

# FIBRAS DE CELULOSA ADITIVADAS PARA MEZCLAS TIPO SMA CON PROPIEDADES MEJORADAS

**SANTIAGO LANCHAS  
Y RUY NÚÑEZ**  
RETTENMAIER IBÉRICA

**ANDRÉS COSTA, JAVIER LOMA  
Y ROCÍO CERVANTES**  
ELSAN

**MARÍA ELENA HIDALGO**  
EIFFAGE INFRAESTRUCTURAS

**JOSÉ ANTONIO HERGUETA  
Y FERNANDO SÁNCHEZ**  
EUROCONSULT

**BALTASAR RUBIO  
Y RAFAEL JIMÉNEZ**  
CEDEX

**FÉLIX E. PÉREZ  
Y RAMÓN BOTELLA**  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

**SANTIAGO EXPÓSITO  
Y VICTORIANO FERNÁNDEZ**  
LABORATORIO DE ACÚSTICA APLICADA DE LA UCLM

**JUAN JOSÉ POTTI**  
EUCAT



---

# FIBRAS DE CELULOSA ADITIVADAS PARA MEZCLAS TIPO SMA CON PROPIEDADES MEJORADAS

---

## RESUMEN

Las mezclas bituminosas tipo SMA, recogidas en la norma UNE EN 13108-5, ofrecen grandes posibilidades para aumentar la vida útil de las capas del firme, principalmente las de rodadura e intermedia, contribuyendo así a la reducción de costes en el ciclo de vida de la estructura portante de la carretera.

El proyecto Mezclas SMA de la familia de la norma UNE EN 13108-5 que sean Sostenibles, Medioambientalmente Amigables (Proyecto SMA, Financiado por el Centro Tecnológico para el Desarrollo Industrial, CDTI, con fondos FEDER) consta de dos grandes partes. Una primera dedicada a la adaptación a las condiciones españolas de las mezclas SMA convencionales. Una segunda parte enfocada al desarrollo de mezclas que basándose en los principios constitutivos de las SMA convencionales, permitan la potenciación de aspectos relacionados con la reducción del impacto medioambiental y contribuyan a la mayor sostenibilidad de la construcción y conservación de los firmes de carreteras.

Es conocido que las mezclas SMA requieren una fibra estabilizante para evitar los problemas de drenaje del ligante asociados a los altos contenidos del mismo. También favorecen un reparto homogéneo del mástico formando una película gruesa y homogénea alrededor de los áridos. Pero las mezclas SMA especiales desarrolladas en el Proyecto SMA

han requerido el desarrollo de aditivos estabilizantes especiales que facilitasen y/o potenciasen las propiedades perseguidas.

Este artículo presenta estos nuevos productos y las ventajas que permiten conseguir en la fabricación de mezclas bituminosas de prestaciones especiales.

## INTRODUCCIÓN

Las fibras de celulosa vienen utilizándose desde hace décadas como estabilizante para prevenir el escurrimiento del betún y su reparto uniforme con el fin de conseguir la formación de una película gruesa y homogénea alrededor de los áridos en mezclas con dotaciones de ligante superiores a lo que la superficie específica de los mismos puede admitir.

Las mezclas tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA), desarrolladas originalmente en Alemania durante los años 60 y 70 del siglo pasado, son mezclas con granulometría discontinua, principalmente en los tamaños menores del árido grueso, y a la vez, contienen dotaciones de ligante muy superiores a las mezclas AC convencionales. Esto deriva en que la superficie específica del material mineral (áridos y filler) no sea suficiente para adsorber todo este ligante. Por ello, desde el principio, se integró en sus fórmulas el uso de fibras que evitasen el escurrimiento.

El primer estabilizante empleado fue la fibra de amianto, pronto deshechada por sus implicaciones en materia de seguridad e higiene. Desde entonces se han probado muchos otros productos (polímeros varios, materiales pulverulentos, multitud de fibras de diferentes naturalezas) resultando las fibras de celulosa los más utilizados por sus propiedades funcionales.

A partir de su utilización en mezclas SMA, las fibras de celulosa han pasado a usarse en otros tipos de mezclas bituminosas. Para la sujeción y reparto del ligante en mezclas tipo PA o AC, o como soporte para la incorporación de aditivos modificadores de la reología de las mezclas en mezclas SMA, PA, y AC.

Dentro del proyecto *Mezclas SMA de la familia de la norma UNE EN 13108-5 que sean Sostenibles, Medioambientalmente Amigables* (Proyecto SMA), financiado por el Centro Tecnológico para el Desarrollo Industrial (CDTI) con fondos FEDER, se han estudiado mezclas que, basándose en los principios constitutivos de las SMA convencionales, permitan la potenciación de algún aspecto funcional y la reducción del impacto medioambiental contribuyendo así a una mayor sostenibilidad de la construcción y conservación de los firmes de carreteras. Para estas mezclas SMA especiales, se han desarrollado diferentes fibras con aditivos que facilitan su producción y contribuyen a alcanzar las propiedades perseguidas.

