

Empleo de rejuvenecedores en reciclado de mezclas bituminosas

Es bien conocida la posibilidad de reutilización de las mezclas bituminosas una vez alcanzado el final de su vida útil, mediante reciclados del material, empleando diferentes técnicas, tanto en caliente como en frío. Una de las técnicas que ofrece mayor seguridad en la calidad y homogeneidad del producto fabricado con el material fresado obtenido de las carreteras es el reciclado en caliente en central, tecnología que está normalizada en la legislación española y que está siendo aplicada con éxito en diversidad de oportunidades. Se han realizado obras tanto con bajas como con altas tasas de fresado en la mezcla final (incluso superiores al 50%), aunque lo más habitual es reciclar con porcentajes entre el 10% y el 30%. La reutilización y el reciclado de mezclas bituminosas envejecidas genera importantes beneficios ambientales, principalmente el reaprovechamiento de materiales valiosos, de forma que, además de resolver el problema de los residuos generados en el fresado, permite reducir el consumo de materias primas no renovables, como son el betún y los áridos. En los últimos años se ha producido en el sector de las mezclas bituminosas un impulso de este tipo de soluciones para obtener productos más sostenibles. Aumentar la reutilización del fresado (RAP) en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente es una solución prometedora, especialmente para redes maduras de carreteras donde el mantenimiento genera un suministro constante de RAP. Cuando el porcentaje de fresado incorporado a la mezcla es elevado, es fundamental para asegurar la calidad final del producto tanto el proceso de diseño de la mezcla como el tratamiento y estudio previo de los materiales a emplear, especialmente el ligante nuevo a incorporar, sin olvidar el proceso de fabricación. Debido a las condiciones climáticas, el ligante del RAP que habitualmente se obtiene en España puede encontrarse extremadamente envejecido, lo que limita su reutilización con una solución convencional como es la adición de un ligante blando. En este artículo se presentan experiencias de empleo de agentes rejuvenecedores para garantizar la calidad de una mezcla bituminosa con alto contenido de RAP cuyo ligante está muy envejecido.

Palabras clave: reciclado, asfalto reciclado, fresadora, mezcla de asfalto, rejuvenecedor, betún

It is well known that bituminous mixes, once they have reached the end of their useful life, can be reused by means of recycling of the material, with the help of different techniques, both hot and cold. One of the techniques which offers more safety when it comes to quality and homogeneity of the product manufactured with milled roads material, is in-plant hot recycling. This technology, standardized in Spanish legislation, is being applied successfully in a diversity of occasions. Projects have been carried out both with low and with high milling rates in the final mix (even more than 50%), although it is most common to recycle with percentages between 10% and 30%. Reuse and recycling of aged bituminous mixes offer important environmental benefits, mainly the reuse of valuable materials, offering the possibility, apart from resolving the problem of waste generated during the milling process, to reduce the use of non-renewable raw materials, such as bitumen and aggregates. In the last few years the sector of bituminous mixes has undergone an important increase of this kind of solutions to obtain more sustainable products. Increasing reuse of milling (RAP) in the production of hot bituminous mixes is a promising solution, specially regarding mature road networks, where maintenance generates a constant RAP supply. When adding an elevated milling percentage to the mix, in order to ensure the final quality of the product, both the design process of the mix and treatment and previous study of the used materials, particularly of the new binder, are absolutely necessary, not to mention the manufacturing process. Due to climatic conditions, the RAP binder, which normally is of Spanish origin, can be extremely aged, which limits its reuse with a conventional solution such as the addition of a soft binder. This paper describes experiences as to the use of rejuvenation agents to guarantee quality of bituminous mixes with a high RAP content with an extremely aged binder.

Keywords: recycling, recycled asphalt, milling, asphalt mix, rejuvenation, bitumen

Empleo de rejuvenecedores en reciclado de mezclas bituminosas

Laurent Porot, laurent.porot@azchem.com
Rachel Severance, rachel.severance@azchem.com
Arizona Chemical

Jesús Felipo, jfelipo@pavasal.com
José Ramón López, jrlopez@pavasal.com
Pavasal

1. Introducción

Durante años, el fresado (RAP) ha sido empleado como un material granular en bermas laterales de carreteras, en capas sub-base del pavimento, y en otras aplicaciones similares. Sin embargo, utilizar simplemente el RAP en estas aplicaciones sacrifica el valor añadido del ligante. En los últimos años, la tendencia del sector de fabricantes de mezclas bituminosas es incorporar más RAP en las nuevas mezclas bituminosas en caliente (HMA) para recuperar el valor de las materias primas no renovables existentes en el fresado, tanto el ligante como los áridos. Como se muestra en la Figura 1, los datos recogidos por la European Asphalt Pavement Association (Asociación Europea de Pavimentos Asfálticos, EAPA) muestran un aumento constante en el fresado usado en las mezclas en caliente nuevas en España (EAPA).

Varios proyectos europeos han investigado el empleo de RAP en altas tasas en mezclas bituminosas en España, con porcentajes superiores al 30% de RAP. Por ejemplo, el pro-

yecto DIRECT-MAT, que terminó en el año 2011, y reportó las mejores prácticas para gestionar y manejar fresado (FEHRL). El proyecto FENIX finalizó en el año 2010, realizándose una prueba con éxito con un contenido de RAP del 70% en mezclas bituminosas en caliente (Proyecto Fénix). Aunque las especificaciones PG4 autorizan en la actualidad el uso de hasta un 50% de RAP (Ministerio de Fomento), solamente un 10-20% de fresado se emplea habitualmente en las mezclas nuevas. Por lo tanto, mientras que los diferentes estudios realizados muestran resultados prometedores, asegurar la calidad del producto final es una preocupación que debe tenerse en cuenta. (Querol & Del Pozo, 2011).

