad y la adhesividad.
- Cecabase RT: mezcla no acuosa de surfactantes que reduce la tensión superficial y lubrica.
- Iterlow T: compuesto que reduce la trabajabilidad.
- Thermo +: producto de origen vegetal, que mejora la trabajabilidad de la mezcla.

3.3 Aspectos prácticos para la incorporación de los aditivos en betún caucho

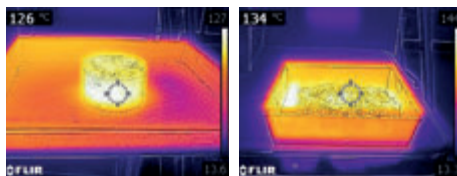
Como se ha dicho, los aditivos orgánicos suelen tener consistencia sólida a temperatura ambiente, lo que permite que se sirvan a granel. En el laboratorio se pesa en una balanza y se mezcla en la proporción adecuada en un mezclador de paletas de baja velocidad a unos 140°C durante unos minutos. Se logra una gran homogeneidad.

En el caso de los aditivos químicos, su incorporación es muy sencilla también, ya que se mezclan perfectamente con el betún. La dificultad viene dada en muchas ocasiones en el bajo porcentaje en que se incorpora en el betún. Dado que en laboratorio se aditivan porciones pequeñas de betún, puede ser necesaria la utilización de una pipeta electrónica para la correcta dosificación del aditivo.

3.4 Control de la temperatura de mezcla y compactación en el laboratorio.

Durante los trabajos de laboratorio la temperatura de la mezcla bituminosa ha de controlarse con precisión. Independientemente de que los dispositivos de mezclado mecánico dispongan de su propio control de temperatura, es necesario comprobar con precisión la temperatura de la mezcla durante el proceso de mezclado y antes de la compactación. De este modo, se garantiza la fiabilidad de los resultados obtenidos en los estudios de reducción de temperatura mediante la utilización de aditivos.

Se pueden utilizar termómetros de sonda, que se introducen en una zona de la masa, o bien dispositivos de infrarrojos que miden la temperatura de superficie puntualmente. Sin embargo, dada la importancia de la temperatura en este tipo de estudios, es deseable controlar también la homogeneidad de la temperatura y para ello es



imprescindible el uso de una cámara termográfica. Este tipo de cámaras detecta la radiación infrarroja de los cuerpos y elabora una imagen con un rango de colores que se corresponde con el rango de temperaturas que aparecen dentro de la imagen.

Toda la amasada o toda la probeta deberán estar a una temperatura homogénea, es decir con el mismo color, y correspondiente con la temperatura de trabajo que se está ensayando. Esta herramienta de supervisión de la temperatura es muy recomendable en los estudios de utilización de aditivos en mezclas semicalientes, y en general son de uso muy sencillo.



CASOS PRÁCTICOS DE FABRICACIÓN DE MEZCLAS SEMICALIENTES CON CAUCHO EN LABORATORIO

—04





CASO PRÁCTICO A: MEZCLA SMA

En esta investigación se realizaron varios ensayos (compactabilidad, sensibilidad al agua y resistencia a las deformaciones permanentes) para estudiar el efecto de dos aditivos químicos de mezclas semicalientes diferentes con el fin de evaluar el rendimiento de las mezclas SMA (Stone Matrix Asphalt) con betunes caucho.

Los resultados mostraron que es posible reducir las temperaturas de fabricación hasta 30°C. También se señaló que la fabricación en laboratorio de las muestras con compactador giratorio proporciona resultados que ayudan a caracterizar la calidad de las mezclas con caucho mejor que los resultados de las mezclas compactadas con el compactador Marshall.

CASO PRÁCTICO B: MEZCLA AC

En este caso se estudia el comportamiento de una mezcla semicaliente de granulometría continua tipo AC16S con caucho fabricada por vía húmeda y vía seca.

A partir de los resultados obtenidos se ha puesto de manifiesto que las mezclas tipo AC con betún mejorado pueden fabricarse y compactarse a temperaturas de unos 25°C por debajo de lo habitual, sin afectar a sus propiedades mecánicas, que se mantienen en valores similares y en cualquier caso dentro de las especificaciones españolas. Sin embargo, el uso del aditivo utilizado en este estudio no es efectivo en el caso de mezclas con caucho incorporado por vía seca.

CASO PRÁCTICO C: MEZCLA BBTM 11A

La mezcla seleccionada para este estudio fue una mezcla de granulometría discontinua de tipo BBTM 11A en caliente convencional fabricada con un betún con cauc y dos mezclas BBTM 11A semicalientes, fabricadas con el mismo betún y dos tipos de aditivos para reducir la temperatura. De esta forma, se hizo un análisis comparativo entre las mezclas bituminosas semicalientes y una mezcla en caliente convencional (mezcla de referencia).

Los resultados mostraron que es posible reducir las temperaturas de fabricación hasta 45°C.

CASO PRÁCTICO A

MEZCLA SEMICALIENTE SMA CON CAUCHO Y ADITIVOS QUÍMICOS DE ORIGEN VEGETAL

A.1. INTRODUCCIÓN

Las mezclas SMA son muy resistentes a las deformaciones permanentes y al agrietamiento por reflexión y además tienen una mayor durabilidad. Estas características se basan en el alto contenido de ligante que se logra con un buen esqueleto mineral, una alta proporción de filler y la incorporación de aditivos, especialmente de fibras de celulosa que permiten un mayor contenido de ligante sin que estas mezclas tengan riesgo de escurrimiento. Además, se ha demostrado que el uso de caucho para modificar el ligante hace innecesario agregar fibras de celulosa, ya que el betún caucho no es propenso al escurrimiento.

El rendimiento mecánico de las mezclas SMA ha sido evaluado en el pasado, sin embargo, el efecto de los aditivos de mezclas semicalientes en las mezclas SMA con caucho todavía está siendo estudiado [1]. Existen algunos resultados sobre el uso de mezclas SMA con ceras como aditivo de mezclas semicalientes y agentes anti-stripping, donde los resultados mostraron que la influencia de la cantidad de cera fue mayor que la influencia de otros factores como el contenido de betún [2].

Los trabajos que a continuación se exponen se llevaron a cabo en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid.

A.2. OBJETIVO

El objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de dos aditivos químicos para mezclas semicalientes sobre mezclas de SMA con caucho. Además, se determinó qué método de compactación de las mezclas podría ser mejor: (i) la compactación por impacto o (ii) la compactación giratoria.

A.3. MATERIALES

- Betún modificado con polvo de caucho: En este estudio se fabricó un betún modificado con polvo de NFVU a partir de dos betunes base: un betún de penetración 50/70 y un betún de penetración 160/220. El contenido de polvo de caucho (tamaño ^{partícula} < 0,6 mm) fue de un 10% en peso sobre el ligante. Además, se añadió un polímero en una proporción del 2,5% en peso sobre el ligante.
- Aditivos: se utilizaron dos tipos de aditivos químicos:

ADITIVO	DESCRIPCIÓN	DOSIFICACIÓN
Tensoactivo	Líquido vegetal con propiedades tensoactivas, termo resistente y estable en el almacenamiento, y que mejora la adhesividad entre el árido y el ligante	0,5% en peso sobre ligante
Organosilanos	Agente de adhesión basado en organosilanos que proporciona una mayor duración de mezclas asfálticas mejorando la adhesión, la mezcla, el recubrimiento y la compactación	0,15% en peso sobre ligante

Tabla A.1. Descripción y dosificación de los aditivos empleados

- Preparación del ligante: Para fabricar los ligantes en laboratorio, se calentó el betún base a 140°C. A continuación, se añadió el aditivo químico y se mezcló durante 15 minutos a 900 rpm. Seguidamente, se aumentó la temperatura hasta 185°C y se incorporó el polvo de caucho agitando la mezcla durante 45 minutos a 4.000 rpm. A continuación,

se añadió el polímero y se agitó la mezcla durante 15 minutos a 4.000 rpm. Finalmente, la temperatura se ajustó a 165°C y el ligante final se mezcló a 900 rpm durante 15 minutos.

En la Tabla A.2 se presenta una caracterización básica de los diferentes ligantes modificados fabricados en esta investigación.

NOMBRE DEL LIGANTE	BETÚN BASE	ADITIVO (%)	PUNTO DE REBLANDECIMIENTO T (°C)	PENETRACIÓN (10 ⁻¹ mm)	RECUPERACIÓN ELÁSTICA (%)
B (betún de referencia)	50% 50/70 + 50% 160/220	-	43,2	98,0	2,0
B+10C+2,5P	50% 50/70 + 50% 160/220	0%	66,6	55,0	83,0
B+10C+2,5P+T	50% 50/70 + 50% 160/220	0,5%	64,2	54,0	85,0
B+10C+2,5P+O	50% 50/70 + 50% 160/220	0,15%	65,0	54,0	84,0

Tabla A.2. Ligantes empleados en el estudio, composición y caracterización básica.

- Áridos: Los áridos utilizados en la fabricación de las mezclas fueron de naturaleza ofita para la fracción gruesa, piedra caliza como árido fino y filler calcáreo. La Tabla A.3 muestra la distribución de tamaños utilizada en la mezcla SMA.

ÁRIDO	FRACCIÓN (mm)	PORCENTAJE (%)
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	< 0,080	8,8

Tabla A.3. Áridos empleados en la mezcla.

- Mezclas: Se estudiaron nueve mezclas bituminosas diferentes: una mezcla de referencia que se trata de una mezcla SMA con caucho y dos mezclas SMA con caucho y con dos aditivos diferentes fabricadas a diferentes temperaturas. Todas ellas contienen 6,2 % de betún sobre los áridos. En la Tabla A.4 se presenta una lista de estas mezclas donde se incluye el nombre del ligante, así como el contenido de caucho (C), polímero (P) y aditivo de tipo tensoactivo (T) o de tipo organosilano (O) y las temperaturas seleccionadas para su fabricación.

NOMBRE DE LA MEZCLA	LIGANTE	TEMPERATURA DE FABRICACIÓN (°C)
SMA con caucho	B+10C+2,5P	165
SMA con caucho + T	B+10C+2,5P+T	165, 155, 145, 135
SMA con caucho + O	B+10C+2,5P+O	165, 155, 145, 135

Tabla A.4. Descripción de las mezclas estudiadas

A.4. MATERIALES

En la Tabla A.5 se recoge el plan de trabajo realizado durante esta investigación.

ETAPA DEL ESTUDIO	MEZCLAS	MÉTODO DE COMPACTACIÓN
1. Estudio de compactibilidad	SMA con caucho 165°C	Compactador de impacto Marshall (impacto)
2. Estudio de sensibilidad al agua	SMA con caucho + T 165°C SMA con caucho + T 155°C SMA con caucho + T 145°C SMA con caucho + T 135°C	
3. Estudio de resistencia a deformaciones plásticas	SMA con caucho + O 165°C SMA con caucho + O 155°C SMA con caucho + O 145°C SMA con caucho + O 135°C	Compactación giratoria

Tabla A.5. Plan de trabajo

A.5. RESULTADOS

A.5.1. Estudio de compactibilidad

A.5.1.1. Estudio de compactibilidad con compactador de impacto

En las figuras A.1 y A.2 se presentan los resultados de la compactibilidad con el compactador Marshall de las mezclas estudiadas. Se ha incluido un detalle aumentado de las curvas para que se puedan observar mejor y determinar la posible reducción de la temperatura de fabricación cuando se incorporan los aditivos. La temperatura de fabricación de cada una de las mezclas SMA con caucho y con aditivos corresponderá a la temperatura que logre una curva de densificación lo más cercana posible a la curva de densificación de la mezcla de referencia (SMA con caucho a 165°C).

Los resultados indican que a medida que se reduce la temperatura de fabricación, la densidad de las mezclas disminuye, por lo tanto, la temperatura de fabricación tiene una influencia evidente en la capacidad de compactación. Para las mezclas con el aditivo de tipo tensoactivo se puede observar en la Figura A.1 que la curva de la mezcla de referencia se coloca entre las mezclas producidas a 145°C y 155°C, por lo tanto, es posible una reducción de aproximadamente 15°C en las temperaturas de fabricación. Por otro lado, para las mezclas con organosilanos (Figura A.2) la posible reducción de la temperatura es de aproximadamente 10°C, ya que la curva de la mezcla de control (en negro) casi se solapa con la curva de la mezcla producida a 155°C (en amarillo).



