

MEZCLAS SMA (STONE MASTIC ASPHALT), SOSTENIBLES Y MEDIOAMBIENTALMENTE AMIGABLES

ANDRÉS COSTA
ELSAN S.A.

JAVIER LOMA
ELSAN S.A.

MARÍA ELENA HIDALGO
EIFFAGE INFRAESTRUCTURAS S.A.

JOSÉ ANTONIO HERGUETA
EUROCONSULT

FERNANDO SÁNCHEZ
EUROCONSULT

SANTIAGO LANCHAS
RETTENMAIER IBÉRICA

RUY NÚÑEZ
RETTENMAIER IBÉRICA

RAFAEL JIMÉNEZ
CEDEX

FÉLIX E. PÉREZ
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

RAMÓN BOTELLA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

SANTIAGO EXPÓSITO
LABORATORIO DE ACÚSTICA APLICADA DE LA UCLM

VICTORIANO FERNÁNDEZ
LABORATORIO DE ACÚSTICA APLICADA DE LA UCLM

JUAN JOSÉ POTTI
EUCAT

MEZCLAS SMA (STONE MASTIC ASPHALT), SOSTENIBLES Y MEDIOAMBIENTALMENTE AMIGABLES

RESUMEN

Las denominadas mezclas bituminosas en caliente SMA (Stone Mastic Asphalt) están recogidas en la normativa UNE EN 13108-5 y aunque en España apenas se han utilizado, su uso está extendido por todo el mundo.

Un grupo de empresas y algunos centros de investigación españoles, han realizado un proyecto de investigación denominado: Mezclas SMA de la familia de la norma UNE EN 13108-5 que sean Sostenibles, Medioambientalmente Amigables. Financiado por el Centro Tecnológico para el Desarrollo Industrial (CDTI) con fondos FEDER entre el 1 de enero de 2010 y el 30 de junio de 2013.

El Proyecto ha tenido dos objetivos fundamentales.

- Una primera etapa que ha consistido en el estudio y desarrollo de las mezclas SMA para su empleo en España procediendo a definir unos husos granulométricos y unas características para este tipo de mezclas, atendiendo a los materiales que habitualmente se emplean; áridos, aditivos estabilizantes (fibras) y ligantes. Como resultado de esta primera etapa se ha elaborado una propuesta de Pliego de Prescripciones Técnicas para las mezclas SMA en España.
- Una segunda etapa que ha tenido por objetivo el desarrollo de unas mezclas de la familia SMA

que las hagan más sostenibles y contribuyan a mejorar el medioambiente. En este sentido, se han diseñado mezclas de la familia SMA (norma europea UNE EN 13108-5) con un elevado contenido de ligante (alrededor del 9% en peso de árido), con un mayor contenido de huecos en mezcla (llegando hasta el 12%) tratando de conseguir un mejor comportamiento en cuanto a reducir el ruido de rodadura de los vehículos, con una reducción del consumo energético en su fabricación al fabricarlas con betún asfáltico o con emulsión en forma de mezclas templadas (temperatura inferior a 100°C) e incluso en frío (a temperatura ambiente), y por último se han diseñado con la incorporación tanto de polvo de caucho de neumáticos fuera de uso como con la incorporación de material procedente del fresado de firmes bituminosos envejecidos. En todos los casos los resultados han sido buenos tanto a nivel de laboratorio como en los tramos de ensayo a escala real realizados.

La comunicación describe los trabajos realizados y los resultados finalmente obtenidos, especialmente con las mezclas SMA especiales desde el punto de vista medioambiental.

Palabras Clave:

Stone Mastic Asphalt, SMA, pavimentos sonorreductores, mezclas bituminosas templadas, fibras de celulosa.

1. INTRODUCCIÓN

Entre enero de 2010 y junio de 2013, las empresas españolas:

- Eiffage Infraestructuras S.A.
- Asfaltos y Construcciones Elsan (Grupo OHL S.A.)
- Rettenmaier Iberica S.L. y Cia. S. Com.
- Euroconsult S.A.
- Mantenimiento y Construcción de Equipos de Auscultación S.L.

En colaboración con los Centros de Investigación y Universidades españolas siguientes:

- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).
- Universidad Politécnica de Cataluña.
- Laboratorio de Acústica Aplicada a la Ingeniería Civil de la Universidad Castilla La Mancha (LA²IC).
- Centro Tecnológico Europeo del Asfalto (EUCAT).

Han desarrollado un Proyecto de Investigación denominado: **“Mezclas SMA de la familia de la norma UNE EN 13108-5 que sean Sostenibles y Medioambientalmente Amigables”** financiado por el Centro Tecnológico para el Desarrollo Industrial (CDTI) de España, con Fondos FEDER.

El objetivo general de este proyecto ha sido el desarrollo de nuevas mezclas de tipo SMA con las que se consigan mejoras, tanto en sus propiedades como en su comportamiento medioambiental (mezclas más amigables con el medio ambiente).

