

Experiencia con mezclas asfálticas sostenibles en la carretera M-607 en Tres Cantos, Madrid

Raquel Casado Barrasa,
raquel.casado.barrasa@acciona.com

Edith Guedella Bustamante,
edith.guedella.bustamante@acciona.com

Carlos Martín-Portugués Montoliu,
carlos.martinportugues.montoliu@acciona.com

El aprovechamiento de residuos para la construcción y rehabilitación de carreteras es una estrategia a potenciar para establecer relaciones de simbiosis industrial de carácter regional que permita ganar competitividad a las empresas y reducir el impacto ambiental asociado a su actividad. En este artículo se presenta un nuevo concepto de pavimento asfáltico más sostenible que incluye el uso de tecnologías más respetuosas con el medio ambiente en cada una de las capas de la sección de firme. Este firme combina algunos materiales reciclados bien establecidos junto con otros materiales de origen “bio” más novedosos. En la capa de rodadura, se utiliza lignina, sub-producto de la producción de etanol de segunda generación, en sustitución parcial del betún y polímero derivados de petróleo. En la capa intermedia y base, se incorpora material fresado en tasas medias-elevadas, gracias al uso de un agente bio-fluxante como alternativa a los rejuvenecedores y agentes fluxantes tradicionales. Finalmente, la sub-base se compone de áridos reciclados de residuos de construcción y demolición. Dicho firme ha sido validado en un tramo de prueba en el marco del proyecto europeo de investigación APSE financiado por el séptimo programa marco en la convocatoria de medioambiente. Sobre el tramo de prueba se ha realizado un estudio del comportamiento de los tipos de mezclas extendidas, evaluando desde los materiales de partida en laboratorio hasta su puesta en obra y comportamiento superficial y estructural. Además, el estudio se completó con una evaluación ambiental basada en la metodología de Análisis de Ciclo de Vida.

Palabras Clave: Asfalto, firme, reciclado, carretera, medioambiente, sostenibilidad, bio-ligantes, RCDs, economía circular.

The use of waste for the construction and rehabilitation of roads is a strategy to be boosted to establish regional industrial symbiosis agreements that can support companies to gain competitiveness and reduce the environmental impact associated to their day to day business activity. This paper presents a new concept of a sustainable road pavement that aims to maximise the use of sustainable technologies has been validated in this study. The concept pavement utilises the valorization of valuable recyclable materials alongside some more novel bio-based products. Considering the whole pavement structure, each layer comprises an innovation. In the surface course, crude derived bitumen and polymers are partially replaced with lignin, a by-product of second generation ethanol production. In the binder and base course, elevated levels of asphalt recycling are facilitated thorough the use of bio-based flux oil. Finally the sub-base is mainly composed of recycled aggregates derived from construction and demolition waste. This pavement has been validated in a test section within the APSE project under the Seventh European Research and Innovation Programme in the environmental theme. The performance of the different mixes implemented in the test section undertaken was evaluated through all the phases, from laboratory assessment to plant production, application and post-trial evaluation (superficial and structural monitoring). The study was completed by analyzing the environmental impact based on the Life Cycle Analysis.

Keywords: Asphalt, pavement, recycling, road, environment, sustainability, bio-binders, C&DW, circular economy.

Experiencia con mezclas asfálticas sostenibles en la carretera M-607 en Tres Cantos, Madrid

1. Introducción

El sector transportes es uno de los mayores consumidores de energía y materias primas, y uno de los principales emisores de gases de efecto invernadero. De hecho, según los datos publicados por la Agencia Americana de Protección Ambiental y el Departamento de Energía de Estados Unidos, el sector transportes es el segundo consumidor de energía y emisor de gases de efecto invernadero, situándose muy cerca del sector industrial y por encima del sector residencial, agricultura, comercial y de servicios [1, 2].

Es por ello que desde las propias instituciones europeas y gobiernos de los diferentes estados miembros se están promoviendo iniciativas, directivas y políticas para cambiar este hecho y se están potenciando tanto medidas para la implantación del vehículo eléctrico, como estrategias para promover el desarrollo sostenible y la transición hacia un modelo de economía circular, donde los residuos y los subproductos obtenidos al final de su vida útil entran de nuevo en el ciclo de producción como materias primas secundarias [3].