Un factor importante en la calidad del producto final son las propiedades del ligante envejecido, las cuales son un resultado directo del efecto que el envejecimiento tiene en las propiedades del ligante del fresado. El mecanismo de envejecimiento es complejo, y se detecta tanto en los ligantes como en las mezclas. A nivel químico, se produce oxidación y modificación (Read & Whiteoak, 2003; Petersen, 2009), lo que hace que el ligante se endurezca y sea más propenso al fallo (Porot & Nigen-Chaidron, 2007). Si bien este endurecimiento proporciona algunas ventajas, tales como resistencia a la deformación permanente, el ligante dentro del RAP también será más quebradizo y susceptible al agrietamiento (Karlsson & Isacson, 2006). Por tanto, los principales retos para la reutilización de RAP en alta tasa son la restauración de las propiedades del ligante envejecido, y la total

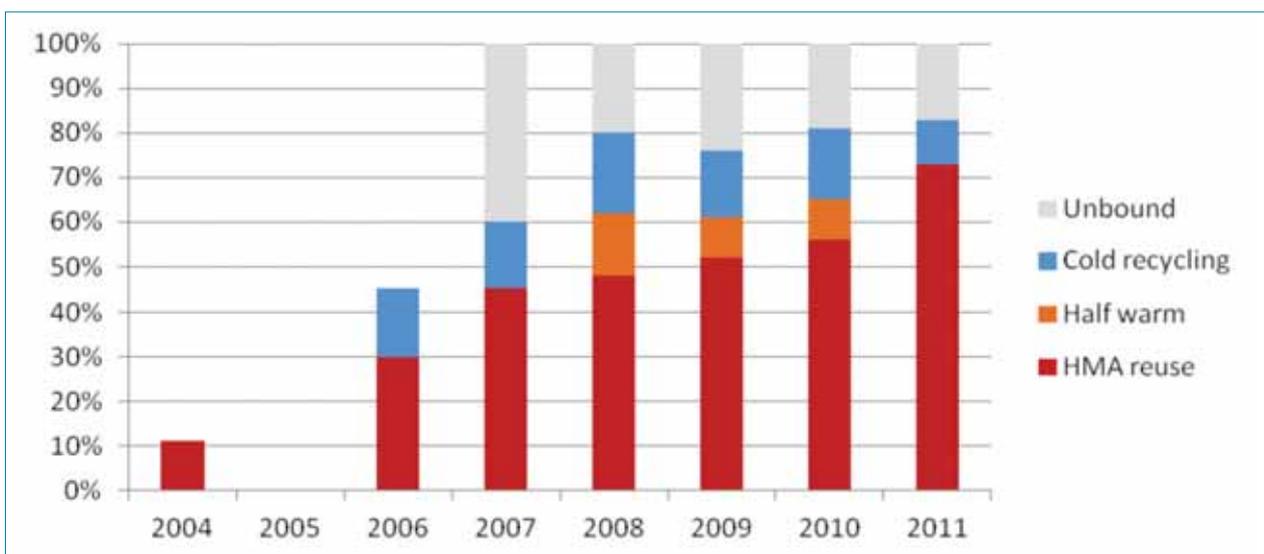


Figura 1. Porcentaje de RAP empleado en España, según informes de la EAPA.

movilización y recuperación de dicho ligante (Del Pozo & Querol, 2012).

El estudio presentado aquí investigó el impacto de incorporar un 30% de RAP en la mezcla bituminosa final. Se emplearon dos metodologías diferentes (con y sin rejuvenecedores) para la reutilización del RAP, después de una evaluación de sus características. Seguidamente, se evaluaron estas dos opciones a partir del ligante extraído del RAP. Finalmente, se evaluaron mezclas bituminosas en el laboratorio por medio de pruebas estándar y caracterizaciones mecánicas. Nótese que la inclusión del 30% de RAP es razonablemente alcanzable con la actual configuración de muchas plantas de fabricación de mezclas bituminosas en España.

2. Caracterización del ligante procedente del fresado

Uno de los retos específicos en países como España, con climas cálidos, es el tipo de RAP que puede encontrarse y sus características. El envejecimiento del ligante es más severo en climas cálidos, y el impacto resultante en las características del RAP debe tenerse en cuenta.

Para este estudio, el RAP usado fue muestreado de unos acopios en Valencia. Se extrajo el ligante del RAP, recuperado por evaporación rotativa, y caracterizado por penetración, punto de reblandecimiento, y viscosidad dinámica de acuerdo con las normas EN. Los resultados para el ligante se pueden observar en la Tabla 1.

Los resultados en la Tabla 1 reflejan un ligante recuperado del fresado muy duro con un grado por debajo de 10/20. En otras palabras, este ligante obtenido del RAP es tres grados de penetración más duro que un ligante estándar de gra-

do 10/20. Comparativamente, el ligante habitualmente pierde un grado después del envejecimiento a corto plazo durante la producción de la mezcla, y un segundo grado después de 5-10 años en el pavimento. Si bien este ligante obtenido del fresado no puede satisfacer las especificaciones de clasificación en la norma EN 12591, los valores obtenidos son congruentes con los resultados habituales obtenidos para el RAP en España (Del Pozo & Querol, 2012).

Mientras que el valor de penetración y el punto de reblandecimiento aportan información sobre la elevadísima consistencia del ligante en la mezcla bituminosa, la viscosidad a altas temperaturas hace referencia a la influencia de las características del ligante en el proceso de fabricación en la planta. El perfil de viscosidad del ligante extraído de RAP se superpone en la Figura 2 con el de un ligante virgen 35/50. Dado que la máxima viscosidad para una mezcla eficaz está cerca de 200 mPa/s (Read & Whiteoak, 2003), el ligante envejecido tendría que procesarse por encima de 200°C. Comparativamente, un ligante virgen estándar 35/50 puede procesarse cerca de 160°C. Como consecuencia, si este RAP se incorpora como está con una temperatura convencional de mezcla cerca de 160°C, el ligante envejecido no estará lo suficientemente fluido para recubrir los áridos y no se podrá recuperar el valor del ligante envejecido.