La consecución del objetivo general se ha alcanzado a través de la consecución de los siguientes objetivos específicos:

- Aumentar la durabilidad de las mezclas bituminosas utilizadas actualmente en España, como míni-

mo en un 25%, disminuyendo la periodicidad en la realización de reparaciones y contribuyendo de esta forma con el medioambiente al disminuir el empleo de nuevos materiales vírgenes, así como los riesgos ambientales originados durante la construcción.

- Reducir la emisión de gases de efecto invernadero y el consumo energético fabricando las mezclas asfálticas a temperaturas inferiores a las convencionales.
- Disminuir el impacto sonoro producido por el ruido de rodadura respecto a las mezclas convencionales utilizadas en España en torno a 4 dB.
- Emplear en la fabricación de estas mezclas material reciclado procedente del fresado de pavimentos bituminosos envejecidos, en porcentajes del 10%, consiguiendo una mezcla asfáltica medioambientalmente más amigable, así como el empleo de polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU) contribuyendo de esta forma con lo indicado en el Plan Nacional Integrado de Residuos.

Dadas las ventajas que presentan este tipo de mezclas bituminosas y su escaso conocimiento y utilización actualmente en España, este proyecto ha profundizado en el estudio de este tipo de mezclas bituminosas para posteriormente poder desarrollar nuevas fórmulas del producto que permitan mejorar aún más las propiedades respecto a las actualmente empleadas, realizando las investigaciones necesarias para adaptar la formulación, e incorporar en el proceso de fabricación el empleo de materiales residuales que contribuyan a la mejora en la sostenibilidad.

El objetivo de este Proyecto se ha desarrollado en dos fases diferentes:

- **Una primera etapa que ha consistido en el estudio y desarrollo de las mezclas SMA para su empleo en España procediendo a definir unos husos granulométricos y unas características para este tipo de mezclas, atendiendo a los materiales que habitualmente se emplean: áridos, aditivos estabilizantes (fibras) y ligantes.**
- **Una segunda etapa que ha tenido por objetivo el desarrollo de unas mezclas de la familia**

SMA que las hagan más sostenibles y contribuyan a mejorar el medioambiente. Para ello se propuso el desarrollo de los tipos de mezclas SMA siguientes:

- **Formular un tipo de mezcla SMA con un mayor contenido de betún (entorno a 8,5-9,5%) frente al 6% mínimo e las mezclas SMA actuales, consiguiendo de esta forma mejorar la durabilidad de la mezcla como mínimo en un 25% más, medida a través del ensayo de fatiga.**
- **Aumentar el contenido de huecos entre 8-12%, frente a los 4-6% de las SMA actuales, para contenidos de betún de 6,5-7% intentando contribuir de esta forma a la disminución del ruido de rodadura.**
- **Conseguir una reducción en el consumo energético diseñando y fabricando estas mezclas a temperaturas inferiores a las mezclas SMA convencionales utilizando tanto betún como emulsión. También ha sido objetivo el desarrollo de este tipo de mezclas aplicando la tecnología en frío.**
- **Formular finalmente mezclas que contribuyan con el medioambiente, a partir de la introducción de una serie de productos residuales utilizados actualmente en la formulación de mezclas bituminosas, como es el caso del empleo de material reciclado así como polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso (tanto por vía seca como por vía húmeda), actuaciones éstas que hasta el momento del inicio del Proyecto no han sido utilizadas en las mezclas SMA.**

2. PRIMERA ETAPA DEL PROYECTO

En una primera etapa se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica del estado actual de desarrollo de las mezclas SMA que permitiera establecer el punto de partida de este proyecto de investigación y definir más claramente las líneas por las que debían dirigirse las innovaciones del mismo.

Del trabajo realizado se deduce que las especificaciones de este tipo de mezclas en los países estudiados presentan bastantes analogías respecto a las composiciones y métodos de ensayo para caracterizar las mezclas tipo SMA y también algunas diferencias significativas por las condiciones inherentes a cada país, lo que sin duda permite que en base a ellas hayamos podido establecer un borrador de las posibles especificaciones en España adaptándolas a las características propias de nuestra orografía, a nuestras condiciones climáticas y al espectro de cargas de tráfico de nuestro país.

En cuanto a la aplicación de las mezclas SMA, estas son adecuadas y están recomendadas en la actualidad para cualquier tipo de capa de rodadura: autopistas; aeropuertos; puertos marítimos; zonas industriales; vías urbanas y carreteras nacionales.

Como paso previo al diseño de las mezclas SMA especiales y dado el escaso conocimiento actual de este tipo de mezclas en España, se ha profundizado en el estudio de las mezclas SMA convencionales, teniendo en cuenta los materiales utilizados en España, las exigencias establecidas sobre los mismos en la normativa, así como las condiciones meteorológicas y tipo de tráfico.