Es en este marco donde nace el proyecto APSE ("Use of eco-friendly materials for a new concept of Asphalt Pavements for a Sustainable Environment"), financiado por la Comisión Europea y liderado por ACCIONA Construcción, en consorcio con otras 10 entidades de 5 países de la UE. Se trata de una apuesta para la construcción de un modelo de carretera más sosteni-

ble dentro del modelo de Economía Circular, basada en la sustitución parcial de betún por aceites vegetales y sub-productos de la producción del bioetanol, así como en la reutilización de residuos de construcción (RCDs) o el reciclado de pavimentos agotados (RAP) en sustitución a los áridos. Todos estos materiales combinados en las distintas capas de un firme para la construcción de un firme más sostenible (Figura 1), de manera que:

- En la capa de rodadura se incorpora un betún modificado con lignina procedente de la producción del bio-etanol, subproducto de origen renovable que permite sustituir parte del betún convencional y parte de los polímeros habituales derivados del petróleo para la fabricación de betunes modificados de acuerdo a las especificaciones UNE EN 14023.

- En las capas intermedia y base, se incorpora material fresado RAP en tasas medias-elevadas, gracias al uso de un agente fluxante de origen renovable "bio" sintetizado a partir de aceites vegetales. Este aditivo permite trabajar a temperaturas convencionales, no siendo necesario un calentamiento extra de los áridos para la incorporación del material fresado, reduciendo por tanto el consumo de energía y las emisiones asociadas.

- En la subbase se utilizan áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCDs) en alternativa a la zahorra artificial.

Como resultado final del proyecto y, tras el estudio en la-

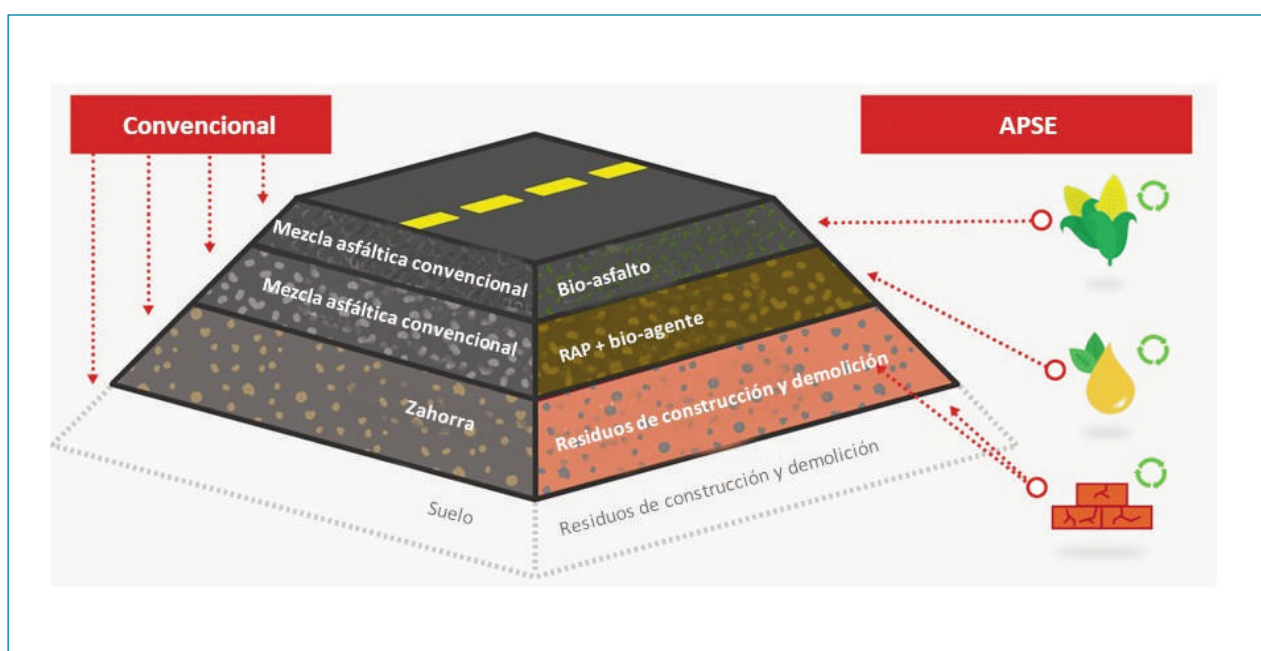
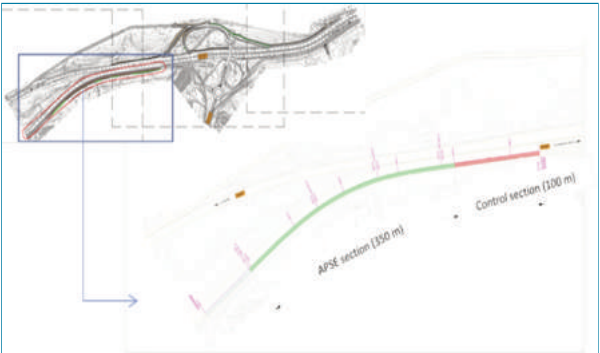


Figura 1. Concepto de firme sostenible (drcha.) frente al convencional (izda.)

boratorio del diseño del firme con los nuevos materiales objeto de investigación, así como de los ensayos acelerados en pista de ensayo, se ha validado la tecnología mediante la realización de dos tramos de ensayo en condiciones reales de uso, uno en Polonia y otro en España, con el fin de contrastar su comportamiento en el tiempo frente a las mezclas convencionales. En este artículo se presentan los resultados del tramo de ensayo realizado en Madrid, en la carretera M-607 en el término municipal de Tres Cantos.