El ligante recuperado también fue caracterizado químicamente por medio del análisis Fourier Transformed Infra-Red (Infrarrojo de la Transformada de Fourier), o FTIR. FTIR es una herramienta útil para evaluar ligantes envejecidos, ya que los enlaces dobles generados a través de oxidación pueden detectarse, en el espectro, como picos de sulfóxido y carbonilo.

Tabla 1. Caracterización del ligante extraído y recuperado del RAP.

	Penetración a 25 °C, 0.1 mm	Punto de reblandecimiento, °C	Índice de penetración	Viscosidad, mPa/s
Método	EN 1426	EN 1427	EN12591 (Anexo A)	EN 13302
Propiedades	7	93*	1,9	17780 a 135°C 14830 a 150°C 899 a 180°C 653 a 200°C

* punto de reblandecimiento medido en glicerol

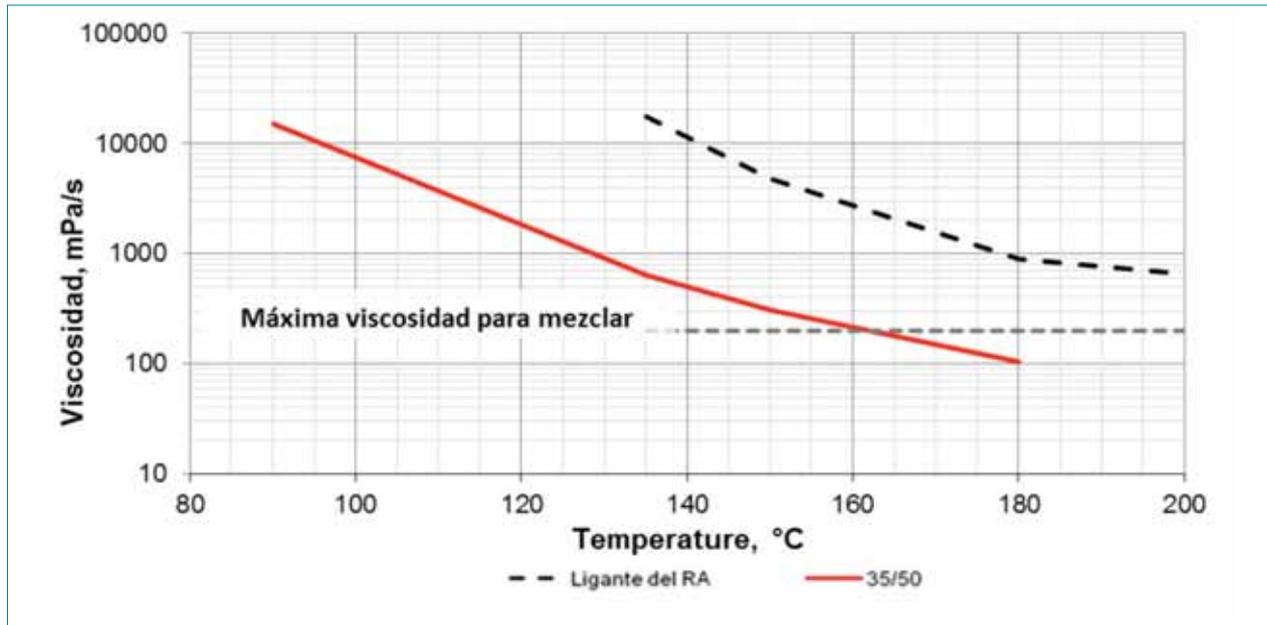


Figura 2. Perfil de viscosidad del ligante extraído de RAP comparado con un ligante virgen 35/50.

El espectro de absorción FTIR para el ligante procedente del RAP se compara en la Figura 3 con el espectro de un ligante virgen 35/50 y un ligante envejecido en el laboratorio. El ligante envejecido en el laboratorio se obtuvo a partir del envejecimiento del ligante virgen 35/50. Se detectaron un pico de sulfóxido cerca de 1.000 cm^{-1} y un pico de carbonilo cerca de 1.700 cm^{-1} , tanto para el ligante procedente del RAP como para el ligante envejecido en el laboratorio. Cualitativamente, ambos picos son más pronunciados en el ligante del RAP que en el ligante envejecido en el laboratorio y por lo tanto el ligante recuperado del fresado está más envejecido que el ligante envejecido en el laboratorio. El espectro para el ligante del RAP también contiene picos en 900 y 770 cm^{-1} , que corresponden a huellas típicas de butadieno y estireno. Como tal, es probable que la fuente de RAP fuera modificada con polímeros.

3. Opciones para la reutilización de fresado

La forma más habitual de fabricar mezclas que contienen fresado es usar un grado más blando de ligante, y este método es eficaz cuando el contenido de fresado no es muy alto (menor que el 15%). Para el ejemplo que se está describiendo, el ligante blando empleado fue un ligante virgen estándar 70/100. La norma EN 13108 proporciona un método para predecir las propie-

dades que resultan de mezclar dos ligantes, que puede usarse con ligante blando y ligante procedente del RAP. Sin embargo, la mezcla con ligante blando para satisfacer la especificación tiene limitaciones cuando el RAP está seriamente envejecido, o cuando el porcentaje de RAP es mayor del 30% en la mezcla.

La otra alternativa empleada en este estudio fue la incorporación de un producto rejuvenecedor del ligante envejecido. El aditivo empleado en este estudio fue Arizona Chemical SYLVAROAD™ RP 1000. El aditivo de rendimiento SYLVAROAD™ RP 1000 es un aditivo de asfalto bio-renovable en un 90% producido a partir de productos químicos refinados del pino. Este agente rejuvenecedor está específicamente procesado según especificaciones estrictas, y se usa para restaurar propiedades del ligante envejecido y activar el ligante del RAP. El aditivo está diseñado para añadirse al fresado antes de que el RAP se mezcle con los materiales vírgenes. Su naturaleza química ayuda a la dispersión de los asfaltenos dentro de la matriz del betún, proporcionando una mejor flexibilidad. El aditivo es líquido a temperatura ambiente, y tiene una viscosidad de 40-46 mm²/s a 40°C.