Se han definido tres tipos de mezclas SMA convencionales, según el tamaño máximo nominal del árido, así hemos establecido los tipos SMA 8, SMA 11 y SMA 16. El trabajo de laboratorio de estas mezclas se ha repartido entre las Empresas Eiffage y Elsan especialistas en la fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas.

Los husos granulométricos propuestos para cada uno de los tres tipos de mezclas SMA son los que se recogen en la Tabla siguiente.

Tabla 1. Husos granulométricos. Cernido acumulado (% en masa).

TIPO DE MEZCLA	ABERTURA DE LOS TAMICES (MM)							
	22	16	11,2	8	4	2	0,5	0,063
SMA 8			100	90-100	30-45	25-35	12-22	7-9
SMA 11		100	90-100	55-80	22-33	20-30	12-20	6-10
SMA 16	100	90-100	55-80	35-55	17-35	15-25	10-18	6-10

Paras estas mezclas y una vez analizados los resultados obtenidos, se han realizado unos estudios complementarios encaminados a comprobar la incidencia, en las características mecánicas de estas mezclas, de las posibles variaciones de los componentes de las mismas. Se han variado, el contenido de ligante, la curva granulométrica del árido y el contenido de filler. Los resultados han demostrado que estas variaciones, dentro de los husos y límites marcados en la propuesta de definición de las mezclas SMA que se ha hecho en el Proyecto, no producen variaciones importantes en las propiedades y características mecánicas de las mezclas definidas, demostrando la validez de los husos e intervalos definidos para el diseño de las mezclas SMA convencionales.

Las variaciones estudiadas han sido:

- Variación en el porcentaje de betún: a partir del betún óptimo (6%) se han probado los siguientes contenidos de ligante sobre árido: 5,7%, 6,5% y 7%.
- Variación en la curva granulométrica: se han probado modificaciones del contenido de arena en la mezcla con respecto al de referencia, con un porcentaje de arena superior (granulometría más fina, curva granulométrica más cerrada) e inferior (granulometría más gruesa, curva granulométrica más abierta) al de referencia.
- Variación en el porcentaje de filler: se han probado porcentajes por encima y por debajo del de referencia.

Estas mezclas SMA convencionales fueron evaluadas además desde el punto de vista de la durabilidad, así como en sus características acústicas. Las conclusiones que se extrajeron de los estudios realizados fueron las siguientes:

- **Se ha definido un porcentaje óptimo de ligante en torno al 6% s/a para diferentes tipos de betunes: convencionales B35/50, PMB 45-80/65 (BM3c), así como para un betún modificado con polvo de caucho de NFU tipo BC35/50, incluyendo en la formulación de las mezclas la incorporación de fibras de celulosa.**

- **Para asegurar este porcentaje de ligante se ha evaluado el escurrimiento obteniendo valores inferiores al 0,3% valor tomado como referencia a partir de la información bibliográfica que existe sobre las mezclas SMA.**
- **Uno de los aspectos fundamentales de este tipo de mezclas es su mayor durabilidad. Esta propiedad se ha evaluado por parte de dos de las OPIs (CEDEX y UPC) a partir de los ensayos FENIX, EBADE, compresión cíclica triaxial, SCB y el ensayo normalizado europeo de fatiga en cuatro puntos UNE EN 12697-24 anexo D, así como también aplicando un método desarrollado por el CEDEX para evaluar la propagación de fisuras.**

Estas mezclas SMA fabricadas con ligantes modificados con polímero o con polvo de neumático muestran una mayor resistencia a la fisuración, destacando que con el empleo de BC35/50 los valores de rigidez son ligeramente superior que cuando se emplea un betún modificado con polímero tipo PMB 45-80/65. Igualmente, este último presenta una mayor resistencia a la fisuración y un mejor comportamiento a fatiga.

El criterio convencional de fallo descrito en la norma UNE-EN 12697-24, del 50% del módulo inicial, no es adecuado para este tipo de mezclas, dado que su fallo total, relacionado con la fase tres del proceso de fatiga en la cual se da lugar la propagación de fisuras, tiene lugar para valores del módulo muy inferiores al definido por este criterio.

Como conclusión general de la evaluación del comportamiento a fatiga y a la fisuración se ha constatado la mayor durabilidad de estas mezclas frente a las habitualmente empleadas en España por su buena resistencia a fatiga y elevadas prestaciones.

- **Otro aspecto que se ha tenido muy en cuenta en el estudio de este tipo de mezclas es su comportamiento frente al ruido de rodadura a través de las medidas de absorción acústica.**

ca. En este sentido, no se aprecian diferencias significativas en los espectros en función del tipo de ligante utilizado, para mezclas con contenidos de huecos en mezcla de alrededor del 5 %.