Figura A.1.
Compactibilidad
de mezclas con
tensoactivo
compactadas por
impacto

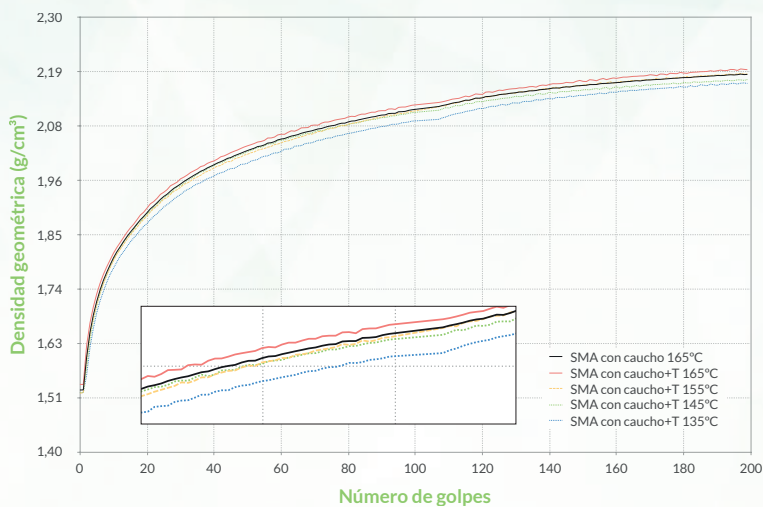
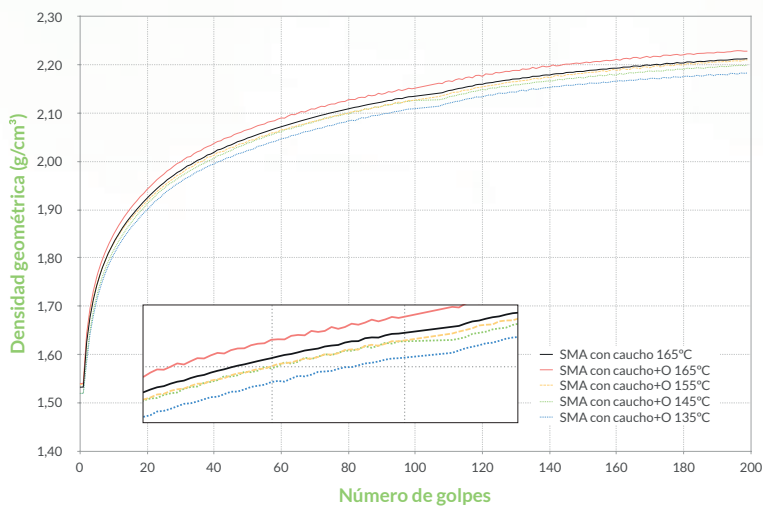


Figura A.2.
Compactibilidad
de mezclas con
organosilanos
compactadas por
impacto



A.5.1.2. Compactibilidad con compactador giratorio

De acuerdo con Lee et al. [3] el compactador de Marshall parece ser menos sensible a la reducción de temperatura que el compactador giratorio. Por lo tanto, se decidió repetir el estudio de compactibilidad con el compactador giratorio.

En las figuras A.3 y A.4 se presenta la capacidad de compactación con el compactador giratorio.

Se puede observar que la temperatura de fabricación tuvo una influencia significativa en la capacidad de compactación ya que cuando la temperatura de fabricación se reduce, la densidad de las mezclas también disminuye. Para las mezclas con el aditivo tipo tensoactivo la posible reducción de la temperatura de fabricación es de aproximadamente 20°C. Por otro lado, para las mezclas con organosilanos parece que no habría una posible reducción de la temperatura de compactación ya que la curva de la mezcla de referencia casi se solapaba con la curva de la mezcla con el aditivo fabricada a 165°C.

Figura A.3.
Compactibilidad de
mezclas con tensoactivo
compactadas con
compactador giratorio

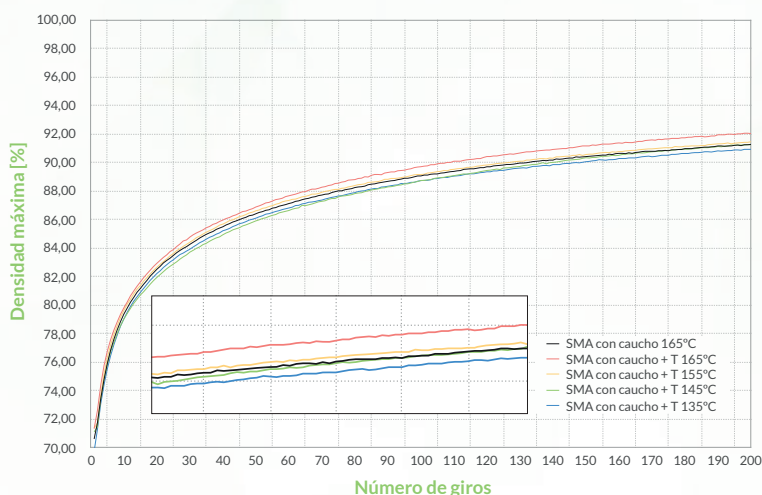
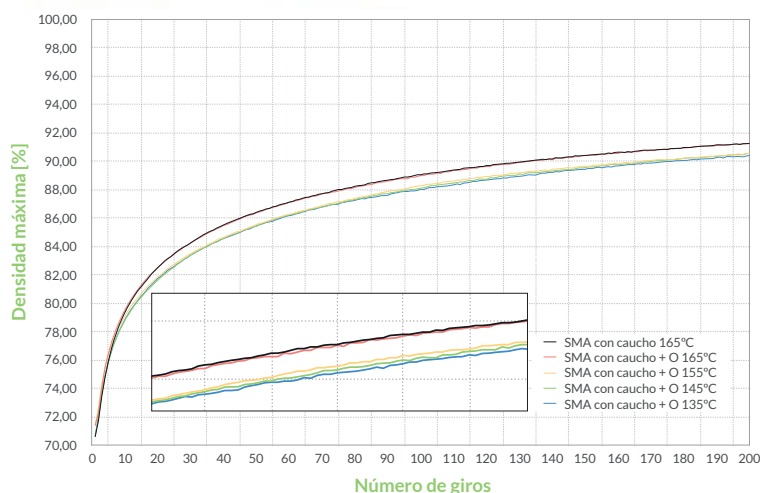


Figura A.4.
Compactibilidad de
mezclas con
organosilanos
compactadas con
compactador giratorio



A.5.2. Estudio de sensibilidad al agua

A.5.2.1. Estudio de sensibilidad al agua con probetas fabricadas con compactador por impacto

Los resultados de resistencia a tracción indirecta (ITS) y la relación de tensión a tracción indirecta (ITSR) de las probetas preparadas con el compactador Marshall se muestran en la Tabla A.6 y en la Figura A.5.

En la Figura A.5 se puede observar que cuando la temperatura de compactación de las mezclas estudiadas es la misma que la mezcla de control (165°C), el valor de ITSR es muy similar y superior al 90% requerido para capas superficiales. Sin embargo, a medida que disminuyen las temperaturas de compactación, los valores de ITSR empeoran. Incluso cuando solo se disminuyen 10°C, la resistencia conservada no cumplirá con el requisito del 90% para la sensibilidad al agua para una capa de rodadura [4].

MEZCLA	TEMPERATURA DE FABRICACIÓN (°C)	DENSIDAD APARENTE (g/cm³)	HUECOS (%)	ITS _d (MPa)	ITS _w (MPa)	ITSR (%)
SMA con caucho	165	2,295	5,13	2,129	1,975	92,8
SMA con caucho + T	165	2,307	4,63	1,858	1,687	90,8
	155	2,295	5,13	1,915	1,591	83,1
	145	2,280	5,75	1,785	1,396	78,2
	135	2,276	5,91	1,954	1,248	63,9
SMA con caucho + O	165	2,292	5,25	2,051	1,866	91,0
	155	2,279	5,79	1,833	1,558	85,0
	145	2,259	6,61	1,817	1,371	75,4
	135	2,248	7,07	1,799	1,187	66,0

ITS_w es la resistencia media a la tracción indirecta del grupo de probetas en húmedo

ITS_d es la resistencia media a la tracción indirecta del grupo de probetas en seco

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

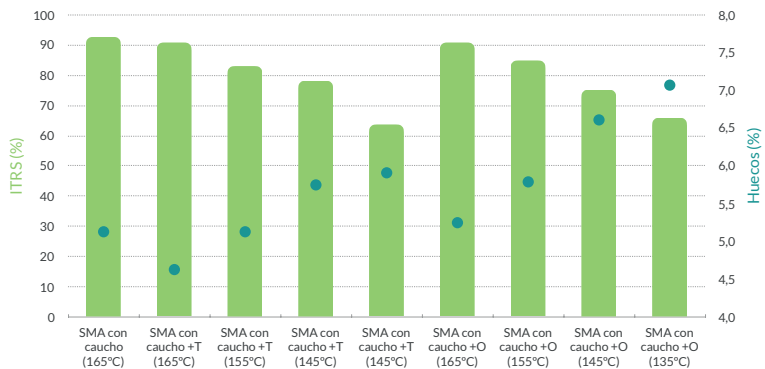


Figura A.5. Resultados de ITSR para probetas preparadas con compactador Marshall

Este empeoramiento de la sensibilidad al agua puede estar relacionado con el aumento del contenido de huecos en la mezcla, como se muestra en la Tabla A.5. La falta de eficiencia de los aditivos de mezclas semicalientes con el compactador Marshall da como resultado contenidos de huecos que hacen que las mezclas sean más vulnerables al ataque del agua.

A.5.2.2. Sensibilidad al agua con probetas fabricadas con compactador giratorio

Como la sensibilidad al agua de las probetas fabricadas por el compactador Marshall no mostró los resultados esperados, se decidió

utilizar el compactador giratorio. Vega-Zaramillo et al. [5] y Taredfer et al. [6] han recomendado el uso del compactador giratorio para mezclas con caucho.

Los resultados de ITS de las probetas preparadas con 120 giros con el compactador giratorio se muestran en la Tabla A.7 y en la Figura A.6. Este nivel de compactación se seleccionó para lograr un contenido de huecos en la mezcla de referencia SMA con caucho (5,07 g/cm³, Tabla A.7) similar a la alcanzada por 50 golpes/cara con el compactador Marshall (5,13 g/cm³, Tabla A.6) en ambos casos a una temperatura de fabricación de 165°C.

MEZCLA	TEMPERATURA DE FABRICACIÓN (°C)	DENSIDAD APARENTE (g/cm³)	HUECOS (%)	ITS _c (MPa)	ITS _w (MPa)	ITSR (%)
SMA con caucho	165	2,296	5,07	2,082	2,040	98,0
SMA con caucho + T	165	2,306	4,67	1,962	1,923	98,0
	155	2,300	4,92	1,845	1,826	99,9
	145	2,291	5,29	1,886	1,843	97,7
	135	2,289	5,37	1,819	1,692	93,0
SMA con caucho + O	165	2,293	5,21	2,101	2,059	98,0
	155	2,283	5,62	1,961	1,941	98,9
	145	2,270	6,16	1,917	1,907	99,5
	135	2,256	6,74	1,809	1,737	96,0

Tabla A.7. Resultados de la sensibilidad al agua para las mezclas preparadas con el compactador giratorio



Cuando los aditivos se incorporan a las mezclas producidas a 165°C, que es la temperatura de fabricación de la mezcla de referencia, presentan valores de ITSR similares a los de la mezcla de referencia como se muestra en la Figura A.6. Incluso a temperaturas más bajas (155°C) los

valores de ITSR son similares en comparación con la mezcla de control y siempre están por encima del 90 % requerido para las capas de superficie según el PG-3 en el borrador de especificaciones españolas para mezclas SMA [4].