4. Evaluación del ligante

Basado en las propiedades del ligante del RAP, se prepararon dos mezclas diferentes de ligantes para simular el uso del

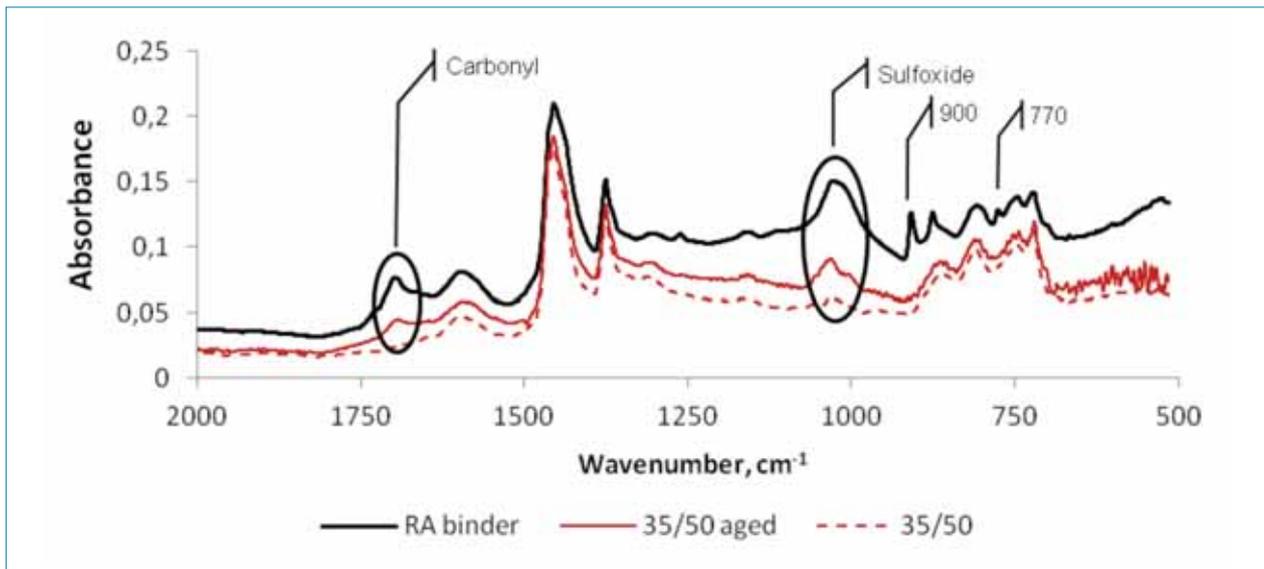


Figura 3. Comparación FTIR del ligante de RA, ligante virgen 35/50, y ligante envejecido en el laboratorio.

30% de RAP. Ambas mezclas contenían un 30% del ligante de RAP y un 70% de un ligante virgen. En la Mezcla 1, el ligante virgen blando 70/100 se usó para compensar el contenido de ligante procedente del fresado. En la Mezcla 2, el ligante del RAP fue pre-tratado con un 10% del agente rejuvenecedor antes de la combinación con el ligante virgen estándar 35/50. También se realizó un cálculo para una Mezcla 3 teórica entre un 30% de ligante del RAP y un 70% de ligante virgen 35/50 y se usó como mezcla de referencia.

Las Mezclas 1 y 2 se caracterizaron por el valor de penetración, punto de reblandecimiento, y viscosidad dinámica de acuerdo con las normas EN. Los resultados se comparan con las propiedades del ligante envejecido no tratado, el ligante virgen 35/50, y los resultados calculados para la Mezcla 3 en la Tabla 2 y Figura 4.

Como puede verse en la Figura 4, el cálculo de referencia para la Mezcla 3 resultó en un grado a la derecha de la casilla 20/30. Como tal, la mezcla es todavía demasiado du-

Tabla 2. Caracterización de las Mezclas 1 y 2 de ligante y la referencia calculada Mezcla 3, frente al ligante del fresado no tratado y el ligante virgen 35/50.

	Penetración a 25°C, 0.1 mm	Punto de reblandecimiento, °C	Índice de penetración	Viscosidad, mPa/s			
				135°C	150°C	180°C	200°C
Ligante del RAP	7	93*	1,9	17780	4830	899	653
Ligante virgen 35/50	41	53	-1,0	643	311	103	
Mezcla 1 con ligante virgen 70/100	37	58	-0,1	940	435	131	72
Mezcla 2 con agente rejuvenecedor	38	55	-0,6	947	438	133	73
Mezcla 3 con ligante virgen 35/50 (valores calculados)	24	68	0,3				