Este artículo presenta un repaso general a los productos estabilizantes para mezclas ricas en ligante, a las propiedades de las fibras de celulosa y sus posibilidades de empleo en aglomerados bituminosos y finalmente se presentan los productos especiales desarrollados en el Proyecto SMA.

## **PRODUCTOS ESTABILIZANTES EN MEZCLAS RICAS EN BETÓN**

El uso de neumáticos con clavos para la conducción invernal fue el motivo que condujo al desarrollo de las mezclas SMA. Este tipo de neumáticos producía un desgaste acelerado de las

superficies de rodadura haciendo necesarias las operaciones de mantenimiento tras cada campaña de invierno. A los tradicionales másticos bituminosos empleados en Alemania para la reparación de problemas superficiales, se los complementó con la incrustación superficial de grava gruesa para mejorar la respuesta a la abrasión. Este tipo de actuaciones dieron muy buen resultado por lo que se empezó a estudiar con más detalle sus características y a buscar una forma de industrializar su fabricación. Así, a finales de los 60 el Dr. Zichner presenta su propuesta para la fabricación de una mezcla con granulometría discontinua y alto contenido en ligante.

Los principios de diseño originales se fundamentan en dos ideas. La primera es obtener un esqueleto mineral en el que las partículas más grandes del árido grueso estén en contacto directo unas con otras con el fin de proporcionar una gran estabilidad evitando las deformaciones plásticas. La segunda es emplear un alto contenido de ligante para, por una parte, cerrar bien la mezcla para hacerla impermeable, y por otra parte, proporcionar una gran cohesión para resistir los esfuerzos asociados al contacto entre el pavimento y el neumático.

A diferencia de las mezclas BBTM, en las que la cantidad de betún está ajustada a lo que admite la superficie específica del material mineral, las mezclas SMA incluyen ligante en exceso sobre dicha superficie específica. Eso conduce a un problema fundamental: el escurrimiento del ligante. Y es que en cuanto la mezcla sale de la amasadora, y durante el almacenado, transporte, extendido y compactación, el betún excedentario escurre dando lugar a dos fenómenos graves: la pérdida de parte del ingrediente más caro de un aglomerado bituminoso, y la pérdida de parte de las propiedades supuestas a una mezcla que, al final, contiene menos ligante del proyectado. Para evitar ese problema se recurrió desde el principio al uso de un inhibidor del escurrimiento o fibra estabilizante. En un primer momento se utilizó la fibra de amianto, pero debido a los problemas de seguridad y salud asociados a dicho producto, pronto se pasó al empleo de fibras de celulosa.

El uso de altos contenidos de ligante en las mezclas bituminosas tiene varias razones. En primer lugar está la constitución de mezclas con bajos contenidos en huecos con el fin de que las mezclas sean lo más impermeables posible. Si, además, conseguimos que ese ligante en elevada cantidad se disponga uniformemente sobre la superficie de los áridos formando una capa gruesa y homogénea conseguimos otras ventajas añadidas. Las principales son una mejor cohesión de la mezcla al aumentar la superficie de contacto entre los áridos y el retraso del envejecimiento del betún alargando en el tiempo las propiedades como aglomerante del mismo.

A lo largo de las últimas décadas, esta técnica ha ampliado su campo de acción y ha trascendido el uso original en mezclas SMA para capas de rodadura. Así, hoy en día, el aumento en las dotaciones de ligante en mezclas bituminosas se emplea también para la fabricación de mezclas tipo SMA para capas intermedias, en las que es crucial resistir grandes esfuerzos tanto de compresión como tangenciales evitando las deformaciones plásticas, pero también para la producción de mezclas tipo PA, mezclas drenantes, ya que así se mejora mucho la cohesión entre las partículas y se reduce su sensibilidad al agua, o en mezclas tipo AC para capas de base, en las que el incremento del ligante mejora la resistencia a la fatiga y a la progresión de fisuras.

Por todo ello, el uso de un producto estabilizante que evite el escurrimiento y contribuya al reparto homogéneo del mismo es fundamental. Existen muchos productos que, en principio, pueden emplearse para evitar este problema, en el siguiente apartado se hace un breve repaso de los principales, pero los más empleados son los productos de tipo fibroso y concretamente las fibras de celulosa por las ventajas que aportan.

### **FIBRAS DE CELULOSA GRANULADAS: EL MEJOR ADITIVO ESTABILIZANTE**

Como se ha mencionado anteriormente, existen numerosos productos que, a priori, permiten evitar la pérdida del ligante en exceso respecto a la superficie específica de los áridos.

Se pueden establecer tres categorías:

- Los polímeros como SBS y NBR en polvo para mejorar betunes
- Los aditivos pulverulentos
- Los aditivos fibrosos

Los polímeros usados comúnmente para la producción de betunes modificados podrían ser una opción viable aunque presentan varios problemas importantes, entre ellos cabe citar que para evitar el escurrimiento se debe recurrir a modificadores de la viscosidad por lo que las mezclas resultantes suelen admitir poca dotación de betún, presentan un difícil reparto del mismo y tener peor trabajabilidad, por lo que precisan de más temperatura y energía de producción y ello dificulta las operaciones de extendido y compactación de la mezcla, sobre todo en trazados no rectos.