Figura A.6.
Resultados de ITSR
para probetas
preparadas con
compactador giratorio

Con respecto al contenido de huecos (Figura A.6), para las muestras con tensoactivo, el aumento en el contenido de huecos no se nota cuando la temperatura disminuye. Por otro lado, en el caso del aditivo de tipo organosilano, el aumento en el contenido de huecos es más evidente al disminuir la temperatura de fabricación. Sin embargo, los valores de ITSR parecen no verse afectados, probablemente debido a las buenas propiedades anti-stripping del organosilano según los trabajos de Arabani et al. [7] y Khedmati et al. [2]. Por lo tanto, en términos de resistencia al ataque por agua, la temperatura de fabricación puede reducirse en 30°C en el caso del tensoactivo y en 30°C al añadir el organosilano.

A partir de estos resultados, es evidente que no solo la tecnología de mezclas semicalientes afecta la sensibilidad al agua de las mezclas, como indican Xu et al [8], sino también el método para compactar la mezcla.

Probablemente, esta resistencia mejorada al agua de las mezclas compactadas con el compactador giratorio se puede extender a las mezclas calientes convencionales, según lo informado por Tarefder et al. [6], esto es, para mezclas sin caucho ni aditivos de mezclas semicalientes.

A.5.3. Estudio de resistencia a deformaciones plásticas

La Tabla A.8 muestra la densidad y el contenido de huecos de las muestras preparadas para el ensayo de pista. Todas las mezclas en estudio se compactaron al 98% de la densidad aparente de

las muestras Marshall con 50 golpes por cara. Las figuras A.7 y A.8 presentan la profundidad de la rodera en aire RD (mm) con el número de ciclos de carga a 60°C para la mezcla de referencia SMA con caucho y las mezclas SMA con caucho y con los aditivos.

MEZCLA	TEMPERATURA DE FABRICACIÓN (°C)	DENSIDAD APARENTE (g/cm³)	HUECOS (%)
SMA con caucho	165	2,250	6,99
SMA con caucho + T	165	2,260	6,57
	155	2,249	7,03
	145	2,245	7,19
	135	2,243	7,28
SMA con caucho + O	165	2,247	7,11
	155	2,237	7,52
	145	2,225	8,02
	135	2,211	8,60

Tabla A.8. Densidad aparente y contenido de huecos de las mezclas

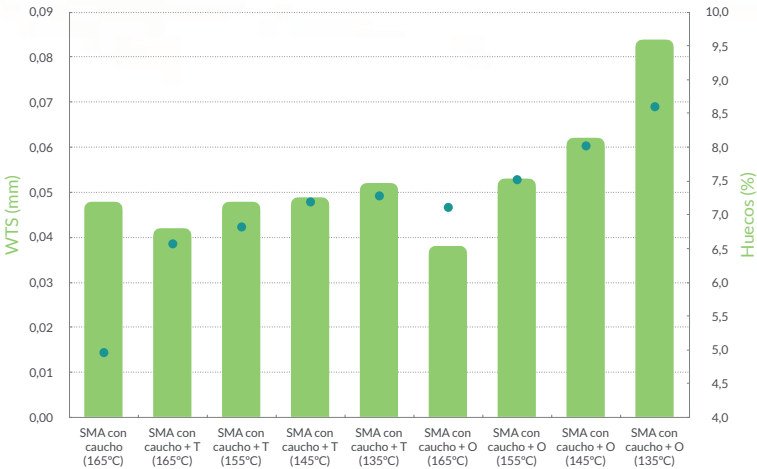


Figura A.7. Resultados de la pendiente media de deformación en pista (WTS)

En la Figura A.7 se puede observar que en el caso de las mezclas SMA con caucho y tensoactivo, cuando la temperatura de fabricación disminuye, se observa una pequeña variación en el contenido de huecos y, en correspondencia con ello, se observa una tendencia menor a la deformación permanente. Por el contrario, la reducción de las temperaturas de las mezclas con el aditivo de tipo organosilano produce mayores deformaciones permanentes. Esto podría deberse a la densidad de la mezcla que se reduce apreciablemente aumentando el contenido de huecos (Tabla A.8) al disminuir las temperaturas de fabricación. Este efecto está en línea con las curvas de compactibilidad utilizando el compactador giratorio (Figura A.3 y Figura A.4) que mostraron que este aditivo no permite reducir la temperatura de fabricación en términos de densificación.

Como conclusión, se puede afirmar que en términos de resistencia a la deformación permanente, los aditivos no mejoran significativamente la

resistencia de la mezcla de referencia, pero todos ellos cumplen con el valor máximo permitido establecido para WTS que es de $0,07 \times 10^{-3}$ mm/1.000 ciclos, excepto la mezcla SMA con caucho y el aditivo de tipo organosilano (135°C) que está fuera de especificaciones. Esto significa que, en términos de resistencia a las deformaciones permanentes, el tensoactivo permite reducir la temperatura de fabricación en 30°C y en el caso del tipo de organosilano en 20°C.

A.5.4. Reducción alcanzable de la temperatura de fabricación

De acuerdo con los resultados de las secciones anteriores, sería posible reducir las temperaturas de fabricación de una mezcla SMA con polvo de caucho gracias al uso de aditivos de mezclas semicalientes. Sin embargo, la reducción depende de la propiedad analizada y del método de compactación. La Tabla A.9 resume los resultados obtenidos.

	REDUCCIÓN DE LA TEMPERATURA			
	MARSHALL		GIRATORIA	
	TENSOACTIVO	ORGANOSILANO	TENSOACTIVO	ORGANOSILANO
Compactibilidad	15°C	10°C	20°C	0
Sensibilidad al agua	0	0	30°C	30°C

Tabla A.9. Reducción en la temperatura de fabricación dependiendo del método de compactación

En términos de resistencia a las roderas, la reducción permitida de la temperatura de fabricación es de 30°C cuando se utiliza tensoactivo y 20°C para el caso del organosilano.

A.6. CONCLUSIONES

Este estudio evaluó los efectos de dos aditivos químicos para mezclas semicalientes (tensoactivo y organosilano) sobre el rendimiento mecánico de una mezcla SMA con caucho. Los ensayos realizados fueron: (i) compactibilidad, que se evaluó mediante dos procedimientos diferentes (compactación por impacto y compactación giratoria), (ii) sensibilidad al agua y (iii) ensayo de pista para evaluar la resistencia a las deformaciones permanentes.

De los resultados de las pruebas realizadas se extrajeron las siguientes conclusiones:

- Dependiendo del procedimiento utilizado, compactación por impacto o giratoria, para realizar las pruebas de compactibilidad se obtuvieron diferentes resultados. Parece que la compactación giratoria logra mejores resultados en comparación con el procedimiento Marshall. Con el compactador Marshall se consiguen reducciones de temperatura de hasta 15°C agregando el tensoactivo y de 10°C añadiendo el organosilano. Análogamente, con un compactador giratorio se puede reducir la temperatura 20°C en el caso del tensoactivo y sin reducción para el caso del organosilano.

- Con respecto a la sensibilidad al agua, cuando las muestras para ambos aditivos se prepararon con el compactador Marshall, la relación de tensión de tracción indirecta (ITSR) no cumplió con los requisitos de sensibilidad al agua (90%), excepto para las mezclas fabricadas a 165°C (la misma temperatura de fabricación que la mezcla de referencia). Sin embargo, cuando las muestras se prepararon con el compactador giratorio, se mejoraron los valores de ITSR para ambos aditivos alcanzando el 90% requerido, por lo tanto, parece que utilizar el compactador giratorio es la manera de lograr mejores resultados con respecto a la sensibilidad al agua para este tipo de mezclas.
- Respecto a la resistencia a la deformación permanente, ninguno de los aditivos estudiados mejorará significativamente la resistencia a la formación de roderas en comparación con la mezcla de control. Pero en todos los casos, a excepción de la mezcla SMA con caucho y tensoactivo a 135°C, los valores de WTS se mantuvieron por debajo del límite de $0,07 \times 10^{-3}$ mm/10.000 ciclos establecido en las especificaciones técnicas.
- Finalmente, el estudio sugiere que para las mezclas SMA estudiadas, la compactación giratoria sería más apropiada. El aditivo de tipo tensoactivo es el que permite una disminución significativa de la temperatura de compactación, sin comprometer la sensibilidad al agua ni la resistencia a la deformación permanente. Por otro lado, el organosilano no parece ser capaz de reducir significativamente la temperatura de compactación y, en cambio, es un excelente aditivo anti-stripping en la sensibilidad al agua.



“El aditivo de tipo tensoactivo es el que permite una disminución significativa de la temperatura de compactación”

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] 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, *Construction and Building Materials*, vol. 121, pp. 727-732 (2016). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.028>.
- [2] Khedmati, M., Khodaii, A., Haghshenas, H. F. A study on moisture susceptibility of stone matrix warm mix asphalt, *Construction and Building Materials*, vol. 144, pp. 42-49 (2017). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.121>.
- [3] 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, *Construction and Building Materials*, vol. 22, (6), pp. 1122-1128, (2008). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.003>.
- [4] Mezclas bituminosas en caliente tipo SMA (Propuesta de Normativa), *Propuesta de pliego de prescripciones técnicas de las mezclas bituminosas tipo SMA*, CEDEX / Ministerio de Fomento (2016). Disponible en: <https://docplayer.es/13657726-Mezclas-bituminosas-en-caliente-tipo-sma-propuesta-de-normativa.html>.
- [5] Vega-Zamanillo, A., Calzada-Pérez, M. A., Sánchez-Alonso, E., Gonzalo-Orden, H. Density, Adhesion and Stiffness of Warm Mix Asphalts, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 160, pp. 323-331 (2014). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.12.144>.
- [6] Tarefder, R. A., Ahmad, M. Effect of compaction procedure on air void structure of asphalt concrete, *Measurement*, vol. 90, pp. 151-157 (2016). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.04.054>.
- [7] Arabani, M., Roshani, H., Hamed Gh. H. Estimating Moisture Sensitivity of Warm Mix Asphalt Modified with Zycosoil as an Antistrip Agent Using Surface Free Energy Method, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 24 (7), pp. 889-897 (2012). Disponible en: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000455](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000455).
- [8] Xu, S., Xiao, F., Amirkhanian, S., Singh, D. Moisture characteristics of mixtures with warm mix asphalt technologies – A review, *Construction and Building Materials*, vol. 142, pp. 148-161 (2017). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.069>.



CASO PRÁCTICO B

MEZCLA AC16 S CON CAUCHO Y ADITIVO QUÍMICO DE ORIGEN VEGETAL

B.1. INTRODUCCIÓN

La mezcla AC16 S se trata de una de las más utilizadas en España. En este caso práctico se estudia el comportamiento de una mezcla semicaliente AC16S con caucho procedente del NFVU fabricada por vía húmeda y vía seca.

Los trabajos que a continuación se exponen se llevaron a cabo en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid.

B.2. OBJETIVO

El objetivo de esta investigación es evaluar el comportamiento de dos mezclas semicalientes AC16S con caucho fabricadas por vía húmeda y vía seca, en comparación con la mezcla de referencia fabricada a la temperatura convencional en cada caso.

ADITIVO	DESCRIPCIÓN	DOSIFICACIÓN
Tensoactivo	Líquido vegetal con propiedades surfactantes que permiten reducir las temperaturas de fabricación, termo resistente y estable en el almacenamiento y que mejora la adhesividad entre el árido y el ligante	0,5% en peso sobre ligante

Tabla B.1. Descripción y dosificación del aditivo empleado

B.3. MATERIALES

- Betún mejorado con caucho: En este estudio se fabricó un betún mejorado con polvo de NFVU (BC 35/50) a partir de un betún de penetración 50/70. El contenido de polvo de caucho (tamaño ^{partícula} < 0,6 mm) fue de un 10% en peso sobre el betún base.
- Aditivos: se utilizó un tipo de aditivo químico con las características que se presentan en la Tabla B.1.
- Preparación del ligante: Para fabricar los ligantes en laboratorio se calentó el betún base a 140°C. A continuación, se añadió el aditivo (tensoactivo) y se mezcló durante 15 minutos a 900 rpm. Seguidamente, se

aumentó la temperatura hasta 185°C y se incorporó el polvo de caucho agitando la mezcla durante 45 minutos a 4.000 rpm. En las mezclas fabricadas por vía seca, se utilizó como ligante un betún 35/50 con el 0,5% del aditivo. En este caso, se incorporó un 1% de polvo de caucho en el momento de fabricar la mezcla, prolongando unos segundos la envuelta para asegurar su homogénea distribución en la masa de áridos y betún.