* Punto de reblandecimiento medido en glicerol

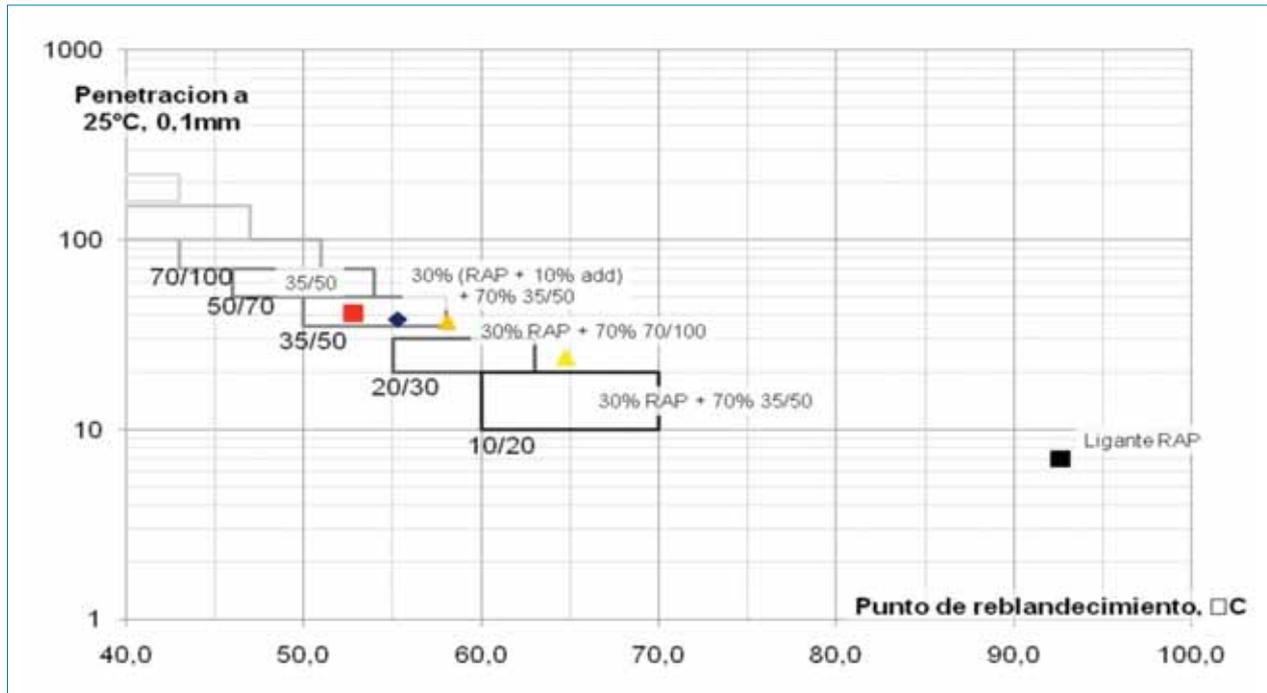


Figura 4. Caracterización de las dos Mezclas 1 y 2 de ligante y la referencia calculada Mezcla 3, frente al ligante del fresado no tratado y el ligante virgen 35/50.

ra para usarse en una mezcla bituminosa estándar. Por tanto, la Mezcla 3 demuestra que una mezcla con el 30% de fresado con ligante estándar 35/50 creará una mezcla de asfalto quebradiza que no cumplirá con las especificaciones.

La Mezcla 1 con ligante virgen blando 70/100 crea una mezcla más blanda que la referencia calculada Mezcla 3. Las propiedades de la Mezcla 1 están justo dentro de la casilla de especificación 35/50, y el punto de reblandecimiento está al límite. Como tal, las propiedades del ligante envejecido no son totalmente asimilables a las del ligante virgen 35/50.

Finalmente, la Mezcla 2 generó una mezcla similar al 35/50. Por tanto, cuando un ligante procedente de fresado seriamente envejecido es pre-tratado con un agente rejuvenecedor, puede incorporarse un 30% del ligante del RAP sin ajuste en el grado del ligante virgen.

Como puede verse en la Figura 4, el agente rejuvenecedor ayuda a movilizar el ligante del RAP en la mezcla reduciendo la viscosidad, si lo comparamos con el ligante procedente del fresado sin tratar. La mezcla que contiene el agente rejuvenecedor tiene una viscosidad en el mismo rango que el ligante virgen 35/50, asegurando el debido recubrimiento de los áridos vírgenes en la mezcla final.

5. Evaluación de la mezcla bituminosa

5.1 Tipo de mezcla

Basándose en los resultados del ligante, se evaluaron posibles métodos de rejuvenecimiento en mezclas en el laboratorio con el 30% de fresado. Durante la producción en la planta de mezcla, el RAP puede introducirse frío o después de ser precalentado. Para mezclas que contienen más del 50% de fresado, se prefiere el calentamiento, pero ambos procesos pueden ser apropiados para mezclas con el 30% de RAP. Por consiguiente las muestras realizadas en el laboratorio fueron las siguientes:

- Mezcla A: con el 30% de RAP incorporado frío + aditivo rejuvenecedor, y un betún virgen 35/50
- Mezcla B: con el 30% de RAP calentado, + aditivo rejuvenecedor, y un betún virgen 35/50
- Mezcla C: con el 30% de RAP incorporado frío, con un betún blando 70/100
- Mezcla D: con el 30% de RAP incorporado frío, con un betún virgen 35/50
- Mezcla E: mezcla en blanco sin reciclado con un betún virgen 35/50