Para poder conseguir mezclas bituminosas tipo SMA sono- reductoras se tendrá que intentar optimizar la textura superficial de las mezclas en servicio (macrotectura) y/o aumentar su capacidad de “amortiguamiento de impactos”, o aumentar suficientemente el contenido en huecos interconectados.

Tampoco se aprecian diferencias significativas en los espectros de absorción en función del tipo de árido utilizado.

Los resultados del análisis sobre el tramo de ensayo ejecutado a partir de los datos georeferenciados nos indican que los valores globales LCPtr dB(A) para las mezclas SMA11 y SMA16 después de ser extendidas son aceptables para la reducción del ruido asociado al tráfico rodado; podrían ser catalogadas ambas mezclas como MBSR Clase C. El comportamiento de la mezcla SMA 16 es relativamente mejor a bajas velocidades que a elevadas. El estudio de los mecanismos de generación de ruido nos indica que a elevada velocidad, la mezcla SMA16 presenta menores contribuciones de los mecanismos de impacto y vibraciones que la mezcla tipo SMA11. Por el contrario, los mecanismos aerodinámicos dominan en las mezclas con mayor tamaño máximo de árido.

3. SEGUNDA ETAPA DEL PROYECTO

En esta segunda etapa el objetivo ha sido el desarrollo de unas mezclas que, estando dentro de la familia de las mezclas SMA según la norma UNE EN 13108-5, se consigan mejoras tanto en sus propiedades como en su comportamiento medioambiental. Para distinguir estas mezclas especiales de las SMA normales, las hemos denominado XSMA. Los tipos de mezclas especiales desarrollados han sido los siguientes:

3.1. MEZCLAS XSMA CON ALTO CONTENIDO DE LIGANTE

Como mezclas XSMA con alto porcentaje de ligante se definen las mezclas bituminosas en caliente que responden a los criterios definidos en la Norma UNE-EN 13108-5 y cuyo contenido de ligante se sitúa alrededor del 9 % sobre el peso de los áridos.

Generalmente los contenidos de ligante de las mezclas SMA se encuentran entre el 6 y 7 %. Introducir en una mezcla bituminosa un 9 % de betún (en torno al 30-40 % más), permite obtener mezclas para utilizar en diferentes aplicaciones: mezclas antifisuras, mezclas con elevada durabilidad, renovaciones superficiales especiales, etc... La mayor durabilidad, la elevada flexibilidad y el mejor comportamiento a fatiga de estas mezclas permite, en unos casos reducir el espesor total de mezcla bituminosa necesario para evitar la reflexión de grietas producidas por capas inferiores del firme tratadas con conglomerantes hidráulicos, en otros casos alargar de manera importante la vida útil del firme retrasando las actuaciones de conservación y reposición necesarias, lo que repercute claramente en el consumo de materias primas y en la emisión de gases de efecto invernadero a la atmosfera por la realización de las obras. Esto compensa claramente, desde el punto de vista ambiental, el incremento de consumo de ligante que supone aumentar en 3 puntos porcentuales dicho contenido en la mezcla bituminosa.

Para esta línea trabajo se han estudiado dos curvas granulométricas correspondientes a los dos tipos de mezclas SMA 16 y SMA 11 definidos como mezclas SMA convencionales.

El trabajo de la Universidad Politécnica de Cataluña ha consistido en caracterizar mecánicamente el comportamiento de todas las mezclas SMA convencionales y especiales desarrolladas en el Proyecto, especialmente viendo su comportamiento a fatiga y su resistencia a la fisuración. Una vez obtenidos y analizados los resultados de todos los ensayos aplicados a las mezclas de estudio, se concluyó que las mezclas SMA especiales (XSMA) con alto contenido en betún y las de alto contenido en huecos (que veremos a continuación) mostraron una ductilidad y resistencia a la fisuración por fatiga claramente superior al resto de mezclas.

Estas mezclas están perfectamente definidas y de los ensayos de laboratorio es posible asegurar que se pueden diseñar, fabricar y poner en obra perfectamente y su comportamiento bajo la acción del tráfico será correcto.

Se han realizado tres tramos de ensayo con este tipo de mezclas, demostrándose que a nivel industrial se pueden fabricar y poner en obra sin problema alguno, teniendo un muy buen comportamiento al menos a corto plazo (menos de dos años), que es la experiencia que actualmente se tiene con estos tramos de ensayo.

3.2. MEZCLAS XSMA CON ALTO CONTENIDO DE HUECOS

El objetivo de estas mezclas SMA especiales (XSMA) ha sido obtener una nueva formulación para aumentar el contenido de huecos y situarlo entre 8-12%, frente a los 4-6% de las SMA normales, para contenidos de betún del 6 %, intentando contribuir de esta forma a la disminución del ruido de rodadura, y al aumento de la resistencia al deslizamiento del firme.

Es decir, se ha desarrollado una formulación que permite disponer de un firme con un esqueleto mineral y una macrotextura que aumenta el contenido de huecos y la resistencia al deslizamiento, buscando conseguir una disminución del ruido producido por la interacción neumático-pavimento.