- Áridos: Los áridos utilizados en la fabricación de las mezclas fueron para el árido grueso un material porfídico y como arena, por debajo de 2 mm de tamaño, una arena caliza. El polvo mineral de aportación estaba constituido por carbonato cálcico. La distribución de tamaños se muestra en la Tabla B.2.

TAMIZ (mm)	22	16	8	4	2	0,5	0,25	0,063
% QUE PASA	100,0	100,0	6,0	43,0	32,0	17,0	12,1	5,2

Tabla B.2. Granulometría de los áridos

- Mezcla: Se estudiaron ocho mezclas bituminosas diferentes. Por un lado, una mezcla de referencia que se trata de una mezcla AC16S con caucho por vía húmeda y tres mezclas AC16S con caucho y con aditivo fabricadas a diferentes temperaturas. Por otro lado, se fabricó otra mezcla de referencia AC16S por vía seca y tres mezclas AC16S con caucho y con aditivo (tensoactivo)

fabricadas a diferentes temperaturas. Todas ellas contienen 5,0 % de betún sobre los áridos. En la Tabla B.3 se presenta una lista de estas mezclas donde se incluye el nombre del ligante, así como el contenido de caucho y de aditivo de mezcla semicaliente (T) y las temperaturas seleccionadas para su fabricación.

NOMBRE DE LA MEZCLA	LIGANTE	TEMPERATURA DE FABRICACIÓN (°C)
AC16S con caucho por vía húmeda	B50/70 + 10C	165
AC16S con caucho por vía húmeda +T	B50/70 + 10C +T	165, 145, 125
AC16S con caucho por vía seca	B50/70 + 1C	170
AC16S con caucho por vía seca +T	B50/70 + 1C +T	170, 150, 130

Tabla B.3. Descripción de las mezclas estudiadas

B.4. PLAN DE TRABAJO

En la Tabla B.4 se recoge el plan de trabajo realizado durante esta investigación:

ETAPA DEL ESTUDIO	MEZCLAS	ENSAYOS
1. Estudio de la mezcla con caucho por vía húmeda	AC16S con caucho 165°C AC16S con caucho + T 165°C AC16S con caucho + T 145°C AC16S con caucho + T 125°C	Energía de compactación Compactibilidad
2. Estudio de mezclas con caucho por vía seca	AC16S con caucho 170°C AC16S con caucho + T 170°C AC16S con caucho + T 150°C AC16S con caucho + T 130°C	Sensibilidad al agua Resistencia a las deformaciones plásticas

Tabla B.4. Plan de trabajo

B.5. RESULTADOS

B.5.1. Estudio de la mezcla con caucho por la vía húmeda

Los siguientes apartados presentan los ensayos realizados para mezclas con caucho incorporado por la vía húmeda.

B.5.1.1. Energía de compactación

En este estudio, la mayor parte del trabajo se llevó a cabo en probetas cilíndricas fabricadas con el compactador giratorio (EN 12697-31). Sin

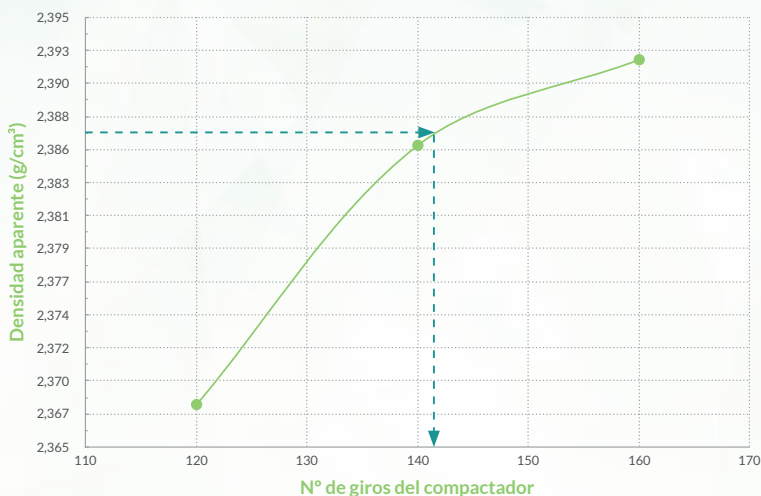
embargo, las regulaciones españolas contienen especificaciones para probetas fabricadas con el compactador Marshall (EN 12697-30), que indican que para una mezcla AC16S la energía de compactación debe ser de 75 golpes por cara (Artículo 542 del PG-3).

Por lo tanto, primero fue necesario establecer el número de giros que deben aplicarse en el compactador giratorio para alcanzar una densidad similar en comparación con la obtenida mediante el uso del compactador Marshall con

75 golpes por cara. Para ello, se compactaron tres muestras por cada punto de estudio con diferente número de giros: 120, 140 y 160. La Figura B.1 presenta los resultados de la densidad aparente (SSD, superficie saturada) para cada número de

giros. Se observó que la densidad aparente de $2,387 \text{ g/cm}^3$ (que corresponde a 75 golpes por cara) se alcanza aproximadamente a los 140 giros. Por lo tanto, este número de giros se seleccionó como referencia para las mezclas por vía húmeda.

Figura B.1.
Evolución de la
densidad aparente
(SSD) con el n° de giros
(vía húmeda)

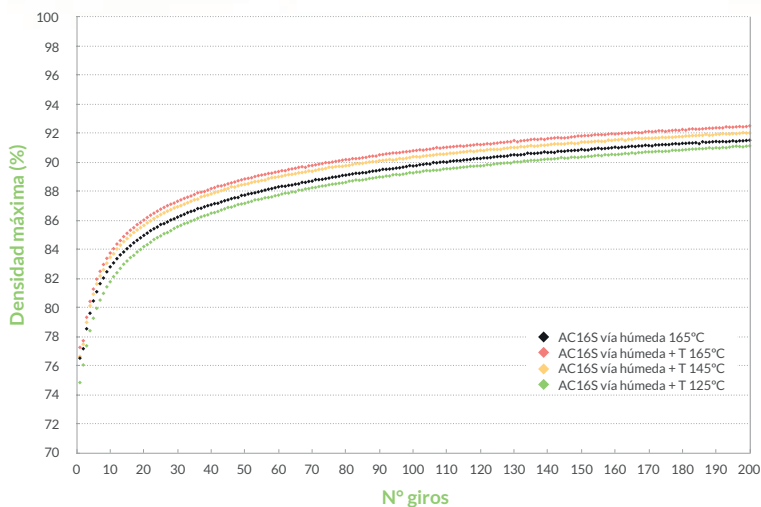


B.5.1.2. Compactibilidad

Asimismo, se llevó a cabo un estudio de compactibilidad utilizando el compactador giratorio a diferentes temperaturas de fabricación para determinar si el aditivo de mezclas

semicalientes permitía mantener los mismos niveles de densificación a pesar de la reducción en las temperaturas de fabricación. La Figura B.2 presenta estos resultados.

Figura B.2.
Compactibilidad
(vía húmeda)



Como se puede observar, las mezclas con el aditivo fabricadas a 165°C y a 145°C se encuentran por encima de la mezcla sin aditivo fabricada a 165°C. Esto significa que el aditivo de mezclas semicalientes facilita la densificación de la mezcla con suficiente eficiencia para que la temperatura de fabricación pueda reducirse en torno a 20°C. Sin embargo, la mezcla con aditivo fabricado a 125°C cae por debajo de la mezcla de referencia, lo que indica una menor densificación. En resumen, en términos de compactibilidad y propiedades volumétricas de mezclas bituminosas por la vía húmeda, los resultados obtenidos parecen indicar que el aditivo permite reducir la temperatura de fabricación en aproximadamente 20°C.

B.5.1.3. Sensibilidad al agua

La sensibilidad al agua de las mezclas se evaluó mediante la prueba de tracción indirecta, antes y después de la inmersión. En primer lugar, es necesario determinar la energía de compactación que se aplicará a las muestras para esta prueba. Cuando las muestras se fabrican con 75 golpes/cara con el compactador Marshall, se establece que las muestras de sensibilidad al agua se compactan con 50 golpes/cara. La intención de reducir la energía de compactación es, sin duda,

someter a las probetas a condiciones más críticas: la densidad disminuye, el contenido de huecos aumenta y la mezcla es, en última instancia, más vulnerable a la acción del agua.

Sin embargo, cuando la compactación se realiza con un compactador giratorio, no hay suficiente experiencia en este momento para establecer la magnitud de la caída de energía que se debe aplicar. Dado que en las capas de rodadura con mezclas de tipo AC se admite que la compactación alcance el 98% de la referencia (75 golpes/cara), en esta investigación se redujo el número de giros de modo que para la mezcla de referencia la densidad cayera alrededor del 1-2%. En este caso particular, se redujo de los 140 giros establecidos como estándar a 100 giros. Así, la mezcla de referencia (sin aditivo y fabricada a 165°C) bajó de una densidad de 2,387 g/cm³ a una de 2,344 g/cm³, lo que significa una disminución en la densidad del 1,8%.

Los resultados de resistencia a tracción indirecta (ITS) y la relación de tensión a tracción indirecta (ITSR) se presentan en la Tabla B.5 y en la Figura B.3.

MEZCLAS FABRICADAS POR VÍA HÚMEDA	TEMPERATURA DE FABRICACIÓN (°C)	TEMPERATURA COMPACTACIÓN (°C)	CONDICIÓN	DENSIDAD APARENTE (g/cm ³)	HUECOS (%)	ITS (MPa)	ITSR (%)
AC16S con caucho 165°C	165	155	Seca	2,341	6,32	2,13	91
			Húmeda	2,346	6,12	1,94	
AC16S con caucho + T 165°C	165	155	Seca	2,349	6,00	2,12	93
			Húmeda	2,350	5,96	1,97	
AC16S con caucho + T 145°C	145	135	Seca	2,349	6,00	1,86	87
			Húmeda	2,343	6,24	1,62	
AC16S con caucho + T 125°C	125	115	Seca	2,327	6,88	1,71	70
			Húmeda	2,321	7,12	1,20	

Tabla B.5. Sensibilidad al agua (vía húmeda)

Se observa que la presencia del aditivo (T) no marca diferencias cuando la temperatura es todavía de 165°C. Sin embargo, al reducir las temperaturas, el ataque del agua es más efectivo a pesar del hecho de que el aumento en el contenido de huecos no es superior al 1%. Por lo tanto, el aditivo permite la reducción de la temperatura en términos de densificación pero la adhesividad entre el ligantes y los áridos pierde calidad, como puede verse por la reducción del parámetro ITSR mientras se reduce la temperatura de fabricación.

Es habitual exigir un $ITSR \geq 85\%$ para capa de rodadura y un $ITSR \geq 80\%$ para capa intermedia. Por lo tanto, parece que no es aconsejable reducir la temperatura de fabricación por debajo de los 145 °C para las capas de rodadura. En el caso de las capas intermedias, aunque no se ha cuantificado, teniendo en cuenta el margen que hay, la temperatura de fabricación permitiría llegar a 140°C (Figura B.3).