2. Descripción del tramo experimental

El tramo experimental se ha realizado en la Comunidad de Madrid dentro del proyecto de mejora y remodelación del enlace de la M-607 con la M-616, en el término municipal de Tres Cantos. En particular, la actuación ha tenido lugar en la M-607 a su paso por la Universidad Autónoma de Madrid, en el tramo de carretera que ha incorporado un ramal del nuevo enlace, donde se ha ejecutado un tramo de 350m, en el que se han validado los materiales desarrollados, y un tramo control de unos 100m de longitud (Figura 2).



La categoría de tráfico pesado del citado tramo es T0 y considerando que se cuenta con una explanada tipo E3, en función del Catálogo de secciones de firmes de la Norma 6.1 IC (ORDEN FOM/3460/2003), se estableció la sección de firme 031, que incluye 30cm de mezcla bituminosa y una sub-base de 25cm de zahorra. Teniendo en cuenta las innovaciones planteadas, el paquete de firme para la sección experimental quedó establecido de la siguiente manera (Figura 3):

- 3 cm de capa de rodadura BBTM11B fabricada con betún modificado con polímeros y lignina que cumple con las es-

pecificaciones del Art. 212 del PG-3 para un PMB 45/80-60.

- 8 cm de capa intermedia AC22 bin D 30R y 19cm base AC32 base G 30R con betún 50/70. Mezclas bituminosas con un 30% de material reciclado gracias a la adición de un aditivo fluxante de origen natural que facilita la incorporación de mayores tasas de fresado.
- 25cm de sub-base granular empleando zahorra 100% reciclada procedente de residuos de construcción y demolición como alternativa a la zahorra artificial contemplada por la normativa.

Tramo control	Rodadura BBTM 11B - BMP (3 cm)
	Intermedia AC22 BIN (8 cm)
	Base AC32 BASE (19 cm)
	Zahorra artificial(25 cm)
	Suelo estabilizado S-3 (30 cm)
Tramo experimental	Rodadura BBTM 11B - BM lignina (3 cm)
	Intermedia AC22 BIN 30R (8 cm)
	Base AC32 BASE 30R (19 cm)
	Zahorra reciclada de RCDs (25 cm)
	Suelo estabilizado S-3 (30 cm)

Figura 3. Paquete de firme

3. Método de trabajo

Esta investigación se ha llevado a cabo en varias fases, con el fin de conseguir el control de todo el proceso.

- Fase de diseño: Caracterización de los materiales de partida y definición de la fórmula de trabajo de cada una de las mezclas utilizadas.
- Fase de fabricación: Control de los parámetros que influyen en el proceso de fabricación, especialmente temperaturas y humedad del material fresado. Adicionalmente se realizaron los ensayos tipo sobre las mezclas fabricadas de acuerdo con los métodos de ensayo definidos en la UNE EN 13108-1, que

Experiencia con mezclas asfálticas sostenibles en la carretera M-607 en Tres Cantos, Madrid

están descritos en la serie de normas UNE EN-12697, comprobando que para todos los tipos de mezcla se cumplieran las prescripciones técnicas exigidas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3 (ORDEN FOM/2523/2014).

- Fase de puesta en obra: La puesta en obra se realizó empleando equipos convencionales. Tras el extendido se llevó a cabo la compactación utilizando primero un compactador vibratorio de rodillos posteriormente un compactador de neumáticos. En esta fase se realizaron controles de temperatura mediante termómetros digitales y termografía. Además, como comprobación final sobre la unidad terminada se determinaron espesores, densidades y huecos a partir de testigos de obra.

- Fase de seguimiento: Esta fase tiene como finalidad evaluar el comportamiento de cada una de las mezclas implementadas sometidas a condiciones reales de tráfico y agentes atmosféricos en un periodo de un año. Para ello se contempla la realización de una auscultación superficial con mediciones de macrotextura y resistencia al deslizamiento con SCRIM, así como de otra estructural para la medida de la evolución de las deflexiones.

- Análisis del impacto ambiental: Además, como parte de la investigación se ha llevado a cabo la evaluación ambiental de la solución propuesta mediante un análisis de ciclo de vida (ACV) utilizando el software GaBi y la metodología de puntos intermedios “midpoints” ReCiPe [12]. En este análisis se han considerado todas las etapas del ciclo de vida de fabricación de las mezclas, desde la adquisición de materias primas, transporte,

almacenamiento, producción, recepción, instalación, uso, mantenimiento hasta la valoración al final de la vida útil.

4. Resultados obtenidos

4.1 Fase de diseño

Previo a la implementación del demostrador, se acopiaron y caracterizaron los materiales innovadores a emplear, así como se realizaron las correspondientes validaciones de las fórmulas de trabajo en laboratorio de acuerdo a los requerimientos del Artículo 510 del PG-3 para Zahorras, Artículo 542 para hormigón bituminoso y Artículo 543 para mezclas discontinuas.

Los áridos reciclados se tomaron de una planta de valorización de residuos que dispone de este material con un marcado CE para áridos para capas granulares para uso en capas estructurales de firmes. El material fresado se consiguió del acopio disponible en la propia planta en la que se fabricaron las mezclas bituminosas, realizándose un nuevo acopio de fresado con una relación 2 de fresado fino y 1 de fresado grueso. El bio-fluxante se escaló a nivel de toneladas en un reactor con una capacidad de 2 m3. El betún modificado con polímeros y lignina se fabricó en planta y se suministró posteriormente a la planta asfáltica.

Los resultados de caracterización de los materiales diferenciadores utilizados en el estudio se muestran a continuación:

- Zahorra

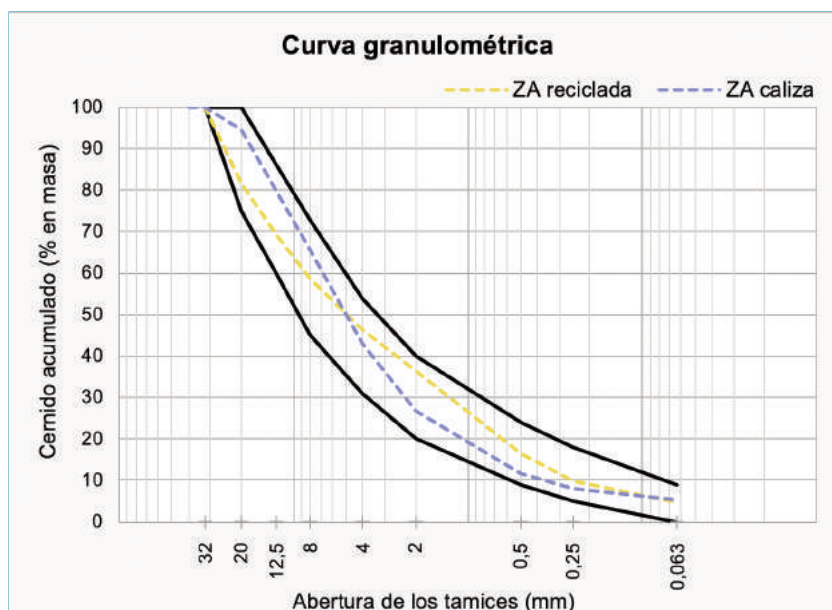


Figura 4. Granulometrías de la zahorra

La granulometría del material está comprendida en el huso ZA 0/20 (Figura 4). Los resultados de la caracterización físico-química del material y la comparación con los valores límites que se exige en normativa se indican en la Tabla 1. Según los resultados obtenidos la zahorra reciclada de RCDs cumple con todos los parámetros exigidos en normativa, a excepción del desgaste de los ángeles, cuyo valor excede ligeramente del valor máximo indicado en las especificaciones. El tramo experimental se monitorizará para evaluar si este hecho tiene influencia en las prestaciones mecánicas del tramo.

• Material fresado

La granulometría del material reciclado procedente de pavimentos agotados, así como el contenido de betún y sus propiedades se muestra en las Tabla 2 y Tabla 3, respectivamente.

Tabla 1: Propiedades de la zahorras usada en la investigación

Ensayo	Norma UNE	Zahorra caliza	Zahorra reciclada	Especificaciones Art. 510 PG-3
Límite de Atteberg	UNE 103103/04	No plástico	No plástico	N/R*
Índice de Lajas (%)	UNE EN 933-3	8	10	< 35
Caras de fractura (%)	UNE EN 933-5	100	100	100
Equivalente de arena (%)	UNE EN 933-8	62	50	> 40
Coeficiente de desgaste de los Ángeles (%)	UNE EN 1097-2	29	39	≤ 30
Coeficiente de limpieza (%)	UNE EN 146130	0,74	0,63	< 1
Sulfatos solubles en agua (%)	UNE EN 1744-1	0,001	0,07	0,07
Contenido de Azufre (%)	UNE EN 1764-1	0,524	0,081	< 0,5

*N/R = No requerido

Tabla 2: Granulometría del material fresado

Abertura tamices, mm	45	31,5	16	8	2	0,5	0,25	0,063
Pasa, %	100	100	97	83	43	23	17	9,1

Tabla 3: Características del ligante del material reciclado

Contenido de ligante soluble (%)	Penetración (0.1 mm)	Punto de reblandecimiento (°C)
5,55	9	77

Experiencia con mezclas asfálticas sostenibles en la carretera M-607 en Tres Cantos, Madrid

- Betún modificado con lignina y polímeros

El betún producido en planta cumple con las especificaciones técnicas para un PMB 45/80-60. Un resumen de sus propiedades se presenta en la Tabla 4.

ligante, densidad y huecos, sensibilidad al agua, ensayo de deformación permanente y módulos de rigidez mediante el ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas.

Según los valores que se muestran en la Tabla 5 las mezclas innovadoras ofrecen resultados comparables con los de sus alternativas convencionales, cumpliendo en todos los casos con los valores mínimos establecidos en la normativa vigente del PG-3 en sus artículos 542 para mezclas tipo hormigón bituminoso y 543 para las mezclas discontinuas.

Tabla 4: Características del betún modificado con lignina

	Especificaciones Art. 510 PG-3			
	UNE -EN	Betún Proyecto	PMB 45/80-60	PMB 45/80-65
Penetración 25°C, 0,1 mm	1426	48	45-80	45-80
Punto de reblandecimiento, °C	1427	64,5	≥ 60	≥ 65
Recuperación elástica a 25°C, %	13398	81	≥ 50	≥ 70
Estabilidad al almacenamiento	13399			
Diferencia de punto de reblandecimiento	1427	0,4	≤ 5	≤ 5
Diferencia de penetración	1426	0,6	≤ 9	≤ 9
Resistencia al envejecimiento	12607-1			
Cambio de masa, %	12607-1	0,02	≤ 1.0	≤ 1.0
Penetración retenida, %	1426	81	≥ 60	≥ 60
Incremento en el punto de reblandecimiento, °C	1427	4,8	≤ 10	≤ 10

4.2 Fase de fabricación

Para la fabricación de las diferentes mezclas se utilizó una planta de fabricación de mezclas bituminosas en caliente de tipo discontinuo, equipada con un elevador de reciclado para la incorporación del material fresado. El aditivo bio-fluxante se incorporó al tanque de betún y el betún modificado con lignina se suministró directamente de la cisterna a la planta.

Se tomaron muestras de las mezclas fabricadas, tanto de las experimentales como las de control, para su caracterización en laboratorio de acuerdo a la serie de normas de ensayo UNE EN 12697. En particular se controlaron en esta fase las siguientes características de las mezclas: granulometría, contenido de

4.3 Fase de obra

La ejecución y puesta en obra de cada una de las capas se llevó a cabo con medios tradicionales y no se registraron incidencias, lo que confirma que el proceso de implantación de la sección de firme descrita es análogo al de una sección convencional. Las siguientes fotos ilustran el proceso constructivo, desde la subbase hasta la capa de rodadura (Figura 5, Figura 6, Figura 7).

Tabla 5: Comparativa de los resultados del control de calidad de las mezclas asfálticas experimentales y las de control

	Base AC32 BASE		Intermedia AC22 BIN		Rodadura BBTM11B	
Ensayo	Control	Experimental	Control	Experimental	Control	Experimental
Porcentaje de betún s/m, %	4,39	4,64	4,09	4,10	5,04	5,10
Densidad, kg/m3	2.341	2.371	2.334	2.327	2.043	2.045
Densidad Máxima, kg/m3	2.505	2.499	2.508	2.447	2.470	2.465
Huecos en mezcla, %	6,5	5,1	6,9	4,9	17,3	17,1
ITSR, %	94,2	95,5	96,8	99,5	93,1	97,3
Ensayo de pista aire, mm/103 ciclos	0.06	0.04	0.07	0.05	0.07	0.06
Módulo de rigidez @ 20°C, MPa	7342	10695	8356	10483	3350	4570



Figura 5. Ejecución de la capa de subbase (izquierda) y de base (derecha)



Figura 6. Ejecución de la capa intermedia (izquierda) y de rodadura (derecha)

Experiencia con mezclas asfálticas sostenibles en la carretera M-607 en Tres Cantos, Madrid



Figura 7. Tramo finalizado y puesto en servicio

- Betún modificado con lignina y polímeros

En esta etapa de puesta en obra se tomaron medidas de temperatura de las mezclas a la llegada del camión a obra y una vez extendida. En todos los casos la temperatura de la mezcla convencional en caliente, una vez fabricada, se encontraba en torno a los 160°C (Figura 8). La temperatura ambiente durante la puesta en obra fue de 5-10 °C, con un día soleado sin lluvia.



dad y contenido en huecos para las mezclas experimentales y la control son bastante similares. La misma tendencia se observa para el resto de testigos extraídos de la capa de rodadura y base. Esto pone de manifiesto que las mezclas innovadoras fabricadas no presentan desventajas respecto a sus alternativas convencionales en cuanto a las densidades y contenido en huecos de obra.

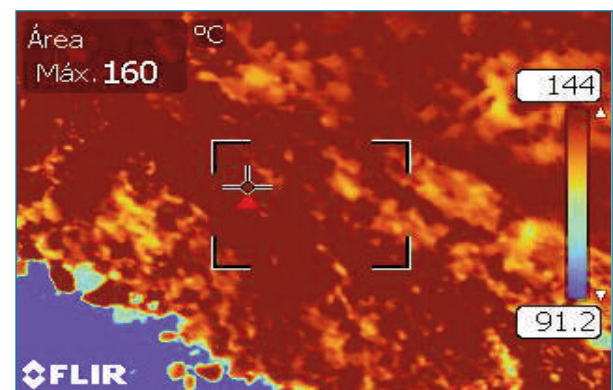


Figura 8. Termografía IR de la temperatura de la mezcla tomada durante el proceso de extendido

- Control de densidades sobre la unidad terminada

A modo de ejemplo los resultados obtenidos a partir de la extracción de testigos de la capa intermedia se presentan en la Tabla 6, en las que los valores promedio de espesores, densi-

4.4 Fase de seguimiento

Dentro de la fase de seguimiento del tramo se ha realizado la primera campaña de auscultación a tiempo 0, en la que se han tomado medidas de deflexiones, así como de macrotex-

tura superficial y resistencia al deslizamiento. Para la evaluación de las deflexiones se ha utilizado un curviómetro, en la que la adquisición de datos se ha realizado a una velocidad de 5 m/s (18 km/h) y cada cinco metros. La resistencia al deslizamiento (CRT) y macrotextura (MPD) se ha medido con el equipo SCRIM a una velocidad de 50 km/h y con un tiempo soleado, temperatura ambiente de 17°C y temperatura del pavimento de 29°C.

los valores obtenidos (Figuras 9-11), se observa que las deflexiones en la sección control son ligeramente superiores a las obtenidas en la sección experimental, encontrándose muy por debajo de la máxima teórica permitida. En cuanto a la macrotextura, no se detectan desviaciones significativas entre los valores registrados para la sección experimental y control. Por último, los valores de CRT indican una ligera mejora de resistencia al deslizamiento para la sección experimental que para la control.

Tabla 6: Espesor, densidad y contenido en huecos de testigos de la capa intermedia.

Analizando	Testigo nº	Espesor (cm)	Promedio sección (cm)	Densidad (kg/m3)	Promedio sección (cm)	Contenido en huecos (%)	Promedio sección (cm)
Sección Experimental	1	6	7,4	2315	2298	5,4	6,1
	2	6		2299		6,0	
	3	10,5		2283		6,7	
	4	7,5		2301		6,0	
	5	5,5		2330		4,8	
	6	7,5		2312		5,5	
	7	8		2229		8,9	
	8	8,5		2315		5,4	
Sección Control	9	7	7,2	2375	2360	6,3	6,2
	10	8		2351		6,2	
	11	6,5		2353		6,1	

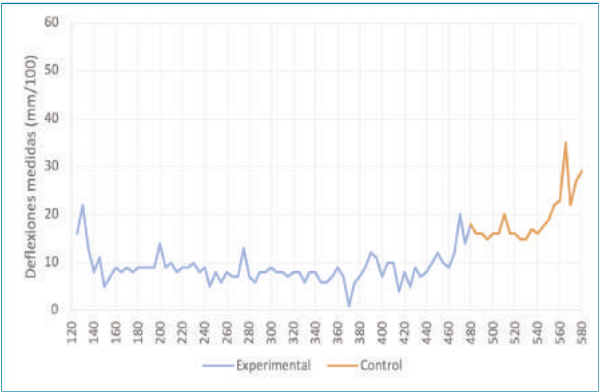


Figura 9. Evolución de las deflexiones medidas con curviómetro

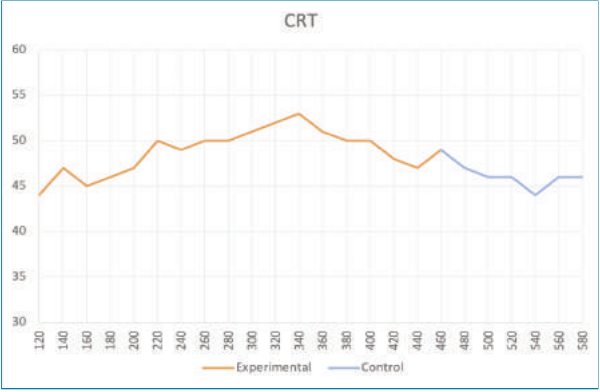


Figura 10. Valores del coeficiente de rozamiento transversal de la sección experimental y la control medidos con SCRIM

Experiencia con mezclas asfálticas sostenibles en la carretera M-607 en Tres Cantos, Madrid

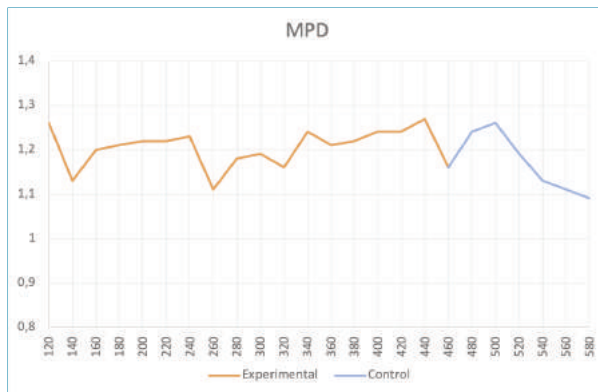


Figura 11. Valores de macrotextura de la sección experimental y la control medidos con SCRIM

4.5 Análisis del impacto ambiental

Una de las principales ventajas de este tipo de mezclas es su impacto ambiental, que se ha calculado mediante un análisis de ciclo de vida (ACV), tomando como unidad funcional 1m² para un periodo de 60 años. La siguiente figura (Figura 12) muestra el resultado de la evaluación medioambiental del concepto de firme sostenible presentado en este estudio en comparación con su alternativa convencional para las diferentes categorías de impacto, utilizando la metodología ReciPe de puntos intermedios. Tal y como se observa la solución innovadora ofrece un mejor compartimiento ambiental para todas las categorías de impacto.

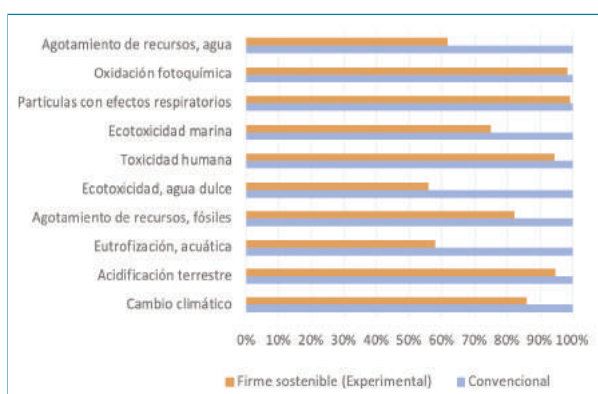


Figura 12. Impacto ambiental del firme sostenible vs convencional (60 años por m²)

5. Conclusiones

En el presente artículo se describe como caso de éxito la implantación de un concepto de firme más sostenible, en el que

en todas sus capas, desde la subbase hasta la rodadura, se ha incorporado un material innovador más respetuoso con el medioambiente. Las siguientes conclusiones se pueden extraer de la ejecución del demostrador:

- Se ha confirmado que la producción y puesta en obra de las mezclas sostenibles descritas en el presente artículo es análogo al de las mezclas en caliente convencionales, pudiendo este modelo ser replicado en cualquier otra obra.
- Para asegurar la calidad de las mezclas finales resulta fundamental el control adecuado del residuo o subproducto a emplear. En el caso particular de los RCDs estos deben proceder de un gestor autorizado, que han sido debidamente tratados y que no se encuentran mezclados con otros componentes.
- El empleo de aditivos bio-fluxantes para facilitar la incorporación de tasas medias-altas de material fresado para la fabricación de nuevas mezclas resulta una alternativa interesante al uso de rejuvenecedores u otros productos derivados del petróleo. Se recomienda añadir este aditivo al mismo tiempo que el betún; de no resultar posible se podría añadir posteriormente a la mezcla.
- La adición de lignina, subproducto de la producción del etanol de segunda generación, es una apuesta clara para desarrollar betunes de origen "bio".
- Los resultados de los ensayos para las probetas compactadas en laboratorio para las mezclas experimentales son, en la mayoría de los casos, similares a los que ofrecen sus alternativas convencionales. El empleo de estos residuos no afecta, por tanto, negativamente a la calidad de las mezclas finales.
- Teniendo en cuenta el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3 (ORDEN FOM/2523/2014) se puede afirmar que las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas de la sección construida cumplen con la normativa vigente y, por tanto, se podrían emplear para una construcción o rehabilitación más sostenible de cualquier carretera, independientemente del volumen de tráfico pesado.

• Los valores de densidad y número de huecos determinados sobre testigos extraídos del tramo de ensayo no muestran diferencias significativas entre la sección experimental y la control.

• El seguimiento realizado sobre el tramo de ensayo permite establecer comparativas entre el comportamiento de las diferentes mezclas innovadoras frente a sus alternativas convencionales, siendo éstas sometidas a las mismas sollicitaciones de

tráfico y condiciones climatológicas. Los resultados obtenidos hasta el momento indican que, de acuerdo a la evolución de las deflexiones, dichos valores se encuentran muy por debajo de la máxima teórica permitida, no observándose diferencias apreciables entre las deflexiones de cada sección. La misma tendencia se puede observar para los valores de macrotextura superficial y resistencia al deslizamiento.

- El análisis del ciclo de vida demuestra un mejor comportamiento ambiental de las mezclas experimentales que las convencionales. De los materiales desarrollados, el uso de material fresado y RCDs, seguido de la sustitución parcial de betún por lignina y finalmente el uso del agente bio-fluxante para facilitar la incorporación del material reciclado, resulta ambientalmente ventajoso en todas las categorías de impacto. Los beneficios ambientales asociados con los procesos adicionales de reciclaje, la producción de materiales novedosos y su transporte, superan con creces los impactos negativos que generan.

6. Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a los integrantes del consorcio APSE, proyecto financiado por la Comisión Europea con GA nº603862. En particular, a los responsables por parte de la Dirección General de Carreteras de la Comunidad de Madrid por su tenacidad, interés en las innovaciones propuesta y apoyo para llevar a cabo la obra que hace referencia en este artículo. Además, fuera del consorcio, agradecer al jefe de obra de OHL, empresa encargada de la ejecución de la obra, al jefe de planta y de laboratorio de EL-SAN, por su abierta colaboración, buen hacer y apuesta por la innovación. También agradecer a la dirección técnica de CEPESA Comercial de Petróleo por involucrarse y creer en el escalado del betún modificado con lignina desarrollado.

6. Bibliografía

- [1] DOE/EIA-0035 (2017/11). Energy consumption by sector, Monthly Energy review. US Energy Information Administration (EIA). <http://large.stanford.edu/courses/2017/ph240/cohn2/docs/00351711.pdf>.
- [2] Inventory of US Greenhouse Gas Emissions and Sinks 1990-2015 Report Tables (11/2017). US Environment Protection Agency <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks-1990-2015>.
- [3] Ellen MacArthur Foundation. Report 2013. Towards the Circular Economy: "Economy and business rationales for an accelerated transition". <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>
- [4] Poeran N. (2014). The effects of a kraft lignin and wood addition on the ravelling resistance of porous asphalt concrete. Part of student thesis. Delft University of Technology Faculty of Civil Engineering & Geosciences Road & Railway Engineering, Holanda. uuid:7e1d7a4e-5d95-4c44-a6dd-facaebee63e2.
- [5] Merino, S., Cherry, J., (2007). Progress and Challenges in Enzyme Development for Biomass Utilization. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology vol. 108: 95-20.
- [6] PIŁAT, J. GAWĘŁ I. et al (2013). Cut-back asphalt and method for producing the cut-back asphalt. Patente número de registro PL214138 (B1). Universidad de Varsovia, Polonia.
- [7] Kowalski, K. Krol, J. B. et al (2017). Thermal and Fatigue Evaluation of Asphalt Mixtures Containing RAP Treated with a Bio-Agent. Applied Science, vol 79-11.
- [8] Krol, J.B., Niczke, et al (2017). Towards Understanding the Polymerization Process in Bitumen Bio-Fluxes. Materials. vol. 10: 1058.
- [9] Ministerio de Medio Ambiente y Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas CEDEX (2014). Catálogo de residuos utilizables en construcción. <http://www.cedexmateriales.es/>
- [10] IHOBE (2009). Manual de Directrices para el uso de Áridos Reciclados en Obras Públicas de la Comunidad Autónoma del País Vasco. País Vasco, España.
- [11] Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición (2012). Guía Española de Áridos Reciclados procedente de RCD. <http://www.camino-paisvasco.com/Profesion/documentostecnicos/guia>
- [12] Huijbregts, M., Steinmann, Z., et al. (2017) ReCiPe 2016: A Harmonised Life Cycle Impact Assessment Method at Midpoint and Endpoint Level. International Journal of Life Cycle Assessment, vol 22:138-147.

EL GRAN ESPECTÁCULO DE LAS VEGAS

NO SE LO
PUEDE
PERDER



LA MAYOR FERIA DE LA
CONSTRUCCIÓN EN AMÉRICA
CONEXPOCONAGG.COM

DEL 10 AL 14 DE MARZO DE 2020 | LAS VEGAS, EE. UU.