Los aditivos pulverulentos son de naturaleza muy diversa. Se pueden mencionar el polvo de sílice, el carbonato cálcico o el polvo mineral. Se trata de productos formados por partículas muy pequeñas y aunque su precio es muy bajo comparado con otros productos, tienen el inconveniente de que no propician el reparto homogéneo del ligante sobre la superficie de los áridos. Estos productos tienden a acumularse en los huecos que quedan en la estructura del esqueleto mineral arrastrando consigo el betún que los rodea por lo que la mezcla resultante no presenta las ventajas asociadas a una película gruesa y uniforme sobre los áridos.

El polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU) es un tipo de aditivo que está a caballo entre las dos categorías presentadas anteriormente. Por una parte, el caucho contribuye a mejorar las propiedades del betún, entre ellas su viscosidad. Por otra parte, la carga mineral empleada en la fabricación de los neumáticos, el negro de carbono, contribuye a aumentar la superficie específica capaz de retener el ligante. Esta combinación de polímero y aditivo pulverulento ha sido probada en el marco del Proyecto SMA en el que se han realizado diversas pruebas y tramos de ensayo con mezclas SMA

fabricadas con polvo de NFU. Se trata pues de un producto interesante, sobre todo por tratarse de un material reciclado, pero que como estabilizante no ofrece las mismas propiedades que el tercer grupo que se presenta seguidamente.

Este tercer grupo de productos de naturaleza fibrosa se puede subdividir en dos grandes subgrupos:

- las fibras sintéticas y
- las fibras de origen natural (minerales y orgánicas).

Las fibras sintéticas suelen presentarse en forma de hilos largos (orden centimétrico) y diámetros del orden de cientos de micrometros. Se han empleado como refuerzo ante esfuerzos de tracción en las mezclas para mejorar la resistencia a la apertura de fisuras. El principal problema de estas fibras es que se cargan electrostáticamente lo que las lleva a pegarse a las palas de las amasadoras de forma que su distribución en la mezcla no es todo lo regular que se requiere. Asimismo, pueden dar lugar a bolas apelmazadas de fibra que una vez que son arrastradas por la mezcla, dan lugar a defectos en las capas por discontinuidad del aglomerado. Todo ello las hace desaconsejables para este uso.

Entre las fibras de origen natural, las de tipo mineral (por ejemplo, fibras de roca o fibras de vidrio) no suelen emplearse para la fabricación de mezclas ricas en ligante por dos razones fundamentales. La primera es que son productos muy susceptibles a los esfuerzos de cizalla que se generan durante el amasado de la mezcla, lo que conduce a una rotura

elevada de las fibras, acortando sensiblemente su longitud, y consecuentemente, se requieren dosificaciones más elevadas para alcanzar las propiedades esperadas. La segunda es que la superficie de cada hebra suele ser muy lisa, lo que hace que sea más difícil la formación de una malla tridimensional (ver imagen 1. a y b).

Finalmente están las fibras orgánicas, fundamentalmente las de celulosa. Las propiedades especiales de este producto permiten comprender el motivo por el que son las fibras de uso común. Las fibras de celulosa son un producto de origen vegetal y renovable. La principal fuente de celulosa es la madera, aunque también se obtiene de otras especies vegetales (paja, cereales, restos de podas, plantas herbáceas). Se trata de una sustancia con una superficie específica elevadísima y una densidad aparente muy pequeña (entre 30 y 300 gr/l, según su procesamiento). La molécula de celulosa presenta una inercia química muy alta, o sea, es poco propensa a reaccionar con otras sustancias, por lo que no altera las propiedades del betún. La compatibilidad con el betún es muy buena, por lo que en condiciones adecuadas la envuelta de las fibras por éste es fácil y completa. Por su estructura filamentosa ofrece una elevada flexibilidad y como tiene cierta elasticidad según el eje de la fibra, es un producto que resiste bien los enormes esfuerzos que se producen durante el amasado, lo que contribuye a que no se rompa excesivamente. Finalmente, hay que señalar que en el proceso productivo de las fibras de celulosa puede conseguirse una superficie irregular (ver imagen 1.c) que aumenta la superficie específica y facilita el entrelazado de las hebras para la formación de una malla tridimensional.