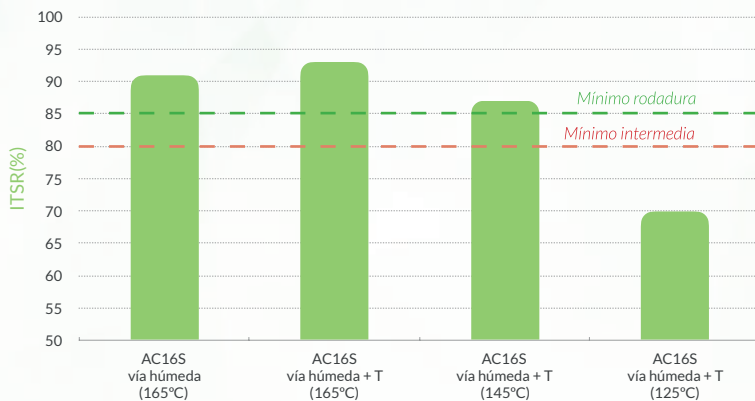


Figura B.3.
Sensibilidad al agua
(vía húmeda)

B.5.1.4. Resistencia a las deformaciones plásticas

Con respecto a la resistencia a las deformaciones plásticas, la incorporación del aditivo a 165°C no parece introducir diferencias notables. Sin embargo, a medida que la temperatura de fabricación disminuye, la mezcla bituminosa es más propensa a las deformaciones plásticas. Se puede observar que la mezcla fabricada a 125°C

(Figura B.4) ya supera el máximo de $WTS_{aire} = 0,07$ mm/1.000 ciclos permitido para una mezcla AC16S sometido al ensayo de rodadura (EN 12697-22) según las especificaciones españolas. Por lo tanto, no sería razonable reducir la temperatura de fabricación por debajo de 135°C; de lo contrario, la mezcla podría sufrir deformaciones permanentes.

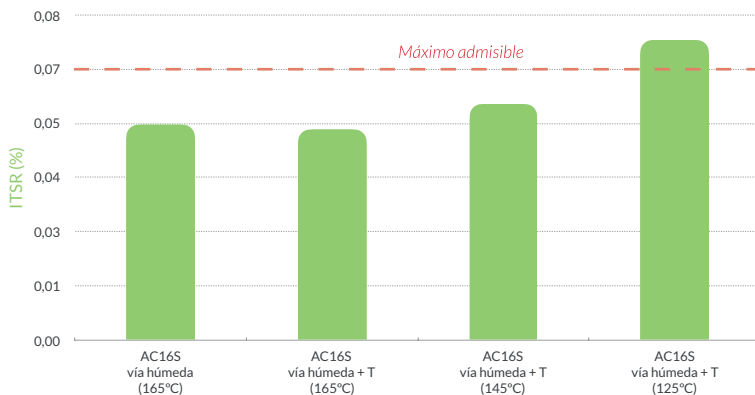


Figura B.4.
Resistencia a las
deformaciones plásticas
(vía húmeda)

Probablemente, este resultado puede referirse a la disminución de la densidad (Tabla B.5) cuando se trabaja a 125°C. Este déficit de densidad hace que las mezclas sean más propensas a ser post-compactadas, lo que resulta en un ahuellamiento más profundo durante el ensayo.

B.5.2. Estudio de la mezcla con caucho por la vía seca

En los siguientes apartados se presentan los ensayos realizados para mezclas con caucho incorporado por la vía seca.

B.5.2.1. Energía de compactación

Como se explicó anteriormente, fue necesario establecer el número de giros que deben aplicarse en el compactador giratorio para alcanzar una densidad similar a la de Marshall con 75 golpes por cara. La Figura B.5 muestra la densidad aparente (SSD) ofrecida por las probetas para los giros indicados. Se observa que la densidad aparente de 2,375 g/cm³ (correspondiente a 75 golpes/cara) se alcanza aproximadamente con 120 giros. Por lo tanto, este número de giros se seleccionó como referencia para la compactación de mezclas con caucho por vía seca.

Figura B.5.
Evolución de la densidad aparente (SSD) con el n° de giros (vía seca)

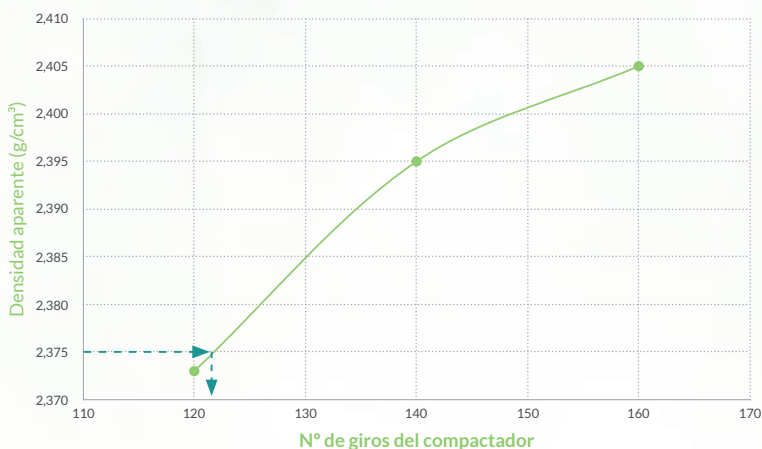
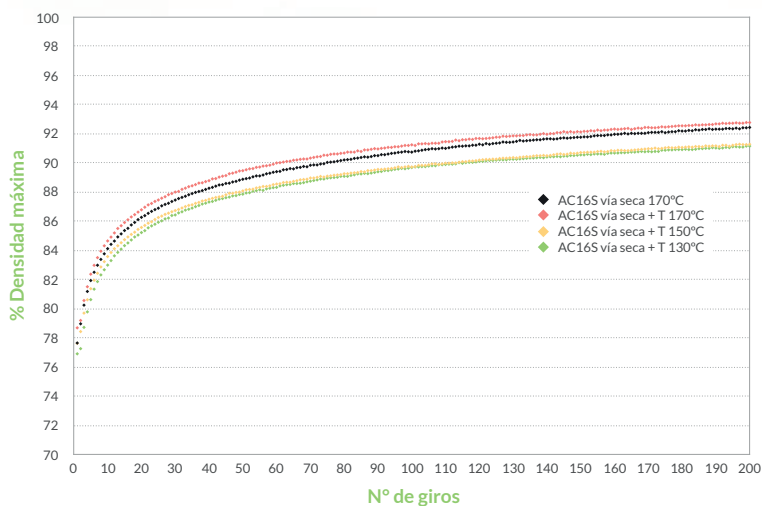


Figura B.6.
Compactibilidad (vía seca)



B.5.2.2. Compactibilidad

Se realizó un estudio de compactibilidad empleando el compactador giratorio. Se estudió la mezcla de referencia (sin aditivo y fabricada a 170°C), así como las mezclas con el aditivo para mezclas semicalientes (T) fabricadas a temperaturas de 170, 150 y 130°C (Figura B.6).

Los resultados obtenidos no indicaron una tendencia clara, pero parece que la reducción de la temperatura da como resultado densidades más bajas en comparación con la mezcla de referencia. Tal como se muestra en la Figura B.6 la mezcla de referencia solo es superada por la mezcla con aditivo a 170°C. Sin embargo, al disminuir la temperatura de fabricación a 150°C y 130°C, las curvas de densificación descendieron y mostraron un proceso de compactación ineficiente.

Estos resultados podrían deberse al hecho de que en el proceso de vía seca, las partículas de caucho deben ser digeridas en la mezcla bituminosa. Teniendo en cuenta que la digestión es un fenómeno que requiere altas temperaturas, por encima de 160°C [1], las mezclas fabricadas por esta vía a 150°C y 130°C no han digerido suficientemente las partículas de caucho, por lo que permanecen en una condición elástica, lo que dificulta la compactación y la densificación de las mezclas bituminosas.

B.5.2.3. Sensibilidad al agua

Las condiciones de ensayo fueron las mismas que para las mezclas fabricadas por vía húmeda, salvo en las condiciones de compactación de las probetas que fueron diferentes. En este caso, la referencia de la energía de compactación fue de 120 giros en el compactador giratorio (EN 12697-31), obteniéndose una densidad de 2,375 g/cm³. Siguiendo el mismo criterio anteriormente descrito en el apartado de la vía húmeda, para alcanzar una densidad del 98%, fue necesaria una energía de compactación de 90 giros obteniéndose una densidad aparente de 2,340 g/cm³, que es un 98,5% de la referencia, y por lo tanto, cumple con la densidad propuesta. Así todas las muestras de sensibilidad al agua se compactaron con 90 giros en el compactador giratorio. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla B.6.

Los resultados muestran que, en términos de resistencia a la acción del agua, no es posible reducir las temperaturas de fabricación (Figura B.7), a pesar de la incorporación del aditivo de mezclas semicalientes. Incluso para una temperatura de 150°C, la resistencia conservada está lejos del 80% que generalmente se exige para una capa intermedia y también del 85% requerido para una capa de rodadura [2].

MEZCLAS FABRICADAS POR VÍA SECA	TEMPERATURA DE FABRICACIÓN (°C)	TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN (°C)	CONDICIÓN	DENSIDAD APARENTE (g/cm ³)	HUECOS (%)	ITS (MPa)	ITSR (%)
AC16S con caucho 170°C	170	160	Seca	2,338	6,37	1,72	88
			Húmeda	2,342	6,21	1,51	
AC16S con caucho + T 170°C	170	160	Seca	2,348	5,97	1,67	91
			Húmeda	2,349	5,93	1,52	
AC16S con caucho + T 150°C	150	140	Seca	2,323	6,97	1,49	61
			Húmeda	2,319	7,13	0,91	
AC16S con caucho + T 130°C	130	120	Seca	2,313	7,37	1,11	55
			Húmeda	2,320	7,09	0,61	

Tabla B.6. Sensibilidad al agua (vía seca)

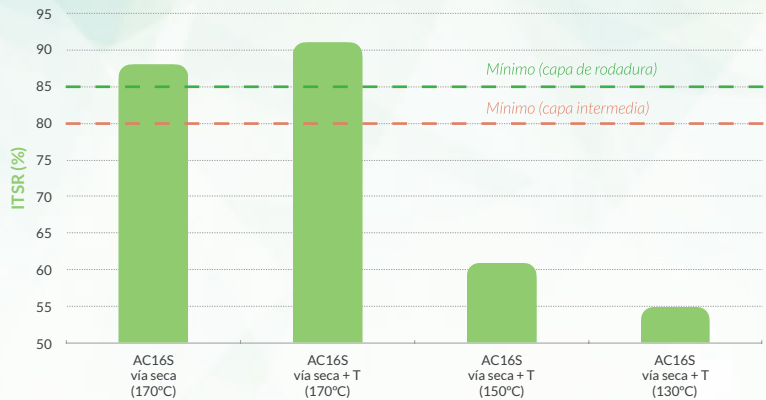


Figura B.7.
Sensibilidad al agua
(vía seca)

Este resultado puede atribuirse a la falta de digestión de las partículas de caucho debido a la necesidad de temperaturas más altas para el proceso seco [1, 2]. En resumen, el aditivo para mezclas semicalientes seleccionado, que puede tener otros efectos, no promueve la digestión de las partículas de caucho, que permanecen en un estado elástico entre los áridos de la mezcla. Por esta razón, la compactación es difícil y la interfaz de caucho y betún no alcanza la afinidad suficiente, por lo que es vulnerable al ataque por agua.

Aunque no se ha mencionado hasta ahora, se debe decir que de acuerdo con el protocolo de compactación en un compactador giratorio (EN 12697-31), la mezcla bituminosa debe permanecer en un horno a la temperatura de compactación durante 2 horas dentro del molde. En resumen, todas las mezclas en estudio, incluidas las que incorporan caucho por la vía seca, han tenido dos horas de digestión en el horno [3] que, sin embargo, no ha solucionado el problema de compactibilidad y sensibilidad al agua. Por lo tanto, no parece que el problema se pueda resolver aumentando el tiempo de digestión si las temperaturas de fabricación tampoco aumentan (lo que es contrario a los objetivos de esta investigación). La viabilidad de usar mezclas semicalientes con caucho incorporado mediante la vía seca, al menos con el aditivo seleccionado para este estudio, no parece estar garantizada por los resultados de esta investigación y se necesitaría una investigación adicional.