Se han propuesto y desarrollado dos mezclas denominadas XSMA11 y XSMA8 (se ha propuesto una mezcla con un tamaño máximo menor para así conseguir la disminución del ruido de rodadura debido a la disminución de los mecanismos de impacto).

La mezcla XSMA11 con alto contenido de huecos presenta una resistencia a la fisuración evaluada mediante los ensayos FENIX y CEDEX algo inferior a la de la mezcla convencional de referencia, SMA11.

La mezcla XSMA11 con alto contenido en huecos presenta un módulo inferior a la mezcla SMA11 convencional, y su ductilidad es ligeramente superior. Así mismo su deformación de fallo a fatiga es ligeramente superior.

En cuanto al comportamiento acústico, las mezclas XSMA 11, con valores de alrededor del 10 % de huecos, no producen un efecto apreciable en la capacidad de absorción sonora de probetas. La mejoras apreciables en el comportamiento acústico de este tipo de mezclas XSMA puestas en obra, podría venir, junto con el pequeño incremento de absorción sonora observado, de la optimización de su textura superficial y/o por la disminución de la impedancia mecánica (stiffness) con la incorporación, por ejemplo, de polvo de caucho.

En dos tramos de ensayo realizados con mezclas XSMA 8 con alto % de huecos se han obtenidos reducciones del ruido de rodadura medido por el método de proximidad (CPX) variable entre 4 y 6 dBA menos del que se obtiene en los tramos contiguos con mezclas bituminosas convencionales envejecidas.

3.3. MEZCLAS XSMA CON INCORPORACION DE POLVO DE CAUCHO DE NEUMATICOS FUERA DE USO (NFU).

Se ha diseñado una mezcla SMA 11 especial incluyendo, dentro de su composición, el empleo de un material residual como es el polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso. Este concepto es una importante innovación puesto que supone una novedad respecto a las materias primas utilizadas actualmente en las mezclas tipo SMA, y su incorporación en la formulación influirá en la composición de los restantes componentes.

Mediante los neumáticos, tras un proceso de trituración y clasificación de sus componentes, se obtiene polvo de caucho que por sus propiedades permite ser empleado en la modificación de las mezclas bituminosas ya sea sobre el ligante (conocido el proceso como vía húmeda) o bien directamente sobre la mezcla, incorporando el polvo como si fuera un árido más (conocido el proceso como vía seca).

Como mezcla de referencia se ha elegido la SMA 11 y como ligante se han utilizado, un betún convencional tipo 35/50 para la incorporación del polvo de caucho por vía seca, y un betún tipo

BC 35/50 cuando se ha utilizado la vía húmeda. Como fibra se ha utilizado la denominada Viatop Plus CT40.

En relación a las mezclas XSMA con incorporación de polvo de NFU del estudio de laboratorio se han podido sacar las conclusiones siguientes:

- *Presenta un comportamiento similar a la SMA11 convencional de referencia en cuanto a sensibilidad al agua y resistencia a la deformación permanente y presenta una ventaja desde el punto de vista de desarrollo sostenible ya que se reutiliza materiales residuales (polvo de caucho) para su fabricación. Este polvo de caucho en los tramos de ensayo se ha empleado como agente estabilizante en sustitución de las fibras de celulosa.*
- *En relación al comportamiento acústico, se ha visto que la absorción sonora en las probetas es similar a las mezclas SMA convencionales, por lo que al igual que en el caso de las mezclas XSMA con alto porcentaje de huecos, la mejoras apreciables en el comportamiento acústico de este tipo de mezclas XSMA puestas en obra, vendrá de la optimización de su textura superficial y/o por la posible disminución de la impedancia mecánica (stiffness) con la incorporación de polvo de caucho, de la mezcla en servicio.*
- *La resistencia a la fisuración de la mezcla XSMA fabricada con incorporación de NFU por vía seca es inferior a la de la mezcla SMA11 convencional de referencia.*
- *Los ensayos EBADE y de fatiga en 4 puntos han mostrado que la mezcla XSMA 11 con NFU presenta un comportamiento a fatiga ligeramente inferior al de una mezcla SMA 11 fabricada con un ligante modificado con polímero, pero a su vez muy superior al comportamiento a fatiga de una mezcla convencional tipo AC16S fabricada con un ligante convencional B 50/70.*
- *La rigidez de la mezcla fabricada con betún convencional y polvo de NFU es superior a la de la mezcla SMA11 convencional fabricada con ligante modificado con polímero y con fibras de celulosa.*

3.4. MEZCLAS XSMA FABRICADAS A MENOR TEMPERATURA

Se han diseñado mezclas bituminosas de la familia SMA fabricadas a temperatura inferior a 100°C, correspondiendo al tipo que en España se denominan mezclas templadas (utilizando como ligante tanto betún asfáltico como emulsión) y mezclas a temperatura ambiente que se corresponden con las denominadas mezclas en frío fabricadas exclusivamente con emulsión bituminosa.