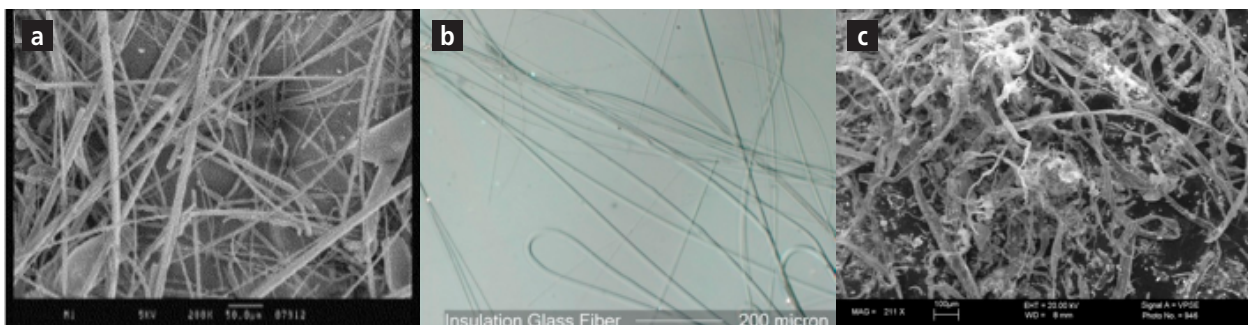


Imagen 1. a) fibra mineral; b) fibra de vidrio; c) fibra de celulosa.

Gracias a este conjunto de propiedades, las fibras de celulosa se convierten en un producto que, a la vez que retiene el ligante de la mezcla, ayuda a repartirlo homogéneamente sobre la superficie de los áridos para la consecución de una capa gruesa y uniforme que contribuye a mejorar las propiedades mecánicas de los aglomerados bituminosos, si bien, las fibras de celulosa no aportan directamente una mejora de dichas propiedades. Por todo ello, es el estabilizante más usado para la fabricación de mezclas ricas en ligante, particularmente mezclas tipo SMA, y aunque no hay cifras exactas, se estima que aproximadamente el 95% de las mezclas SMA fabricadas en Centroeuropa, Inglaterra, Escocia y Países Escandinavos emplean este tipo de aditivo estabilizante.

### MEZCLAS SMA DE REFERENCIA

Dentro del Proyecto SMA se han desarrollado dos fases de trabajo principales. La primera, definir y caracterizar unas SMA de referencia adaptadas a las circunstancias y condiciones españolas. La segunda, estudiar mezclas de la familia SMA con algunas propiedades especiales.

En la primera fase se han desarrollado dos tipos de mezclas: una SMA11 pensada como aglomerado para capas de rodadura y una SMA16 pensada como mezcla para capa intermedia o de rodadura (ver características de estas mezclas en la tabla 1). Los trabajos de fabricación y caracterización de estas mezclas han sido desarrollados por las empresas Elsan y Eiffage.

Además de caracterizarse en laboratorio, se han realizado ensayos adicionales para estimar su resistencia a la fatiga y a la progresión de fisuras, y se han realizado algunos tramos de ensayo para contrastar sus prestaciones en condiciones a escala real. Dentro de los ensayos especiales, el CEDEX ha trabajado en el estudio de la resistencia a la fisuración mediante el ensayo CEDEX; el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña ha estudiado la resistencia a la fatiga y a la progresión de fisuras mediante los ensayos de fatiga a 4 puntos, ensayo Fénix y ensayo

EBADE; y el Laboratorio de Acústica Aplicada a la Ingeniería Civil de la Universidad de Castilla La Mancha ha desarrollado los trabajos de caracterización sónica de las mezclas.

El estudio de las propiedades asociadas a la macro-textura de las mezclas, y la caracterización de las mismas en los tramos de ensayo, ha sido realizado por Euroconsult.

En diversas comunicaciones presentadas en la edición de 2012, VII Jornada Nacional de ASEFMA, así como en la presente edición, VIII Jornada Nacional de ASEFMA, se demuestran los excelentes resultados obtenidos con este tipo de mezclas. Concretamente, cabe resaltar el excelente comportamiento de las mezclas SMA en cuanto a su resistencia a la fatiga y a la progresión de fisuras.

Con todo este trabajo realizado, se han establecido las fórmulas de trabajo de referencia para ambas mezclas en las que se incluye un cierto porcentaje de fibras de celulosa recubierta con betún y granulada marca Viatop. Este producto es una presentación comercial formulada especialmente

Tabla 1: Características de las SMA de referencia.

| Característica                       | Método de ensayo   | SMA11           | SMA16 S      |
|--------------------------------------|--------------------|-----------------|--------------|
|                                      |                    | PMB 45-80/65    | B35/50       |
| Curva Granulométrica                 | UNE EN 12697-2     | % pasa          |              |
| 22,4                                 |                    | 100             | 100          |
| 16                                   |                    | 100             | 95           |
| 11,2                                 |                    | 97              | 68           |
| 8                                    |                    | 62              | 45           |
| 4                                    |                    | 27              | 26           |
| 2                                    |                    | 25              | 20           |
| 0,5                                  |                    | 14              | 14           |
| 0,063                                |                    | 7,2             | 8,0          |
| Fibras de celulosa Viatop            |                    | 0,3%            | 0,3%         |
| Escurrimiento (%) SH                 | UNE EN 12697-18    | 0,22            | 0,68         |
| Densidad A. SSD (Kg/m <sup>3</sup> ) | UNE EN 12697-6     | 2.475           | 2.332        |
| Huecos mezcla (%)                    | UNE EN 12697-8     | <b>4,4</b>      | <b>4,5</b>   |
| Huecos árido (%)                     |                    | 17,7            | 17,3         |
| Huecos Rellenos (%)                  |                    | 75,4            | 74,1         |
| Estabilidad (KN)                     | UNE EN 12697-34    | 11,2            | 7,6          |
| Deformación (mm)                     |                    | 2,7             | 1,5          |
| Coefficiente S/F                     |                    | 4,1             | 5,07         |
| RC ITRSR (%)                         |                    | UNE EN 12697-12 | <b>88</b>    |
| Rodadura RD (mm)                     | UNE EN 12697-22    | 0,37            | 2,91         |
| Rodadura PRD (%)                     |                    | 0,93            | 4,84         |
| Rodadura WTS                         |                    | <b>0,035</b>    | <b>0,079</b> |
| Rigidez (ajustado) 20°C              | UNE EN 12697-26. C | 2.728           | 3.865        |
| Fatiga $\epsilon_6$                  | UNE EN 12697-24. D | 272             | 142          |
| E max                                | UNE EN 12697-44    | 1,72            | 1,22         |
| Tensión                              |                    | 4,45            | 4,45         |
| Tensión de fractura                  |                    | 27,18           | 27,14        |

para superar los problemas que el uso de fibras de celulosa en estado normal puede acarrear y que, básicamente, se deben a su bajísima densidad aparente, lo que lo convierte en un producto que requiere una fabricación precisa y en principio, de muy difícil manipulación. Como los tiempos de amasado en las plantas asfálticas son muy cortos y los esfuerzos de cizalla muy grandes, se necesita un producto que, por un lado, permita una incorporación automatizada para reducir errores y favorecer una calidad homogénea de la producción, y por otro lado, se adapte a esos intervalos de tiempo tan cortos pero con esfuerzos muy intensos.

La industria ha desarrollado los gránulos de fibras de celulosa de forma que la densidad del producto aumenta hasta un rango entre 400 y 600 gr/l, lo que permite el uso de equipos gravimétricos para ajustar masas de entre 3 y 5 kg por tonelada de mezcla, así como el empleo de sistemas neumáticos para su impulsión hasta la cámara de amasado. La forma más eficiente de granular es mediante el empleo de alguna sustancia que aglomere las fibras. Se encuentran diferentes opciones en el mercado, como diferentes tipos de ceras u otros aglomerantes, pero el más habitual es el empleo de betún por tratarse de la misma sustancia que interviene en la fabricación del aglomerado asfáltico y por lo tanto, presenta una excelente afinidad que convierte esta opción en la más efectiva para una rápida y homogénea dispersión de las fibras en toda la masa.

### **MEZCLAS SMA ESPECIALES**

La segunda fase del Proyecto SMA comprende el estudio de mezclas con propiedades mejoradas, denominadas SMA especiales o XSMA. Las líneas de estudio consideradas lo han sido en tanto en cuanto potencian el carácter sostenible y/o medioambientalmente amigable de las mezclas. Así pues, las mezclas planteadas han sido las siguientes:

- Mezclas con un contenido de huecos de entre el 8 y el 12%, frente al contenido entre el 3 y el 5% de

las SMA de referencia, para contenidos de betún entre el 6,5 y el 7%. Con estas mezclas se pretenden conseguir reducciones sensibles en el ruido de rodadura.

- Mezclas con un contenido de betún de hasta el 9%, aproximadamente, comparado con el contenido del 6% de las SMA de referencia. El objetivo de este tipo de mezcla sería incrementar todavía más la vida útil de las mezclas bituminosas así como diseñar aglomerados que puedan emplearse para pavimentar firmes de hormigón con garantías de éxito en su resistencia a la progresión de fisuras de reflexión.
- Mezclas tipo SMA, a temperaturas inferiores en, al menos, 30 °C, a las de las mezclas convencionales, bien utilizando betún, bien utilizando emulsión como ligante. Obviamente la reducción de la temperatura de fabricación y puesta en obra implica una reducción de la energía consumida durante el proceso. Colateralmente, el betún de una mezcla fabricada a menor temperatura sufriría una menor oxidación aumentando la durabilidad ante el fenómeno de envejecimiento del ligante.
- Mezclas con incorporación de materiales residuales como polvo de caucho de NFU o material reciclado del pavimento. Este tipo de mezclas contribuirían a dar una salida a un residuo industrial que supone un gran problema de gestión en nuestras sociedades o a la reducción en el consumo de materias primas vírgenes en la fabricación de las mezclas asfálticas.

Como parte del trabajo de investigación se ha procedido a un estudio pormenorizado de diferentes fibras con aditivos que facilitan o potencian la consecución de las diferentes propiedades perseguidas con estas SMA especiales.

En todos los casos se han empleado las fibras de celulosa como base del aditivo final ya que, por un lado, todas las mezclas siguen teniendo altos contenidos de ligante, y por otro lado, se trata de una sustancia muy indicada para hacer de soporte de otros productos.



## ADITIVOS ESTABILIZANTES PARA LAS SMA ESPECIALES

Partiendo de las fibras de celulosa granuladas con betún empleadas para la caracterización de las SMA de referencia, seguidamente se han identificado los compuestos químicos que pueden modificar las mezclas en la dirección planteada para cada uno de los objetivos expuestos anteriormente, para luego ver si es posible combinarlos con las fibras de celulosa.

La posibilidad de combinar las fibras de celulosa con aditivos modificadores del comportamiento de la mezcla será interesante en la práctica cuando estos aditivos no fuera posible, por razones técnicas o tecnológicas, usarlos mezclados con el ligante.

### Mezclas con alto contenido en huecos

La primera de las mejoras planteadas hace referencia a unas mezclas con un mayor porcentaje de huecos respecto a las SMA normales. Para ello se han fabricado, estudiado y ensayado mezclas con un porcentaje de huecos en mezcla de un 10%, manteniendo una cantidad de ligante mínima del 6% sobre áridos. Lo que se persigue con este tipo de mezcla es disminuir el ruido producido en el contacto entre el neumático y el pavimento, al tiempo que se conservan las prestaciones superficiales de las mezclas SMA asociadas a una excelente textura superficial (Brosseaud et al., 2006; Miranda, L. 2011; Lucas, F.J. 2011).

Los resultados de la caracterización en laboratorio han sido muy buenos con índices de resistencia conservada, ITSR, superiores al 90% y valores del ensayo de pista menores al 0,07. Al mismo tiempo, los estudios de resistencia a la fatiga y a la fisuración han dado muy buenos resultados, comparables, e incluso algo mejores en ciertos aspectos, que los de las SMA de referencia.

En cuanto al comportamiento acústico, estas mezclas no producen un efecto apreciable en la capacidad de absorción sonora de probetas. De hecho, en los tramos de ensayo construidos con este tipo de mezclas se ha apreciado que influye

más el tamaño máximo de árido que el porcentaje de huecos en mezcla.

El problema que se plantea con estas mezclas a la hora de sujetar y repartir el ligante es que hay menor superficie específica. Una posible solución sería aumentar la dotación de polvo mineral pero ello puede conducir a problemas de adhesividad insuficiente, mal reparto del mástico, excesiva rigidez de la mezcla final y pobre trabajabilidad. Por ello, la conclusión es que la forma más sencilla y eficiente de retener dicho ligante y asegurarnos un buen reparto de forma que se obtenga una capa gruesa y uniforme alrededor de los áridos es aumentar la dotación de fibras de celulosa. Desde el año 2008, se vienen produciendo en Alemania mezclas de tipo PA con altos contenidos de ligante y el uso de fibras de celulosa está dando muy buenos resultados.

Por todo ello, para esta primera línea de desarrollo se ha optado por emplear las mismas fibras de celulosa recubiertas con betún y granuladas empleadas para las mezclas SMA de referencia en una dotación mayor.

También se considera que la incorporación de fibras de celulosa con poliamidas de ácidos grasos podría ser ventajosa dado que estas retrasan el envejecimiento del betún. Esta característica puede ser muy relevante para mezclas que por contener un mayor porcentaje de huecos sufren una mayor exposición a los agentes climáticos y a los ataques químicos de los derrames de los vehículos (Woodside et al., 1989). No obstante, ha resultado imposible estudiar todas las combinaciones posibles, por lo que esta opción se ha dejado para futuros desarrollos.

### Mezclas con alto contenido en ligante

Esta línea de trabajo persigue conseguir unas mezclas con contenidos de ligante en el entorno del 9% sobre áridos que puedan servir para alargar la vida útil de las mezclas y ser muy poco susceptibles a la fatiga y a las fisuras de reflexión.

La fabricación de una mezcla de estas características presenta dos grandes retos. Por un lado, requiere el empleo de un ligante modificado con polímeros, lo

que debería dificultar enormemente su trabajabilidad. Por otro lado, hay que ser muy cuidadoso con la susceptibilidad a las deformaciones plásticas.

La susceptibilidad a las deformaciones plásticas queda cubierta por la estructura discontinua del esqueleto mineral de estas mezclas. Así, en los diferentes ensayos y pruebas que se han realizado en el Proyecto SMA, tanto por parte de Elsan y Eiffage, como por parte de las OPIs, se han obtenido mezclas con valores del ensayo en pista WTS inferiores a 0,03. Asimismo, los resultados de la sensibilidad al agua permanecen por encima del 90% y el resto de valores son similares a las mezclas SMA de referencia.

En cuanto al problema de la trabajabilidad se ha considerado la incorporación de fibras de celulosa en mayor dotación y combinadas con un aditivo que facilite su extensión y compactabilidad. De la revisión de los productos químicos que pueden ayudar a conseguir dicho objetivo se ha determinado que el que mejor cumple los requisitos perseguidos son las ceras Fischer-Tropsch. Se ha combinado este tipo de aditivo con las fibras de celulosa para disponer de un producto que permita, por un lado, incrementar la cantidad y reparto del ligante en una mezcla, y por otro, permitir la modificación inducida por la cera en el comportamiento de la mezcla.