Para superar esta situación, solo se pueden sugerir tres alternativas: (i) utilizar un tamaño de partículas de caucho más fino, según lo informado por Da Silva et al. [4]; (ii) la selección de un caucho pretratado para facilitar la digestión [5]; o (iii) la reducción del contenido de caucho, que es del 1% en peso de la mezcla. Estas soluciones reducen el tiempo de digestión y probablemente hacen que sea posible reducir las temperaturas de trabajo.

B.5.2.4. Resistencia a las deformaciones permanentes

En cuanto a la resistencia a las deformaciones plásticas (Figura B.8), no se observan cambios significativos en las mezclas con el aditivo al disminuir la temperatura de fabricación, ya que para todas las temperaturas los valores obtenidos están por debajo de $WTS_{aire} = 0,07 \text{ mm}/1.000 \text{ ciclos}$, que es el máximo permitido para este tipo de mezclas bituminosas según las especificaciones españolas [2]. Sería viable reducir las temperaturas de fabricación, aunque esta hipótesis ya se ha descartado por razones de compactibilidad y la vulnerabilidad al ataque del agua.

Figura B.8.
Resistencia a las
deformaciones
permanentes (vía seca)



B.6. CONCLUSIONES

Las siguientes conclusiones pueden extraerse de la investigación realizada:

- La incorporación del aditivo de tipo tensoactivo utilizado en este estudio (dosificación del 0,5% sobre el peso del betún base) permite reducir 20°C la temperatura de fabricación de las mezclas con caucho incorporado por la vía húmeda.
- Sin embargo, el uso del aditivo utilizado en este estudio no es efectivo en el caso de mezclas con caucho incorporado por vía seca. Cuando la temperatura se reduce por debajo de la temperatura de referencia, la compactación es deficiente como se muestra en las curvas de compactabilidad, y el contacto entre el caucho y el betún se

debilita claramente, como lo demuestra el empeoramiento de la sensibilidad al agua. Estos resultados pueden estar relacionados con una digestión insuficiente de las partículas de caucho en la mezcla bituminosa debido a la disminución de las temperaturas de trabajo.

La conclusión sobre la falta de viabilidad técnica de las mezclas semicalientes con caucho incorporado por la vía seca y la interpretación referida a la falta de digestión de las partículas de caucho debido a las bajas temperaturas de trabajo es un hallazgo que obliga a buscar nuevas soluciones. Entre ellos, el uso de catalizadores de la digestión, pretratados fáciles de digerir caucho, o simplemente granulometrías de caucho más finas que puedan permitir superar el problema presentado en esta investigación para la vía seca.

“Es necesario seguir investigando para resolver la fabricación de mezclas semicalientes con caucho por vía seca”

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Shen, J., Li, B., Xie, Z. Interaction between crumb rubber modifier (CRM) and asphalt binder in dry process, *Construction and Building Materials*, vol. 149, pp. 202-206 (2017). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.191>

[2] Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), Ministerio de Fomento (2015). Disponible en: <https://www.fomento.gob.es/MFOM.CP.Web/handlers/pdfhandler.ashx?idpub=ICW020>

[3] Gallego, J. Mezclas bituminosas modificadas por adición de polvo de neumáticos, Cuadernos de Investigación CEDEX / Ministerio de Fomento (Madrid), ISBN 978-8477903635 (2001).

[4] Subhy, A., Lo Presti, D., Airey, G. An investigation on using pre-treated tyre rubber as a replacement of synthetic polymers for bitumen modification, *Road Materials and Pavement Design*, vol. 16, pp. 245-264 (2015). Disponible en: <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1030826>

[5] Da Silva, L., Benta, A., Picado-Santos, L. Asphalt rubber concrete fabricated by the dry process: Laboratory assessment of resistance against reflection cracking, *Construction and Building Materials*, vol. 160, pp. 539-550 (2018). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.081>



CASO PRÁCTICO C

FABRICACIÓN DE UNA MEZCLA SEMICALIENTE BBTM 11A CON BETÚN MODIFICADO CON ALTO PORCENTAJE DE CAUCHO

C.1. INTRODUCCIÓN

Los trabajos que a continuación se exponen se llevaron a cabo en el Laboratorio Ingeniería de la Construcción de la Universidad de Granada.

C.2. OBJETIVO

El objetivo de esta investigación es evaluar el comportamiento de mezclas bituminosas semicalientes fabricadas con betunes modificados con altos porcentajes de caucho a través del uso de betunes blandos y aditivos.

La mezcla seleccionada para el estudio fue una mezcla tipo BBTM 11A en caliente convencional fabricada con un betún con caucho y dos mezclas BBTM 11A semicalientes, fabricadas con el mismo betún y dos tipos de aditivos diferentes para reducir la temperatura. De esta forma, se hizo un análisis comparativo entre las mezclas bituminosas semicalientes y una mezcla en caliente convencional (mezcla de referencia).

Los ensayos a realizar para la evaluación de las prestaciones mecánicas de estas mezclas fueron:

- Análisis de trabajabilidad
- Ensayo de rigidez
- Ensayo triaxial
- Pérdida de partículas
- Sensibilidad al agua
- Ensayo de rodadura

C.3. MATERIALES

Se emplearon los siguientes materiales para la fabricación de la mezcla tipo BBTM 11A:

- Betún modificado con polvo de caucho (BMC): se utilizó un betún blando (de penetración a 25°C según UNE-EN 1426 en torno a 100 dmm), que posteriormente fue modificado con un polvo de caucho (tamaño ^{partícula} < 0,6 mm) en un 20% sobre el peso total del ligante.
- Los ligantes blandos tienen una menor viscosidad, y por tanto, no es necesario elevar tanto su temperatura para garantizar la envuelta de los áridos y la trabajabilidad de la mezcla. Así, mediante su uso se espera compensar dicha baja viscosidad con el incremento que en ésta produce el incorporar un elevado porcentaje de polvo de caucho.
- Para la fabricación del betún modificado con polvo de caucho (BMC), primero se calentó el betún hasta una temperatura estable de 165°C y posteriormente se incorporó la dotación de polvo de caucho utilizada en su modificación. Finalmente, se procedió a su mezclado mediante vórtice rotacional a 3500 rpm utilizando un tiempo de digestión de 60 minutos.
- Aditivos: Se utilizaron dos tipos de aditivos: ceras y tensoactivos.

ADITIVO	DESCRIPCIÓN	DOSIFICACIÓN
Ceras	Son aditivos orgánicos que provocan una disminución de la viscosidad y permiten conseguir una reducción de temperatura de entre 20-30°C [1,2].	3% en peso sobre ligante
Tensoactivos	Reducen la tensión superficial del ligante, mejorando la envuelta de los áridos y actuando como agentes lubricantes entre el betún y el árido.	0,05% en peso sobre ligante

Tabla C.1. Descripción y dosificación de los aditivos empleados

- Ambos aditivos se aplicaron por separado y fueron empleados como modificadores adicionales del betún modificado con caucho obtenido a partir de la matriz bituminosa blanda (BMC). Para ello, tras la fabricación de dicho betún, éste se calentó hasta los 165°C y posteriormente se incorporaron las dosis de aditivo correspondientes mezclándolos durante 60 minutos a temperatura constante y 300 rpm mediante el uso de un agitador mecánico.
- Áridos: Los áridos utilizados en la fabricación de las mezclas fueron de naturaleza caliza para la fracción fina (0/6 mm) y ofita para la fracción gruesa (6/12 mm). El filler utilizado

(de aportación en su totalidad) fue cemento. El esqueleto mineral empleado para la fabricación de las mezclas cumple con los husos establecidos en el PG-3 para las mezclas BBTM 11 A.

Tras el estudio de la fórmula de trabajo en laboratorio, la dotación de betún utilizada para su fabricación fue de 5% sobre el peso de la mezcla.

C.4. PLAN DE TRABAJO

La Tabla C.2 recoge el plan de trabajo realizado durante esta investigación.

ETAPA DEL ESTUDIO	TIPO DE BETÚN	ENSAYOS
1. Estudio reología de betunes	BMC BMC-C BMC-T	Barridos de frecuencia y temperatura con DSR
2. Estudio de la trabajabilidad y comportamiento mecánico	BBTM 11A (BMC a 175°C) BBTM 11A (BMC a 150°C) BBTM 11A (BMC a 130°C)	Trabajabilidad Ensayo de rigidez
	BBTM 11A (BMC-C a 150°C) BBTM 11A (BMC-C a 130°C)	Ensayo triaxial (UNE-EN 12697-25, Método B)
	BBTM 11A (BMC-T a 150°C) BBTM 11A (BMC-T a 130°C)	Pérdida de partículas (UNE-EN 12697-17,2004)
3. Verificación de las prescripciones establecidas en el PG-3	BBTM 11A (BMC a 175°C) BBTM 11A (BMC-C a 130°C)	Sensibilidad al agua (UNE-EN 12697-12)

BMC: Betún modificado con caucho.
BMC-C: Betún modificado con caucho aditivado con ceras
BMC-T: Betún modificado con caucho aditivado con tensoactivo

Tabla C.2. Plan de trabajo

C.5. RESULTADOS

C.5.1. Estudio reología de betunes

Durante la primera etapa de este proyecto de investigación, se llevó a cabo el estudio del comportamiento reológico de los tres ligantes fabricados (BMC, BMC-C y BMC-T). Para ello, se realizaron barridos de frecuencia (de 0,1 Hz a 20 Hz) a distintas temperaturas (10-80°C), determinando el módulo complejo y ángulo de fase de cada uno de los ligantes estudiados y analizando

su respuesta reológica a través de sus diagramas de Black (ver Figura C.1), que representan los parámetros para todo el rango de temperaturas y frecuencias estudiados.

En la Figura C.1 donde se representan los diagramas de Black, se observa cómo los tres betunes presentan un comportamiento reológico complejo debido a la presencia del polvo de caucho. No obstante, el betún modificado con caucho y ceras (BMC-C), a pesar de que su respuesta reológica es

muy similar en función de la temperatura a la del betún modificado con caucho (BMC), ofrece un comportamiento más elástico (menores ángulos de fase) y un mayor módulo complejo a elevadas temperaturas (mayor estabilidad y consistencia). Además, ambos betunes (BMC y BMC-C) presentan signos de separación entre fases (caucho y matriz

bituminosa) para las temperaturas más elevadas (caída drástica de la curva del diagrama de Black). Este hecho no se hace patente en el caso del betún modificado con polvo de caucho y tensoactivos (BMC-T), el cual también ofrece una respuesta más elástica que el BMC pero con menores valores de módulo complejo.

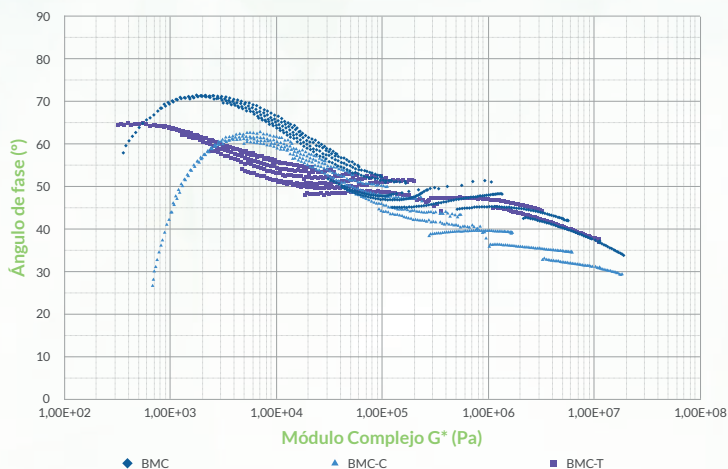


Figura C.1.
Diagramas de Black de
los diferentes betunes
estudiados

Comparando la respuesta reológica de los ligantes estudiados con la ofrecida por otros ligantes de común uso en nuestras carreteras (betún convencional B50/70 y betún modificado PMB 45/80-65), se puede observar (Figura C.2) que su comportamiento es más elástico (menores ángulos de fase en casi todo el rango de temperaturas) con un módulo complejo del mismo orden al ofrecido por el PMB 45/80-65 (algo menor en el caso del BMC-T). En este sentido, es necesario destacar que la consistencia (medida a través de la penetración) de los betunes BMC fabricados será del mismo

orden que la de los betunes de referencia (entre 45 y 80 mm), ofreciendo los BMC y BMC-C una mayor consistencia (menor penetración) que el BMC-T. Por su parte, el punto de reblandecimiento de los betunes fabricados sería del mismo orden que el del PMB 45/80-65 en el caso del BMC, y quizás algo inferior en el caso de los BMC-C y BMC-T (en el rango de temperaturas donde se debería producir su punto de reblandecimiento, 45-80°C, sus ángulos de fase son del mismo orden o ligeramente inferiores).