En lo que respecta a las mezclas XSMA templadas (< 100°C) fabricadas con betún, las conclusiones derivadas del estudio realizado en el proyecto son:

- *Es posible fabricar mezclas SMA especiales a temperaturas inferiores a 100°C*
- *El comportamiento resulta similar al de una mezcla SMA convencional. Esto se desprende además de los resultados obtenidos sobre los ensayos convencionales de caracterización como de los obtenidos en los ensayos adicionales realizados por los Organismos de Investigación que colaboran en este proyecto (caracterización acústica y deformación permanente por ensayo de compresión cíclica triaxial).*
- *La mezcla XSMA 11 templada presenta una resistencia a la fisuración muy similar al de una mezcla SMA 11 convencional, fabricada a temperaturas muy superiores. Su deformación de fallo en el ensayo EBADE es muy similar a la mezcla de referencia SMA 11, aunque esta última presenta energías muy superiores. En cualquier caso, su comportamiento tanto a fatiga como frente a la fisuración será mucho mejor al mostrado por las mezclas convencionales tipo AC16S fabricadas con ligantes convencionales B 50/70 (mezcla de referencia).*

En el caso de las mezclas templadas y en frío fabricadas con emulsión, en ambos tipos de mezclas los resultados obtenidos, en cuanto a características mecánicas, son inferiores a los que se obtienen con las mismas mezclas SMA en caliente, pero son aceptables y dejan abierta la puerta para continuar el proceso de investigación, mejorando la calidad

de las emulsiones, el proceso de fabricación de las mezclas y el curado final de las mismas. El principal interés de estas mezclas está en su menor afección al medio ambiente y es recomendable continuar su desarrollo porque serán unas mezclas claramente de futuro.

3.5. MEZCLAS XSMA FABRICADAS CON LA INCORPORACION DE MATERIAL FRESADO (RAP)

La utilización de material fresado en la fabricación de mezclas bituminosas está perfectamente desarrollada y aplicada en España para las denominadas mezclas convencionales del tipo AC (Asphalt Concrete), Norma UNE EN 13108-1.

En esta fase del Proyecto de investigación se han realizado estudios de mezclas bituminosas SMA con la incorporación de material reciclado en las mezclas tipo XSMA con tamaño máximo 11 y 16 milímetros en porcentajes del 10 y 20 %. La introducción del material fresado se ha realizado de forma independiente al mezclador (ya sea de planta o laboratorio) como un árido más, con especial precaución al contenido de humedad del material original.

Se ha seguido la misma metodología de estudio que para los otros tipos de mezclas bituminosas en caliente, siguiendo las normas de ensayo UNE EN 12697.

En primer lugar se ha realizado una caracterización del material fresado, determinado el contenido de ligante y la granulometría de los áridos. Con el fin de optimizar la curva de áridos el fresado se divide en 2 fracciones separadas por el tamiz 4 milímetros.

Para cada porcentaje de material fresado previsto (10 y 20 %) y tipo de mezcla (XSMA11 y XSMA16) se ha realizado un estudio de dosificación previo con la finalidad de ajustar las curvas granulométricas de los áridos a las curvas estudiadas inicialmente en el proyecto de las mezclas SMA11 y SMA16.

Se recompone la mezcla teniendo en cuenta el porcentaje de ligante incluido en el material reciclado

para llegar a un porcentaje de betún final de un 6 % sobre el peso de los áridos (betún procedente del fresado+betún añadido).

Como era de esperar, el módulo de rigidez aumenta considerablemente (alrededor del 20%) con el aumento de la cantidad de material fresado incorporado.

Se han obtenido mezclas bituminosas especiales de la familia de la Norma UNE-EN 13108-5, denominadas XSMA, con granulometrías muy similares a las mezclas SMA de referencia, incorporando porcentajes de material fresado de un 10 y 20 %, obteniéndose unas mezclas con muy buen comportamiento, similar al de las mezclas SMA de referencia y módulos de rigidez algo mayores.

4. TRAMOS EXPERIMENTALES

El último objetivo específico del Proyecto era la realización de tramos de ensayo a escala real para comprobar la viabilidad de las mezclas definidas en laboratorio a escala industrial, para evaluar sus características superficiales (especialmente textura, resistencia al deslizamiento y ruido de rodadura) y su comportamiento bajo la acción del tráfico.

En los tramos de ensayo se han utilizado las mezclas siguientes:

- **SMA 8 normal.**
- **SMA 11 normal.**
- **SMA 16 normal.**
- **SMA 16 alto contenido de ligante (9% sobre peso de árido).**
- **SMA 11 alto contenido de huecos y con incorporación de polvo de caucho de NFU.**
- **SMA 11 alto contenido de huecos (9%) y alto contenido de ligante (7,2% S/A).**
- **SMA 11 alto contenido de huecos.**

MEZCLAS SMA (STONE MASTIC ASPHALT), SOSTENIBLES Y MEDIOAMBIENTALMENTE AMIGABLES

- **SMA 8 con la incorporación del 10% de material fresado.**
- **SMA 8 con la incorporación de polvo de caucho de NFU.**
- **SMA 11 con incorporación del 10% de material fresado.**
- **SMA 11 con alto contenido de ligante (8% sobre peso de árido).**

En la Tabla siguiente se recogen todos los tramos, localización y características de los tramos experimentales realizados con las mezclas SMA y XSMA desarrolladas en el proyecto de investigación.

En todos los casos la fabricación a escala industrial y la puesta en obra de cada una de las mezclas SMA utilizadas, ha sido de acuerdo con las Formulas de Trabajo diseñadas a partir de los resultados del tra-

bajo de investigación. El comportamiento de los tramos bajo la acción del tráfico es muy bueno, cumpliéndose los objetivos propuestos, especialmente en el caso de las mezclas con alto contenido de ligante, como soluciones anti reflexión de grietas.

Los resultados de las evaluaciones de las características superficiales que se están haciendo confirman que estas mezclas SMA pueden llegar a tener una muy buena textura (altura del círculo de arena superior a 1,2 mm.), una excelente resistencia al deslizamiento y un nivel de ruido de rodadura menor que el producido por las mezclas bituminosas convencionales, especialmente en aquellos casos que hemos utilizado como tamaño máximo del árido 8 mm.

Los cuatro primeros tramos se realizaron en 2011 y se utilizaron las mezclas SMA 8, SMA 11 y SMA 16 que se habían definido dentro del trabajo de investigación realizado en la primera etapa con las mezclas SMA convencionales.

TRAMOS DE ENSAYO DEL PROYECTO						
CARRETERA	LOCALIZACIÓN	PROVINCIA	LONGITUD TRAMO (m)	AÑO	MEZCLA	OBSERVACIONES
CV-43 Acceso desde la CV-50 a Alzira	P.K. 1+000 a 1+700	VALENCIA	700	jun-11	SMA 11	
CV-43 Acceso desde la CV-50 a Alzira	P.K. 1+900 a 2+200	VALENCIA	300	jun-11	SMA16	
CV-50	Travesía de Villamarxant. Puente sobre el río Turia	VALENCIA	150	jul-12	XSMA16	Mezcla con alto contenido de ligante (9% en peso de árido).
CALLE ISABEL ROSILLO	ALCOBENDAS	MADRID	100	nov-12	XSMA8	Con la incorporación de un 10% de material fresado
Carretera M-204, travesía de Carabaña	CARABAÑA	MADRID	450	jun-13	SMA 11	Para comparacion
Carretera M-204, travesía de Carabaña	CARABAÑA	MADRID	450	jun-13	XSMA 8	Con polvo de caucho de NFU
Carretera M-204, travesía de Carabaña	CARABAÑA	MADRID	450	jun-13	XSMA 11	Con un 10% de material procedente de fresado
A-1 Puerto de Somosierra	SOMOSIERRA	MADRID	500	jun-13	XSMA 11	Con un contenido del 8 a 8,5% de ligante
AP - 7		CASTELLON	3920	2011	SMA 16	Con betun modificado con polimeros de alta viscosidad (PMB 45-80/75)
ESTADIO VICENTE CALDERON		MADRID		2011	SMA 8	Fabricado con fibras y con BMC 3c
AP - 4	P.K. 46+300 a 45+650	SEVILLA	650	2012	XSMA ALTO % DE HUECOS	Fabricada con fibras y BM 3c
AP - 4	P.K. 45+650 a 45+000	SEVILLA	650	2012	XSMA ALTO % DE HUECOS	Fabricada con polvo de caucho de NFU
PASEO DE LOS CURAS	MALAGA	MALAGA	600	2012	XSMA 8	Fabricada con polvo de caucho de NFU
AP - 4	ALREDEDOR P.K. 70+000	SEVILLA	600	2013	XSMA 11	Fabricada con alto % de huecos (9%) y alto contenido de ligante (7,2% s/a).
PASEO DE COLON		SEVILLA	300	2013	XSMA11	Mezcla templada (temperatura < 100°C) con betún



5. CONCLUSIONES

El proyecto de investigación desarrollado ha permitido poner a punto algunos tipos de mezclas Stone Mastic Asphalt (SMA) de la Norma UNE EN 13108-5, que presentan un mejor comportamiento mecánico en unos casos y que mejoran su afeción al medio ambiente en otros.

- **Mezclas con alto contenido de ligante que compensan su afeción medio ambiental por el mayor consumo de ligante, con una mayor durabilidad y un mejor comportamiento en ciertos tipos de firmes, lo que permite reducir el espesor total de mezcla bituminosa necesario y retrasa de manera importante (una vida útil como mínimo un 25% mayor) las actuaciones de conservación y reposición del firme construido.**
- **Mezclas SMA con un menor ruido de rodadura al tener un contenido de huecos en mezcla, una textura superficial y una rigidez optimizadas.**
- **Mezclas SMA fabricadas a menor temperatura lo que supone un menor consume energético y una menor emisión de gases contaminantes a la atmosfera. Este tipo de mezclas tienen una clara proyección de futuro y con este trabajo se ha iniciado el desarrollo de las mezclas SMA fabricadas a menor temperatura, incluso a temperatura ambiente.**
- **Mezclas SMA que incorporan algunos productos que se pueden considerar como residuos (polvo de caucho de NFU y material procedente del fresado de firmes bituminosos envejecidos) manteniendo sus características mecánicas y de prestaciones. Esto permite reutilizar los residuos y disminuir la cantidad de recursos naturales nuevos necesarios.**

6. BIBLIOGRAFÍA

- (1) E.R. Brown, Hemant Manglorkar. EVALUATION OF LABORATORY PROPERTIES OF SMA MIXTURES. Research Report, Work Sponsored by NAPA and the NAPA Education Foundation, NCAT Report No. 93-5, October 1993.
- (2) E. Ray Brown, Rajib B. Mallick, John E. Haddock, John Bukowski. PERFORMANCE OF STONE MATRIX ASPHALT (SMA) MIXTURES IN THE UNITED STATES. Federal Highway Administration, NCAT Report No. 97-1, January 1997.
- (3) Arif Chowdhury, Amit Bhasin, Joe W. Button. Evaluation of Recycled Tire Fibers as Reinforcement in Different Types of Asphalt Mixtures. TRB 2007 Annual Meeting CD-ROM.
- (4) Donald E. Watson, Adriana Vargas-Nordbeck, Jason Moore, David Jared, P.E., Peter Wu, Ph.D., P.E. EVALUATION OF THE USE OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT IN STONE MATRIX ASPHALT MIXTURES. TRB 2008 Annual Meeting CD-ROM.
- (5) UNE-EN 13108-5: Mezclas Bituminosas. Especificación de materiales. Parte 5: Mezclas Bituminosas tipo SMA.
- (6) Paje S E, Bueno M, Viñuela U and Terán F. Toward the acoustical characterization of pavements: analysis of the tire/road noise emitted from a porous surface. J Acoust Soc Am 2009;125(1):5 –7.
- (7) Paje S E, Bueno M, Terán F, Miró R, Pérez-Jiménez F, Martínez A H. Acoustic field evaluation of asphalt mixtures with crumb rubber. Appl Acoust 2010;71:578 –582.
- (8) Comunicación 27, VI Jornada ASEFMA 2011. Acreditación Acústica de MBSR.
- (9) Bardesi, A. Ligantes. Mezclas bituminosas: Dosificación, Fabricación, Puesta en Obra y Control de Calidad. Nueva Orden Circular 24/2008. Documentación del Curso de INTEVIA. 2010.
- (10) Bardesi, A. Introducción a las Mezclas Bituminosas. Mezclas bituminosas: Dosificación, Fabricación, Puesta en Obra y Control de Calidad.

- Nueva Orden Circular 24/2008. Documentación del Curso de INTEVIA. 2010.
- (11) Cooley, L.A.; Brown, E.R.; Watson, D.E. (2000). "Evaluation of ogfc mixtures containing cellulose Fibers" NCAT Report 00-05.
- (12) Fernández-Cuenca, J.A. Áridos. Mezclas bituminosas: Dosificación, Fabricación, Puesta en Obra y Control de Calidad. Nueva Orden Circular 24/2008. Documentación del Curso de INTEVIA. 2010.
- (13) Jiménez, R. Rubio, B. García, J. Pérez, I. Colás, M. Caracterización reológica de un betún con caucho procedente de neumáticos fuera de uso. Revista Ingeniería Civil, CEDEX, 2007 Oct-Dic; núm. 148, págs. 97-108.
- (14) 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.
- (15) Pérez Jiménez, F. Miró Recasens, J. Martínez Reguero, A. Martínez Láinez, C. Páez Dueñas, A. Evaluación de la cohesión de betunes modificados con polvo de neumáticos. Materiales de construcción, 2006, vol. 56, no. 284, p. 43. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento.
- (16) 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.
- (17) EAPA (European Asphalt Pavement Association) (2007) "Long-life Pavements. Technical Version", Bruselas.
- (18) Paje, SE, Luong, J, Vázquez, VF, Bueno, M and Miro, R. Road pavement rehabilitation using a binder with a high content of crumb rubber: Influence on noise reduction. Construction and building materials, Volume: 47, Pages: 789-798, (2013).