En la determinación de la resistencia a la fatiga y a la progresión de fisuras se ha visto que este tipo de mezclas presentan unos resultados excepcionales, tal como se esperaba, con valores  $\geq 6$  superiores a 300 microdeformaciones.

### **Mezclas con temperaturas de fabricación menores**

Dentro de este campo, se persigue reducir la temperatura de fabricación en, al menos, 30 °C con el objetivo de disminuir el consumo de combustible, y por tanto, de emisiones, necesario para fabricar las mezclas.

Se contemplan dos líneas de trabajo. Una empleando como ligante betún convencional y empleando un proceso especial de fabricación, y una segunda en la que se recurrirá al empleo de emulsiones bitu-

minosas que de por sí ya implican menores temperaturas de fabricación.

Para la línea de mezclas con betún, los ensayos realizados muestran que las SMA 11 presentan valores similares a la mezcla de referencia, tanto en términos de sensibilidad al agua (ITSR en torno al 90%), como en términos del ensayo de pista (WTS inferior a 0,03 para mezclas fabricadas con betún modificado con polímeros y algo mayores para mezclas fabricadas con betún convencional). En cuanto a las mezclas SMA16 son mezclas con algo más de sensibilidad al agua (valores de ITSR en torno al 75%), así como una mayor susceptibilidad a las deformaciones plásticas con valores del ensayo de pista, WTS, superiores al 0,07.

En todos los casos, los resultados de los ensayos para determinar la resistencia a la fatiga y a la progresión de fisuras han sido similares, aunque algo menores, que los de las mezclas de referencia; pero en cualquier caso, muy superiores a los de una mezcla AC 16.

En todas estas mezclas se ha recurrido al uso de fibras de celulosa combinadas con cera Fischer-Tropsch ya que dicho producto también permite la fabricación de mezclas bituminosas a menor temperatura.

La segunda línea de trabajo, empleando emulsiones bituminosas, resulta algo más complicada por la falta de referencias y experiencias previas. Las mezclas que emplean emulsiones suelen tener un proceso de fabricación distinto al de las mezclas calientes, no interviniendo amasados enérgicos. Ello hace que la dispersión de cualquier aditivo en la mezcla requiera un canal de dispersión específico. Por otra parte, cualquier aditivo que se emplee, ya sea para estabilizar el ligante, ya sea para modificar alguna propiedad de la mezcla, debe respetar los tiempos de rotura de la emulsión para no introducir cambios sustanciales en los procesos de modificación y puesta en obra.

Por otro lado, este tipo de mezclas podrían requerir solamente una fibra estabilizante para el ligante extra incorporado, lo que puede reducir el abanico de productos a considerar.

Para esta línea de trabajo se ha pensado inicialmente en probar un tipo de fibras de celulosa sin recubrir ni combinar con otro aditivo, para mezclarlas con el agua que interviene en el proceso y estudiar la bondad de este planteamiento. Los resultados iniciales son muy prometedores en tanto en cuanto se ha conseguido fabricar en laboratorio mezclas en frío con dotaciones de ligante muy altas.

### **Mezclas que incorporan materiales residuales**

El objetivo de esta línea de trabajo es desarrollar mezclas que por incorporar materiales reciclados, ayuden a reducir la generación de residuos de difícil reutilización. Dos son los residuos contemplados en este proyecto: el caucho procedente de NFU y el material reciclado procedente de pavimentos demolidos o fresados. Ambos residuos están recogidos dentro del Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015, el primero en su punto 8 y el segundo en su punto 12.

Dentro del Proyecto SMA se han analizado diversas mezclas con NFU, empleando fibras de celulosa con ceras en la caracterización de laboratorio. Los resultados han mostrado unas mezclas con una sensibilidad al agua similar o superior a la de la mezcla de referencia, e igual resultado para la susceptibilidad a la deformación permanente (WTS inferior a 0,03). La caracterización acústica de las mezclas en laboratorio no ha arrojado resultados diferentes a los de las mezclas de referencia. Los ensayos de resistencia a la fatiga y a la progresión de fisuras muestran que se trata de mezclas más rígidas y con unos resultados inferiores a las SMA de referencia aunque superiores a los de una mezcla tipo AC 16.

En cuanto a la incorporación de material procedente de la demolición o fresado de pavimentos asfálticos, se han estudiado mezclas con tamaño máximo de árido 11 y 16 mm que incorporan porcentajes de material fresado del 10 y el 20%.

Para su fabricación se han empleado fibras de celulosa combinadas con un aditivo retardador del envejecimiento del betún. Cuando se emplea material procedente del reciclado de pavimentos, el betún

que se incorpora puede presentar un alto grado de envejecimiento. Por ello, la inclusión de aditivos que puedan retrasar este proceso podría suponer una prolongación de la vida útil de la mezcla respecto a una en la que no se añada este tipo de aditivo. El producto que se ha revelado con mayores posibilidades para este fin es la poliamida de ácidos grasos, puesto que además de favorecer la envuelta de los áridos por el betún, podría dilatar los procesos de envejecimiento del mismo.

Los resultados de la caracterización de las mezclas estudiadas ofrece unos resultados en línea con los de las SMA de referencia, con valores de sensibilidad al agua, ITSR, en torno al 86% y valores de resistencia a las deformaciones plásticas, WTS, en el entorno del 0,03 para las XSMA11 y en el entorno del 0,055 para las XSMA16.

### **CONCLUSIONES**

El proyecto Mezclas SMA de la familia de la norma UNE EN 13108-5 que sean Sostenibles, Medioambientalmente Amigables (Proyecto SMA, financiado por el Centro Tecnológico para el Desarrollo Industrial, CDTI, con fondos FEDER) consta de dos grandes partes. Una primera dedicada a la adaptación a las condiciones españolas de las mezclas SMA convencionales, y una segunda parte enfocada al desarrollo de mezclas que basándose en los principios constitutivos de las SMA convencionales, permitan la potenciación de aspectos funcionales y de reducción del impacto medioambiental contribuyendo a la mayor sostenibilidad de la construcción y conservación de los firmes de carreteras.

Mediante la revisión bibliográfica y de la experiencia internacional, así como de los estudios de caracterización desarrollados por los miembros del consorcio, se ha concluido que para las mezclas SMA de referencia (mezclas tipo SMA 11 y SMA 16) el mejor producto estabilizante son las fibras de celulosa recubiertas de betún y granuladas ya que no sólo actúa como inhibidor del escurrimiento, sino que contribuye al reparto homogéneo del ligante favoreciendo la formación de una película gruesa y homogénea alrededor de los áridos y eso redundará

en unas prestaciones superiores de las mezclas tipo SMA. Asimismo, el formato de presentación de estas fibras permite la automatización del almacenado, dosificación e incorporación en la amasadora, contribuyendo a una producción de calidad constante y uniforme.

Para las mezclas SMA especiales (con alto contenido en huecos, con alto contenido en ligante, fabricadas a menor temperatura, y que incorporan materiales residuales) se han estudiado diversos aditivos que facilitan y/o mejoran la fabricación de estas mezclas. Así pues, además de las fibras de celulosa recubiertas con betún y granuladas se han estudiado compuestos de fibras de celulosa con los siguientes aditivos:

- Ceras de Fischer Tropsch
- Zeolitas
- Poliamida de ácidos grasos
- Fibras de celulosa sin recubrir

Estas nuevas fibras con aditivos incorporados han permitido realizar, en la mayoría de los casos, estas mezclas SMA con propiedades especiales de acuerdo con las especificaciones contenidas en la caracterización de las SMA de referencia, manteniendo las propiedades no alteradas en órdenes de magnitud similares y alcanzando en cada caso los objetivos perseguidos para la característica sujeta a mejora.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Alarcón, J. (2003) "Estudio del comportamiento de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta" Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Inge-

nieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña.

Brosseaud, Y.; Anfosso-Lédée, F. (2006) "Pavimentos con un reducido nivel de ruido superficial y una elevada adherencia: resumen de la experiencia francesa" Carreteras: Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera, ISSN 0212-6389, Nº. 148, 2006, págs. 83-92.

Hallberg, L.; Kärman, E. "Life Cycle Assessment – LCA of the utilisation of used tyres" Artículo de Svensk Däckåtervinning AB (SDAB). [www.sdab.se/admin/filer/Life\\_cycle\\_assessment.pdf](http://www.sdab.se/admin/filer/Life_cycle_assessment.pdf).

Lucas, F.J. (2011) "Proyecto Asfaltos Verdes" Ponencia en la I Jornada sobre Mezclas Bituminosas Sono-Reductoras (MBSR): I+D+i. Universidad de Castilla La Mancha, Ciudad Real 12 de abril de 2011.

Miranda, L. (2011) "Proyecto SMA (CDTI, IDI-20100936)" Ponencia en la I Jornada sobre Mezclas Bituminosas Sono-Reductoras (MBSR): I+D+i. Universidad de Castilla La Mancha, Ciudad Real 12 de abril de 2011.

Organización Mundial de la Salud, European Centre for Environment and Health, "Health Effects of Black Carbon", 2012, [www.euro.who.int/en/what-we-publish/abstracts/health-effects-of-black-carbon](http://www.euro.who.int/en/what-we-publish/abstracts/health-effects-of-black-carbon).

Redondo, S.; Amor, J.I.; Felipo, J.; Costa, A.; Páez, A.; Valor, F.; Potti, J.J. (2010) "Study of additives to reduce the viscosity of the binder at high temperatures" Proceedings of the 16th World Road Meeting, paper n 579.

Woodside, A.R. MacCool, P.D. (1989) "The Use of Adhesion Agents and Their Effect", 4th Eurobitume Congress, Madrid 1989.