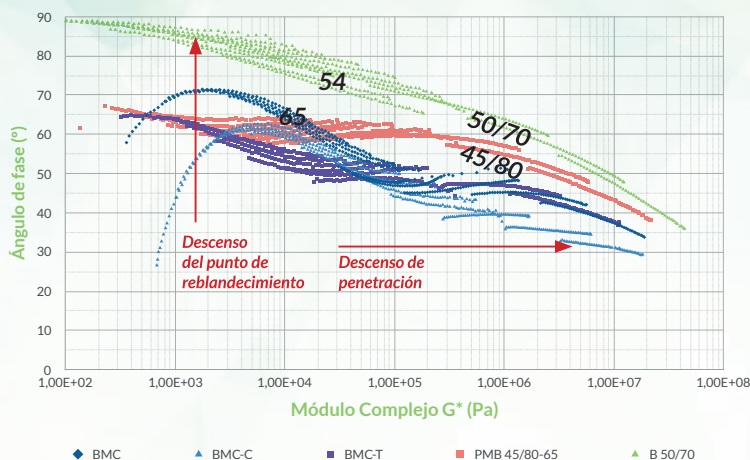


Figura C.2.
Comparativa de la
respuesta reológica de
los betunes estudiados
con las de dos betunes
(uno convencional y otro
modificado) de común
empleo en carreteras.

C.5.2. Estudio de la trabajabilidad y comportamiento mecánico

C.5.2.1. Trabajabilidad

En una segunda etapa, cada una de las tres mezclas objeto de estudio fueron fabricadas a diferentes temperaturas (175, 150 y 130°C), evaluando posteriormente su trabajabilidad utilizando el compactador giratorio que permite relacionar la energía de compactación con el nivel de densificación de las mezclas.

La Figura C.3 muestra la media de los resultados obtenidos en las curvas de compactabilidad (densificación de la mezcla frente al número de ciclos aplicados). En ella se observa que la utilización de los distintos aditivos permite mejorar la trabajabilidad de estos materiales tanto en el caso de las ceras como en el del tensoactivo, obteniéndose mayores valores de densidad en relación a la mezcla sin aditivos (fabricada a la misma temperatura). Este hecho es más significativo en el caso de la cera, el cual incluso permite obtener valores superiores a los presentados por la mezcla en caliente, como consecuencia de la mejora de la compactabilidad y trabajabilidad de la mezcla.

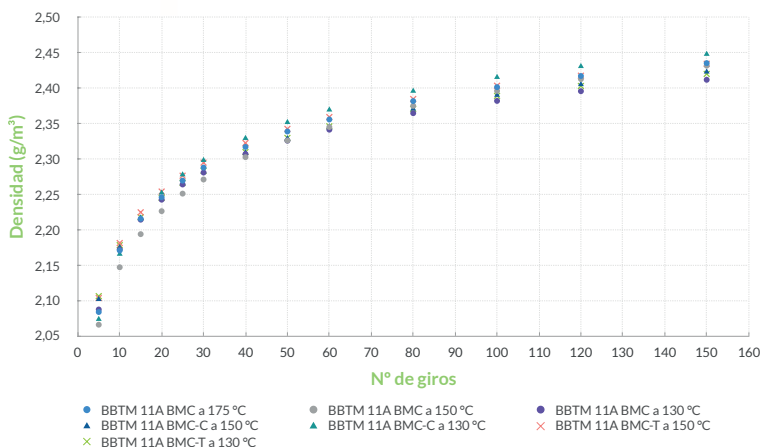


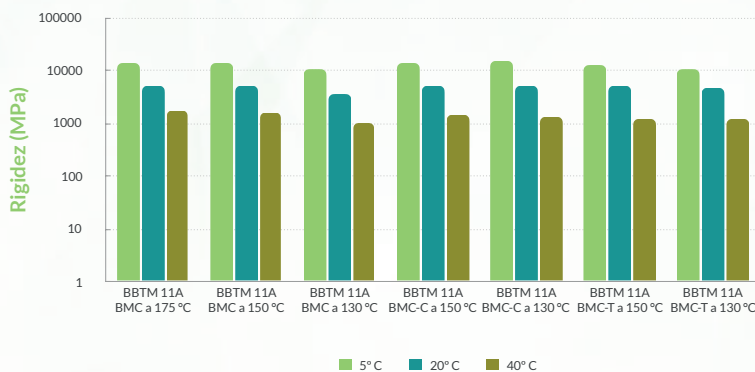
Figura C.3.
Resultados medios de la
evolución de la densidad
con respecto a la energía
de compactación de las
mezclas.

C.5.2.2. Módulo de rigidez

El ensayo de rigidez (UNE-EN 12697-26) consiste en la determinación del módulo de rigidez a partir de la aplicación de una serie de 15 pulsos de carga controlada a tracción indirecta. La Figura C.4 recoge los valores de rigidez a 5, 20 y 40°C de cada una de las mezclas estudiadas. En ella se observa una cierta tendencia a disminuir la rigidez de estos materiales conforme se desciende su temperatura

de fabricación. Así, a pesar de que el efecto de la temperatura de servicio (5, 20 y 40°C) es el factor más influyente en la rigidez de los materiales estudiados, el uso de las ceras permite aumentar la capacidad portante de las mezclas cuando éstas se fabrican a 130°C, lo que demuestra que a pesar de descender su temperatura de fabricación, mantienen una resistencia a la deformación del mismo orden que el de la mezcla en caliente.

Figura C.4.
Resultados medios de
rigidez a diferentes
temperaturas de las
mezclas estudiadas

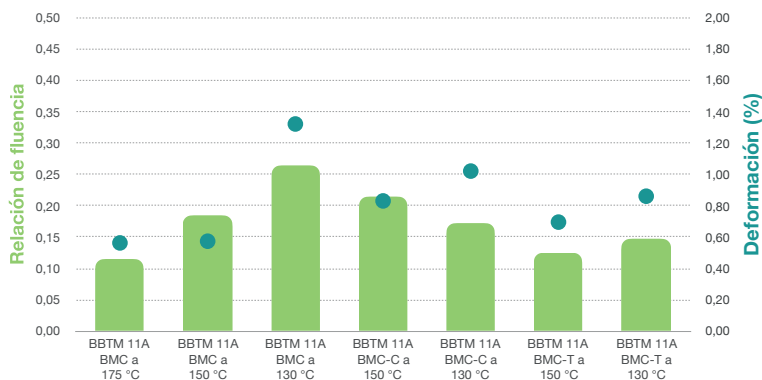


C.5.2.3. Ensayo triaxial

Para el ensayo triaxial se siguió el Método B descrito en la norma UNE-EN 12697-25. La Figura C.5 recoge los resultados medios del ensayo triaxial realizado sobre las mezclas estudiadas a una temperatura de 60°C. En ella se pone de manifiesto que a pesar de que el descenso en la temperatura de fabricación/compactación lleva a un aumento en las deformaciones permanentes, el uso de aditivos

permite reducir este efecto, obteniendo elevadas resistencias incluso cuando son fabricadas a 130°C. No obstante, hay que hacer notar que debido a la presencia de un elevado contenido de polvo de caucho en el ligante, todos los materiales estudiados ofrecen una elevada resistencia a las deformaciones plásticas (independientemente de su temperatura de fabricación).

Figura C.5.
Resultados medios del
ensayo triaxial para las
mezclas fabricadas



C.5.2.4. Pérdida de partículas

Este método de ensayo para la determinación de la pérdida de partículas de las mezclas bituminosas drenantes evalúa la pérdida por masa de las muestras de mezcla bituminosa después de someterse a 300 vueltas en la máquina de Los Angeles. Este ensayo permite estimar la resistencia del aglomerante y adhesividad áridos-betún.

La Figura C.6 muestra los resultados medios obtenidos en el ensayo de pérdida de partículas. Tal

y como se puede observar en el caso de la mezcla sin aditivos, conforme desciende la temperatura de fabricación, se disminuye su resistencia a la abrasión aumentando el porcentaje de pérdida de partículas. El uso de aditivos tensoactivos no parece paliar dicho efecto (manteniéndose los valores de pérdidas por encima del 20%). No obstante, el uso de ceras sí permite que la resistencia a la abrasión mejore sustancialmente, especialmente para las temperaturas de fabricación más bajas (130°C).

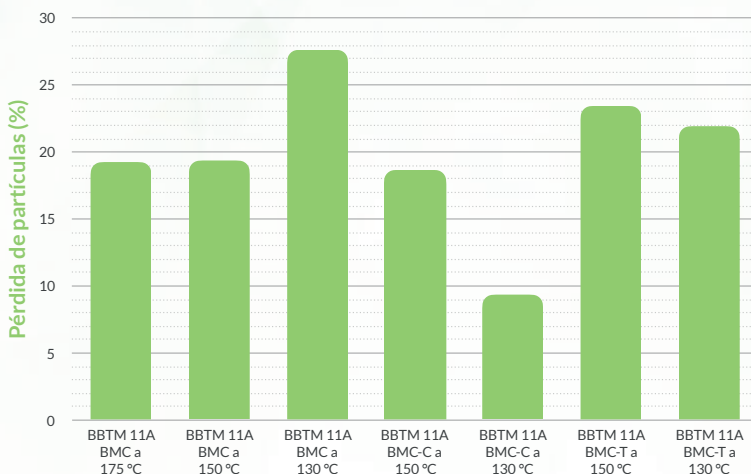


Figura C.6.
Porcentaje de pérdida de partículas para las mezclas en estudio

C.5.3. Verificación de las prescripciones establecidas en el PG-3

En base a los resultados obtenidos en los ensayos anteriores, se puede comprobar que la adición de ceras a las mezclas semicalientes elaboradas con betunes blandos y modificados con polvo de caucho lleva a una mejora de su trabajabilidad, obteniendo valores de densidad y comportamiento mecánico comparable al obtenido por la mezcla convencional en caliente, así como de su rigidez, resistencia a las deformaciones permanentes y a la pérdida de partículas. Debido a ello, durante la tercera etapa se verificó si dicha mezcla (BBTM 11A con BMC-C a 130°C) es capaz de cumplir con las prescripciones establecidas en el PG-3 a través del ensayo de sensibilidad al agua (EN-12697-12) y el ensayo de rodadura (UNE-EN 12697-22).

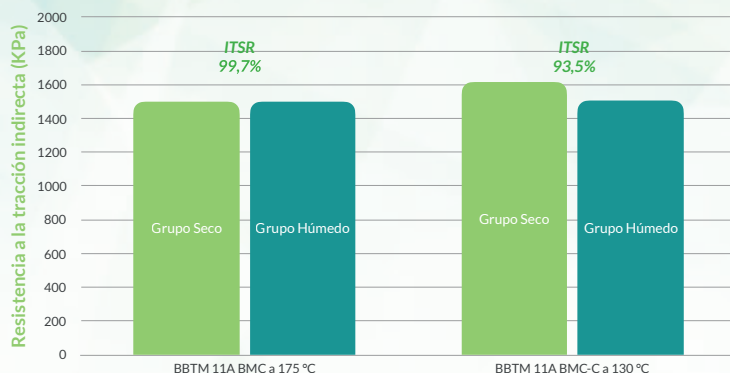
Además, se compara con la mezcla de referencia (BBTM 11A con BMC a 175°C).

C.5.3.1. Sensibilidad al agua

Tal como se ha comentado anteriormente, este ensayo se realizó a la muestra de referencia y a la mezcla semicaliente que presentó mejor comportamiento mecánico en los ensayos previos. El método de ensayo utilizado es el descrito en la norma UNE-EN 12697-12.