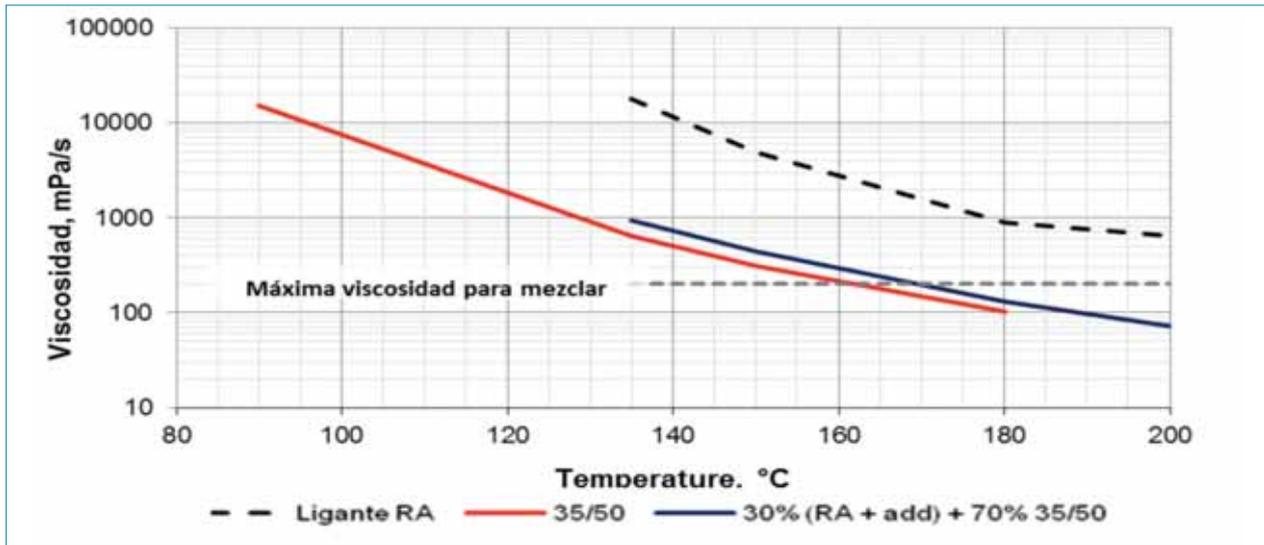


Figura 5. Perfil de viscosidad de la Mezcla 2 con el agente rejuvenecedor, frente al ligante del RAP sin tratar y el ligante virgen 35/50.

Todas las mezclas fabricadas eran AC 16 BIN 35/50, con un contenido de betún 35/50 del 4,3%. El contenido de ligante del fresado era de 3.57% B/M. El porcentaje del aditivo rejuvenecedor se estableció en el 0.3% del fresado (3 g por kg de RAP), una dosificación que se pretendió fuera similar al efecto de usar el ligante virgen 70/100. La curva gra-

nulométrica obtenida y la granulometría del fresado empleado para todas las mezclas es la que se puede observar en la Tabla 3, así como las proporciones de cada una de las fracciones utilizadas. La curva granulométrica fue diseñada para que se aproximara lo más posible a la Mezcla E de referencia con todos los materiales vírgenes.

Tabla 3. Granulometrías de los áridos, RAP, y mezclas finales.

Arido Tamices	< 0,063 2	0/4 30	4/12 27	12/20 11	RAP 30	% Mezcla
31,5	100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
25	100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
22,4	100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16	100	100,0	99,4	82,2	93,0	95,6
12,5	100	100,0	89,4	11,5	87,0	82,7
8	100	100,0	41,3	0,9	74,0	64,7
4	100	94,6	10,7	0,1	53,0	48,6
2	100	66,1	0,4	0,1	37,0	32,7
0,5	100	24,7	0,2	0,1	19,0	15,0
0,25	100	12,7	0,2	0,1	14,0	9,9
0,125	100	5,0	0,2	0,1	11,0	6,8
0,063	100	2,7	0,1	0,0	7,7	5,1

Empleo de rejuvenecedores en reciclado de mezclas bituminosas



Figura 5. Pretratamiento del RAP con el aditivo rejuvenecedor.

El proceso de mezcla empleado está basado en la norma EN 12697-35, considerando los siguientes aspectos:

- Cuando se incorpora el fresado precalentado, calentarlo hasta la temperatura de 130° C en estufa.
- Calentar el árido virgen hasta una temperatura de 225° C para el RAP a temperatura ambiente, y 175° C para el RAP precalentado.
- Mezclar el RAP con 0,3% del agente rejuvenecedor.
- Mezclar el RAP aditivado con el árido virgen, mezclando durante 35 segundos.
- Incorporar el betún virgen y mezclar.

Como la cantidad de producto rejuvenecedor era muy pequeña, se decide incorporar el producto por dispersión me-

dante vaporización, como se muestra en las siguientes fotografías en la Figura 5.

La impresión visual de las mezclas es idéntica en las cinco muestras, sin diferenciación aparente.

5.2 Análisis volumétrico

Se realizó un análisis volumétrico en muestras preparadas por compactación Marshall con 75 golpes para las cinco mezclas. Los resultados se presentan en la Tabla 4. Considerando las precisiones de la prueba, todas las mezclas bituminosas produjeron resultados similares y satisficieron el mismo rango de valores que la mezcla bituminosa de referencia.

Nótese que las cuatro mezclas con un 30% de RAP tuvieron un contenido de huecos ligeramente inferior que la Mezcla E de referencia. En general, la molienda y trituración crean una mayor tasa de polvo en el fresado. A pesar del hecho de que un 7.7% de este fresado pasó por el tamiz de 0.063 mm, su uso no tuvo un impacto significativo en el contenido de huecos en estas cuatro mezclas de laboratorio.

Si bien todos los valores de estabilidad Marshall están dentro de especificaciones, la Mezcla E con todos los materiales vírgenes tuvo la estabilidad Marshall más baja. Todas las mezclas de asfalto que contenían fresado obtuvieron valores de estabilidad Marshall mayor comparadas con la mezcla bituminosa de referencia. Cabe destacar que la Mezcla B, con

Tabla 4. Análisis volumétrico y ensayo Marshall para las 5 mezclas.

Parámetro:	Norma	Mezcla A	Mezcla B	Mezcla C	Mezcla D	Mezcla E	Unidad
Contenido de ligante	EN 12697-1	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	%
Densidad máxima	EN 12697-5	2546	2535	2542	2542	2549	kg/m ³
Densidad aparente	EN 12697-6	2455	2434	2449	2440	2430	kg/m ³
Huecos mezcla	EN 12697-8	3,6	4,0	3,7	4,0	4,7	%
Huecos áridos	EN 12697-8	15,2	14,9	14,9	14,3	15,2	%
Huecos rellenos	EN 12697-8	76,4	73,9	75,4	72,2	69,4	%
Estabilidad	EN 12697-34	16,0	17,9	15,3	17,0	14,5	kN
Deformación	EN 12697-34	2,6	2,4	2,5	2,5	2,5	mm

Tabla 5. Deformación permanente y sensibilidad al agua para las cinco mezclas de asfalto.

Parámetro:	Norma	Mezcla A	Mezcla B	Mezcla C	Mezcla D	Mezcla E	Unidad
Huecos mezcla	EN 12697-8	3,6	4,0	3,7	4,0	4,7	%
Resistencia a tracción directa probetas en seco	EN 12697-23	2,72	2,66	2,64	2,75	2,41	kPa
Resistencia a tracción directa probetas en húmedo	EN 12697-23	2,70	2,35	2,17	2,55	2,34	kPa
Sensibilidad al agua	EN 12697-12	99,0	88,4	82,2	92,9	97,3	%
Ensayo de rodadura, WTS _{AIR}	EN 12697-22	0,05	0,05	0,05	0,05	0,11	mm

Nota *: Todos los valores especificados en la tabla, están realizados sobre mezclas bituminosas fabricadas en el laboratorio

fresado incorporado en caliente y agente rejuvenecedor, presentó el valor más alto, especialmente cuando se compara con las Mezclas A y C con fresado incorporado en frío. Esto indica que con un valor de viscosidad más alto para el ligante procedente del fresado, una temperatura baja de incorporación del RAP no es suficiente para fluidificar el ligante y que se mezcle debidamente con el nuevo ligante virgen, Por tanto, el RAP se podría llegar a considerar en la mezcla como "roca negra" recubierta de ligante blando.

5.3 Caracterización de la mezcla estándar

Después del análisis volumétrico las cinco muestras fueron caracterizadas más a fondo por medio de deformación permanente y la sensibilidad al agua, de acuerdo con las normas de ensayo EN 12697-22 y EN 12697-12. Los resultados se presentan en la Tabla 5.

Todos los resultados de sensibilidad al agua cumplieron las especificaciones. Las Mezclas A y D, con la incorporación del fresado en frío, ligante virgen 35/50, y con/sin el agente

rejuvenecedor, tuvieron las resistencias secas más altas, y la Mezcla B, con incorporación de fresado precalentado y el agente rejuvenecedor, presentó un valor intermedio. Debido a que la clasificación de las mezclas fue diferente entre los resultados de la resistencia seca y la estabilidad Marshall, evaluamos más a fondo el módulo de rigidez para estas mezclas.

Por lo que respecta a la deformación permanente, todas las mezclas que contenían un 30% de RAP produjeron mejores valores que la Mezcla E de referencia. Una mejor resistencia a la rodada es una ventaja conocida de mezclas de asfalto que contienen RAP.

5.4 Más caracterización mecánica

Las cinco muestras fueron evaluadas más a fondo con respecto al módulo de rigidez de acuerdo con EN 12697-26 a 20°C, y el ensayo de fatiga de acuerdo con EN 12697-24 anexo D a 20°C y 10 Hz. Los resultados se presentan en la Tabla 6.

El módulo de rigidez y el rendimiento de fatiga son ambos importantes para el diseño del pavimento. Para un espe-

Tabla 6. Módulo de rigidez y ensayo de fatiga de las cinco mezclas.

Parámetro:	Norma	Mezcla A	Mezcla B	Mezcla C	Mezcla D	Mezcla E	Unidad
huecos mezcla	EN 12697-8	3,6	4,0	3,7	4,0	4,7	%
Ensayo de rigidez	EN 12697-26	9 900	10 500	7 300	10 900	6 800	MPa
Fatiga, ϵ_6	EN 12697-24	114	135	122	103	136	$\mu\text{m}/\text{m}$

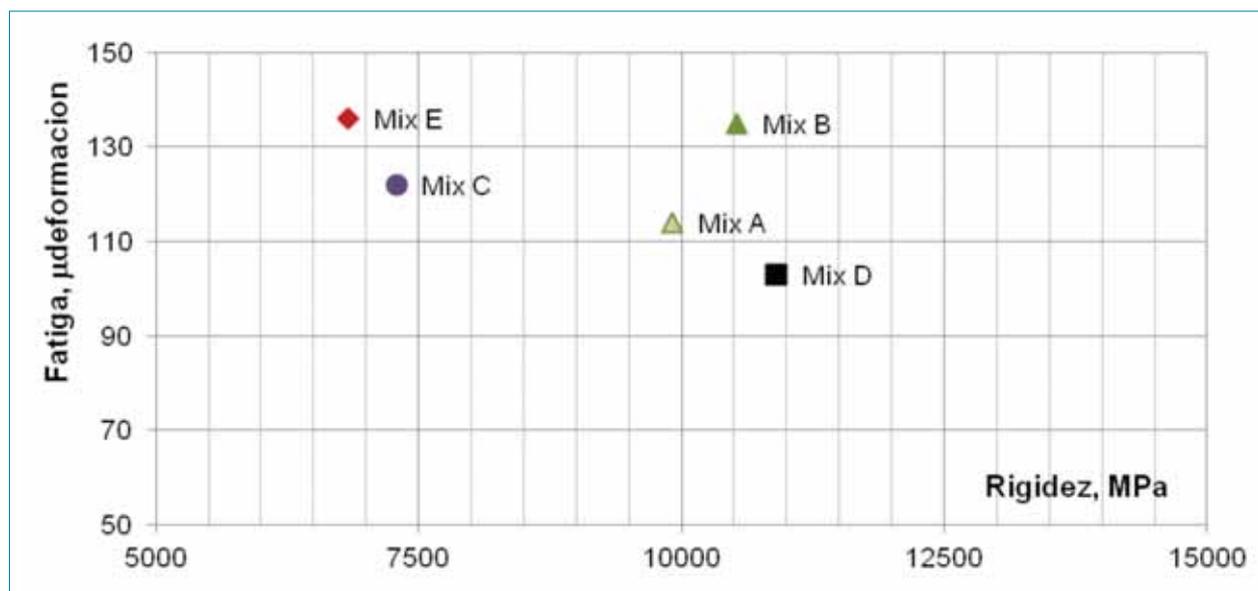


Figura 6. Deformación de fatiga ($\epsilon\epsilon$) en función del modulo de Rigidez (E) para las cinco mezclas.

sor dado del pavimento, un módulo más alto producirá una mejor distribución de carga dentro de la estructura, y por tanto una menor deformación. La combinación de ambos parámetros determina la vida prevista de diseño del pavimento, y ambos parámetros se incluyen para las cinco muestras en la Figura 6.

La Mezcla E, mezcla de asfalto de referencia con 0% de RAP, presentó el mejor rendimiento de fatiga y el módulo de rigidez más bajo. La Mezcla D, la mezcla de asfalto de control con un 30% de RAP y ligante virgen 35/50, presentó el peor rendimiento de fatiga y el módulo de rigidez más alto. Como era de esperar, las mezclas que contienen fresado no tratado sin ajustes de grado con ligante virgen son más rígidas y más frágiles.

Comparativamente, la Mezcla C, la mezcla de asfalto con un 30% de RAP y un 70% de ligante virgen blando 70/100, mostró un módulo de rigidez similar comparado con la mezcla virgen de referencia, pero exhibió una resistencia a la fatiga algo más baja. Las Mezclas A y B, las mezclas de asfalto con el agente rejuvenecedor, retuvieron el beneficio de un módulo de rigidez más alto del RAP. Nótese que el agente rejuvenecedor tiene un mayor efecto sobre la flexibilidad del asfalto que en la reducción del módulo. La Mezcla B demuestra que la resistencia de fatiga con el agente rejuvenecedor es similar a la Mezcla E de referencia cuando el RAP de la mezcla se procesa en caliente.

En términos de diseño del pavimento, un módulo más alto conduce a valores de deformación más bajos dentro de la estructura del pavimento. Para dos mezclas con el mismo criterio de deformación de fatiga, la que tiene un módulo más alto tendrá una vida más duradera. Por tanto, el agente rejuvenecedor puede mejorar la durabilidad y la vida del pavimento frente al uso de ligante blando.

6. Conclusión

La reutilización de fresado en mezclas bituminosas en caliente se ha hecho cada vez más importante en España. Mientras que las especificaciones actuales autorizan hasta un 50%, la reutilización se limita frecuentemente a un 15-20%. El fresado en España es muy duro, y por tanto, métodos para utilizar porcentajes más altos de RAP en otros países europeos no pueden usarse directamente en España.

La habilidad de asegurar un rendimiento satisfactorio de la mezcla con un porcentaje mayor del 20% de fresado es un paso importante. En particular, las mezclas diseñadas con un 20-30% de RAP y ligante blando están ya en el límite, sin la adición de rejuvenecedores.

Por lo tanto, para incorporar porcentajes superiores al 30% de RAP, se requiere el empleo de aditivos rejuvenecedores que restauren las propiedades del ligante procedente del fresado.

Este estudio se centró en producir una mezcla de calidad con un 30% de RAP. Se consideraron dos métodos de asegurar buena calidad, con el uso del aditivo de rendimiento SYLVAROAD™ RP 1000 de Arizona Chemical con un desempeño igual o mejor que el del ligante blando 70/100. Se consideraron ambas opciones en cuanto al análisis volumétrico, estabilidad Marshall, sensibilidad al agua, y caracterización avanzada tal como la deformación plástica, rigidez y fatiga. En todos los casos, las mezclas podrían diseñarse para cumplir con la especificación para todos los métodos, pero las mezclas con el agente rejuvenecedor ofrecieron mejores características.

Mientras que este estudio se centró en mezclas con un 30% de fresado, existe una oportunidad para usar el conocimiento ganado para incorporar mayores porcentajes de fresado (>50%) con la debida configuración de la planta, en particular si el fresado se precalienta. El conocimiento ganado en combinación con el agente rejuvenecedor permitirá el uso de un porcentaje mayor del 30% de fresado con la tecnología de calentamiento en planta y en el lugar de aplicación.

7. Bibliografía

- Artículo 22 PG-4 Reciclado en central caliente. (n.d.). Del Pozo, J., & Querol, N. (2012). Comportamiento del sistema betún viejo-betún rejuvenecedor en reciclado a altas tasas. *Asfalto y Pavimentación*, Número 5
- EAPA. (n.d.). Asphalt in Figures. Descargado el 15 de abril de 2014, de <http://www.eapa.org/asphalt.php>
- FEHRL. (n.d.). Direct-MAT. Descargado el 15 de abril de 2014, de <http://direct-mat.fehrl.org>
- Karlsson, R., & Isacson, U. (2006). Material-Related Aspects of Asphalt Recycling—State-of-the-Art. *Journal of Material and Civil Engineering*, 18(1), 81-92
- Ministerio de Transporte. (n.d.). PG4 Reciclado en central en caliente de capas bituminosas. Descargado el 15 de abril de 2014, de http://www.carreteros.org/normativa/pg4/articulos/a_22.htm
- Petersen, J. C. (2009). A review of the fundamentals of asphalt oxidation. *Transportation Research Circular*, E-C140
- PG-3. (n.d.). Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes
- Porot, L., & Nigen-Chaidron, S. (2007). Laboratory investigation of recycled binder performance. 6th LJMU International conference on Sustainable Construction Materials
- Proyecto Fénix. (n.d.). Proyecto Fénix. Descargado el 15 de abril de 2014, de <http://www.proyectofenix.es>
- Querol, Nuria; del Pozo, Julio (2011). Las 10 grandes respuestas sobre reciclado. *Asfalto y Pavimentación*, Número 3
- Read, J., & Whiteoak, D. (2003). *The Shell Bitumen Handbook*, Fifth edition. London: Thomas Telford Publishing

SYLVAROAD™ es una marca registrada, registrada en los Estados Unidos y/u otros países, de Arizona Chemical Company, LLC. © Copyright 2014 Arizona Chemical Company, LLC. Reservados todos los derechos.

#7

AFIRMACIONES ASFÁLTICAS

La reutilización total de las mezclas asfálticas es posible con la técnica de reciclado templado con emulsión a tasa del 100%

#SOSTENIBILIDAD_Y_MEDIO_AMBIENTE