Los resultados de sensibilidad al agua (ver Figura C.7) demuestran que el uso de ceras en betunes blandos y modificados con elevados porcentajes de polvo de caucho permite mantener similares o superiores valores de resistencia a tracción indirecta y conservada en mezclas bituminosas fabricadas a 45°C menos.

Figura C.7.
Resultados medios
obtenidos en el ensayo de
sensibilidad al agua para
las mezcla patrón y la
mezcla semicaliente con
cera fabricada a 130°C.



C.5.3.2. Ensayo de rodadura

Finalmente, la Tabla C.3 muestra los resultados obtenidos en el ensayo de rodadura a 60°C. Una vez más, se comprueba que la resistencia a deformaciones plásticas de las mezclas fabricadas con betunes blandos modificados con elevados porcentajes de polvo de caucho y aditivados con ceras es del mismo orden que las de las mezclas

fabricadas a 45°C menos. En este sentido, es necesario destacar que a pesar de que la mezcla BMC-C a 130° C supera en un 25% el límite propuesto por el PG-3 para las categorías de tráfico y climas más exigentes (0,07 mm/10³ ciclos), dicha variación está dentro de la repetibilidad del propio ensayo³.

PARÁMETRO	BMC A 175°C	BMC-C A 130°C
Temperatura (°C)	60	60
WTS (mm/103 ciclos)	0,068	0,088
RD (mm)	2,334	2,457

Tabla C.3. Resultados del ensayo de rodadura

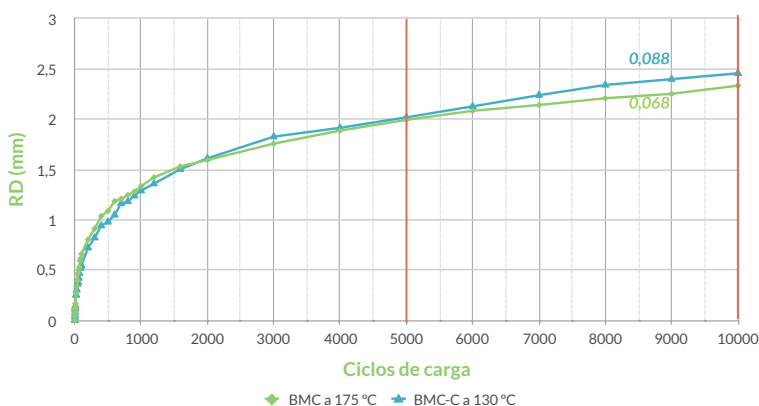


Figura C.8.
Resultados obtenidos en
el ensayo de rodadura
para la mezcla patrón y la
mezcla semicaliente con
cera fabricada a 130°C.

³ Estudios recientes [1,2] han demostrado que los valores de repetibilidad del parámetro WTS del ensayo de rodadura se encuentran en torno a 0,04 intra-laboratorio (con un coeficiente de variación medio del 25%) y a 0,05 inter-laboratorios (con un coeficiente de variación medio del 39%)

C.6. CONCLUSIONES

Esta investigación tiene como objetivo fabricar mezclas bituminosas semicalientes (en el rango de los 130°C) a partir de ligantes modificados con elevados porcentajes de polvo de caucho procedente de NFVU, sin disminuir sus propiedades mecánicas. Para ello, se ha combinado el uso de una matriz bituminosa blanda (de penetración en torno a 100 dmm en el ensayo UNE-EN 1426 realizado a 25°C) y el uso de aditivos reductores de temperatura (ceras y tensoactivos). En base a los resultados obtenidos pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- La incorporación de ceras y tensoactivos en betunes blandos modificados con elevados porcentajes de polvo de caucho (20 % en peso total de ligante) permite obtener un comportamiento más elástico (menores ángulos de fase) y un mayor módulo complejo a elevadas temperaturas (mayor estabilidad y consistencia), independientemente de la temperatura de ensayo, pero especialmente a elevadas temperaturas y en el caso de las ceras. Este hecho resulta de gran interés puesto que permite corregir el efecto causado por el uso de una matriz blanda en la fabricación de este ligante modificado con polvo de caucho.
- La utilización de ceras y tensoactivos permite mejorar la trabajabilidad de las mezclas bituminosas fabricadas con betunes blandos modificados con elevados porcentajes de polvo de caucho. De esta forma, el uso de aditivos permite incrementar la densidad de las mezclas a bajas temperaturas de fabricación (130°C, en

referencia a la mezcla semicaliente sin aditivos), obteniendo los mayores valores cuando se utiliza la cera y llegando a densidades incluso mayores que la presentada por la mezcla convencional en caliente (fabricada a 175°C).

- A pesar de que el descenso en la temperatura de fabricación/compactación lleva a un aumento en las deformaciones permanentes, el uso de ceras y tensoactivos permite reducir este efecto, obteniendo elevadas resistencias a deformación plástica incluso cuando son fabricadas a 130°C. Además, las ceras permiten aumentar la capacidad portante de las mezclas cuando éstas son fabricadas a 130°C, lo que demuestra que a pesar de descender su temperatura de fabricación, mantienen una resistencia a la deformación del mismo orden que el de la mezcla en caliente.
- En términos de integridad y cohesión interna, se demuestra que conforme la temperatura de fabricación desciende, la resistencia a la pérdida de partículas de las mezclas disminuye. El tipo de aditivo tensoactivo en este estudio no parece paliar dicho efecto (manteniéndose los valores de pérdidas por encima del 20%). No obstante, en el caso de las ceras se ha demostrado que es posible mejorar la resistencia a la abrasión sustancialmente, especialmente para las temperaturas de fabricación más bajas (130°C). Asimismo, el uso de ceras en betunes blandos y modificados con elevados porcentajes de polvo de caucho permite mantener similares o superiores valores de resistencia a tracción indirecta y conservada en mezclas bituminosas fabricadas a 45°C menos.

“La utilización de ceras y tensoactivos permite mejorar la trabajabilidad de las mezclas bituminosas fabricadas con betunes blandos modificados con elevados porcentajes de polvo de caucho”

En base a estas consideraciones, se puede afirmar que es viable fabricar mezclas bituminosas semicalientes con elevados porcentajes de polvo de caucho procedente de NFVU (en torno al 20% en peso sobre el betún) a partir de la combinación de betunes blandos aditivados con ceras, capaces de cumplir con las exigencias establecidas por el PG-3 para su aplicación en firmes de carreteras. En este sentido, esta técnica permitiría aportar ventajas adicionales a las propias del uso del polvo de caucho, como son la mejora de las condiciones de trabajabilidad y puesta en obra de estos materiales: (i) menor grado de envejecimiento en el betún debido a su menor oxidación, (ii) la reducción del consumo energético asociado a la fabricación

de la mezcla y de las eventuales emisiones de gases contaminantes, (iii) la mejora en la salud ocupacional de los trabajadores, disminuyendo su exposición a humos, olores y riesgo de quemaduras, etc.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Calvo, C., Loma, J., Peña, J. L. Resistencia a la deformación permanente de mezclas bituminosas: Estimación de la precisión del ensayo EN 12697-22 y su influencia en la interpretación de resultados, *Asfalto y Pavimentación*, vol. VII (26), pp. 13-23 (2017). Disponible en: http://www.asefma.es/wp-content/uploads/2017/09/asfalto_26.pdf

[2] Calvo, C., Loma, J., Peña, J. L. Análisis del ensayo de resistencia a la deformación permanente (UNE-EN 12697-22): Conclusiones del grupo de trabajo de aleas, XII Jornada Nacional de Asefma, Comunicación 25 (2017). Disponible en: <http://www.asefma.es/wp-content/uploads/2018/02/25-An%C3%A1lisis-del-ensayo-de-resistencia.pdf>



CONCLUSIONES

05



Se denominan mezclas bituminosas semicalientes aquéllas que se fabrican a temperaturas que están entre 20 y 40°C por debajo de las habituales para cada tipo de mezcla y ligante. La reducción de temperatura persigue varios objetivos:

- Reducir el consumo energético durante la fabricación, al calentar los áridos hasta temperaturas no tan altas como en las mezclas en caliente convencionales.
- Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, consecuencia directa del menor consumo de combustibles.
- Mejorar las condiciones de salud en el trabajo para todo el personal ocupado en las diversas tareas de pavimentación.
- Generar menos molestias en la vecindad de las centrales de fabricación de mezclas bituminosas y de los lugares de extendido.
- Reducir los costes de producción.

En la actualidad, existen tres tecnologías para la fabricación de mezclas semicalientes convencionales: los aditivos orgánicos, los aditivos químicos y los betunes espumados.

En el caso concreto de las mezclas semicalientes con caucho las experiencias de espumación son menos frecuentes. Parece ser que los contenidos de humedad que incorporan estas técnicas afectan a la sensibilidad al agua de las mezclas semicalientes con caucho, lo que resulta contraproducente, ya que la vida útil del material podría quedar muy acortada.

Los aditivos orgánicos suelen tener consistencia sólida a temperatura ambiente, lo que permite que se sirvan a granel. Su incorporación en el betún se realiza de una forma sencilla obteniendo fácilmente ligantes homogéneos.

En el caso de los aditivos químicos, su incorporación también es muy sencilla, ya que se mezclan perfectamente con el betún. La dificultad viene dada en muchas ocasiones en el bajo porcentaje en que se incorpora en el betún por lo que hay que prestar especial atención a la dosificación.

A la hora del diseño de las mezclas semicalientes en laboratorio, los factores críticos que deben tenerse en cuenta son la adecuada envuelta de los áridos, las características volumétricas de la mezcla (especialmente los huecos de aire), la sensibilidad al agua y la resistencia a la deformación plástica. Para considerar estos factores se ha propuesto un protocolo de trabajo en laboratorio, en el que, a partir de la mezcla bituminosa con caucho sin aditivos de semicalientes, se realiza una serie de ensayos y comprobaciones para determinar la eficacia de un aditivo y la temperatura mínima a la que puede trabajarse sin afectar negativamente las propiedades de la mezcla bituminosa.

“Se puede concluir que es factible la fabricación de mezclas bituminosas semicalientes con polvo de caucho procedente del neumático al final de su vida útil. Sin embargo, la experiencia que hay de esta tecnología a nivel de campo es todavía insuficiente”

Se han llevado a cabo tres casos de estudios diferentes en laboratorio correspondientes a las mezclas SMA, AC16S y BBTM 11A. Los resultados indican que, con los aditivos estudiados en cada uno de los casos, es posible reducir la temperatura en 30, 25 y 45°C, respectivamente.

Por tanto, a partir de los casos prácticos estudiados a nivel de laboratorio, se puede concluir que es factible la fabricación de mezclas bituminosas semicalientes con polvo de caucho procedente del neumático al final de su vida útil. Sin embargo, la experiencia que hay de esta tecnología a nivel de campo es todavía insuficiente.

Estos resultados, junto con los reportados en la bibliografía que se ha revisado para la elaboración de esta Guía, animan a la aplicación de estas técnicas semicalientes con caucho en proyectos a escala real, para poner en juego todas las potencialidades de las mezclas bituminosas con caucho de neumáticos al final de su vida útil (NFVU).



EXONERACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Los contenidos establecidos en este documento proceden principalmente de la revisión bibliográfica y del propio conocimiento y experiencia de los autores, además de la síntesis de los resultados experimentales llevados a cabo en laboratorio con diferentes mezclas bituminosas y aditivos.

Los autores han elaborado este documento con el mejor criterio y rigor técnico posible. Sin embargo, será en última instancia el buen criterio del usuario del documento el único que puede garantizar un resultado satisfactorio, por lo que los autores y SIGNUS Ecovalor se eximen de toda responsabilidad derivada de su aplicación práctica.

SIGNUS ECOVALOR

C/Caleruega, 102, 5ª
28033 Madrid
T: +34 91 768 07 66
info@signus.es

www.signus.es

Síguenos en:





SIGNUS

SISTEMA COLECTIVO DE GESTIÓN DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO