

Las 10 grandes respuestas sobre reciclado

En 2011 ya nadie duda de la existencia de una técnica de diseño de firmes donde se emplea fresado para fabricar mezclas bituminosas en caliente. Se trata de una técnica muy valiosa por motivos técnicos, económicos y, sobre todo, medioambientales. En los últimos años mucho se ha avanzado en su conocimiento. Sin embargo, quedan muchas preguntas por resolver. En el presente artículo se pretenden resumir los resultados obtenidos en el recientemente concluido proyecto FENIX, pertenecientes a la tarea de reciclado en caliente a altas tasas, que fue liderada por SORIGUE. El objetivo principal de dicha tarea era avanzar en el conocimiento de la técnica de reciclado. Por eso se planteó cuál era la tasa máxima de reciclado que admitía una mezcla en caliente. Si era posible reciclar una mezcla que ya había sido reciclada anteriormente, evaluamos si las mezclas con caucho, que tanto crecimiento están teniendo últimamente, eran susceptibles de reciclado, y estudiamos cómo afectaba el uso de reciclado en el análisis del ciclo de vida de estas mezclas y si existe realmente una interacción entre el ligante envejecido y el nuevo. Las conclusiones obtenidas nos permiten afirmar que el diseño de los betunes rejuvenecedores debe realizarse en función que criterios reológicos obtenidos en función de las solicitaciones mecánicas, térmicas y de envejecimiento a los que va a ser sometido. Además, podemos afirmar que técnicamente es posible reciclar una mezcla a tasas incluso superiores al 80%, obteniendo resultados no sólo comparables a los de las mezclas convencionales, sino que se superan en determinados casos.

Palabras Clave: Reciclado, altas tasas, rejuvenecedor, reciclado de reciclado, reciclado de NFU.

In 2011 no one doubts the existence of a design technique where reclaimed asphalt is used to manufacture new hot mix asphalt. This is a very valuable technique for technical, economic and especially environmental reasons. The aim of the present article is to summarize the results obtained the recently finished Phoenix Project, where the task of reclaimed hot mix asphalt in very high rates was led by SORIGUÉ. The principal aim of the reclaimed asphalt task was improve in the knowledge of the technique, so we thought about what were the maximum rate of reclaimed asphalt allowed by the mix, could we recycle a mixture that had been previously recycled, rubber mixtures are capable of recycling, how does the use of reclaimed asphalt affects in the life cycle analysis of these mixtures, is there a really bonding interaction between the old binder and new one. The results obtained allow us to assert that the design of bitumen rejuvenating agent it'll be depending on rheological criteria obtained in terms of the mechanical, thermal and aging that will be submitted. We can also say that it is technically possible to recycle a mixture at a rate even higher than 80%, getting results, not only comparable to conventional blends but also exceeded in certain cases.

Key works: Reclaimed, high rates, rejuvenating, reclaimed from reclaimed, reclaimed tires out of use.

Núria Querol Sola, nuria.querol@sorigue.com
Julio del Pozo Velasco, juliodelpozo@telefonica.net

"Encuentra un trabajo que te guste y no volverás a trabajar ni un sólo día de tu vida" (Kung Fu Tse)

1. Introducción

El reciclado de pavimentos asfálticos incluye una serie de tecnología asociada ampliamente difundida a nivel mundial y con cada vez mayor aceptación.

Para facilitar el uso del RAP, muchos países han establecido normativas o incluso límites teóricos en su utilización. En España se elabora la orden circular 8/01 sobre el reciclado de firmes, donde, en el apartado de reciclado en central, se especifica que una mezcla bituminosa reciclada es aquella que contiene entre un 10 y un 50% en peso total de RAP. Sin embargo, según los datos de la EAPA, tan sólo se utiliza en España el 5% del material susceptible de su reutilización.

A pesar de los avances técnicos que se han hecho en los últimos años en el diseño de mezclas que contienen RAP en su formulación, continúa habiendo muchas preguntas rela-

Las 10 grandes respuestas sobre reciclado

cionadas con el correcto aprovechamiento de este material para diseñar mezclas en caliente de alta calidad:

- ¿Cuál es la tasa máxima de RAP que se puede utilizar en una mezcla bituminosa?
- ¿Podemos y/o debemos someter el RAP a algún tipo de pretratamiento para maximizar su calidad una vez incorporado en las mezclas asfálticas fabricadas?
- ¿Qué es más ventajoso, utilizar RAP en altas tasas en una obra determinada o generalizar su uso a bajas tasas y muchas obras?
- ¿Qué modificaciones deberemos hacer en la central de fabricación si queremos fabricar a altas tasas?
- ¿La calidad de las mezclas fabricadas con RAP es comparable a las mezclas convencionales?
- ¿A partir de qué tasa se deben utilizar ligantes específicos regenerantes?
- ¿Existe interacción entre el ligante nuevo y el viejo o simplemente el RAP actúa como un árido negro?
- ¿Cómo afecta la incorporación de RAP en el ciclo de vida de las mezclas?
- ¿Se puede reciclar una mezcla que ya había sido reciclada anteriormente?
- ¿Y las mezclas con caucho, que tan fuerte impulso están teniendo últimamente, son susceptibles de ser recicladas?

2.1 Parte experimental

La posibilidad de trabajar con altas tasas de material fresado (descrito en inglés como RAP; *Reclaimed Asphalt Pavement*) pasa por conocer el comportamiento de los agentes rejuvenecedores. Estos ligantes tienen la función de reconstituir el betún envejecido, obteniendo como resultado un ligante que ofrece características similares a las que ofrecería un betún nuevo.

Cuanto más envejecida esté una mezcla y mayor sea la tasa de reciclado que queremos alcanzar, mayores prestaciones deberá transmitir el ligante rejuvenecedor al viejo para conseguir un producto final similar a un betún convencional.

Inicialmente, el objetivo fue realizar un estudio exhaustivo de las características físicas, químicas y reológicas de diferentes agentes utilizados como rejuvenecedores: B150/200, un betún rejuvenecedor, emulsiones rejuvenecedoras o betunes rejuvenecedores con ceras. Incluso se ha estudiado un betún convencional tipo B50/70 para observar cuáles serían

los resultados alcanzados si no se utilizase ningún tipo de rejuvenecedor cuando se trabaja a altas tasas.

Con todos estos agentes se diseñan betunes a tasas de reciclado del 50 y 80%, se regeneran ligantes que ya habían sido rejuvenecidos anteriormente, e incluso regeneran ligantes que contenían caucho en su primera fabricación.

El comportamiento de los diferentes grupos se caracteriza primero en su estado original, posteriormente se somete a envejecimiento a corto plazo, *short term aging*, con el equipo RTFOT, que simula los fenómenos de oxidación que sufren los ligantes durante el proceso de fabricación, transporte y puesta en obra, y, finalmente, se someten a envejecimiento a largo plazo, *long term aging*, con el equipo PAV, que simula el efecto de oxidación a la capa superficial durante la vida útil (Buisson, J. et al. 2009).

Los ensayos de caracterización física inicial son los ensayos empíricos clásicos de punto de reblandecimiento A&B, penetración, viscosidad y fragilidad Fraass.

Para profundar más en el conocimiento de su composición química se utiliza la técnica de cromatografía de capa fina aplicando el método SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos) y se observa cómo evolucionan las diferentes fracciones cuando son sometidas al efecto de envejecimiento.

Finalmente, se utiliza un equipo de espectroscopia infrarroja para completar la caracterización química utilizando el método ATR-FIR (Attenuated Total Reflectance – IR con transformada de Fourier). En el siguiente espectro de IR se observan los picos característicos del betún original y cómo evolucionan después de ser sometidos a efecto del envejecimiento:

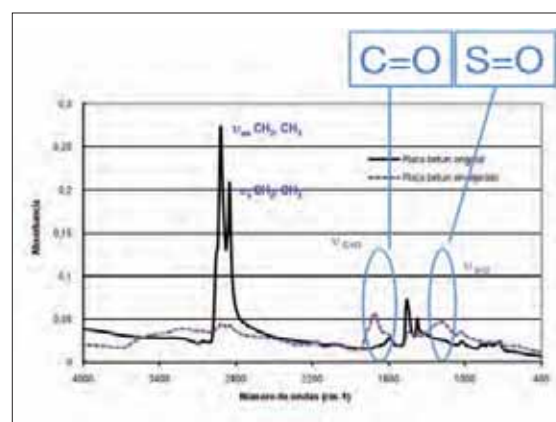


Gráfico 1: Espectro IR de un betún después de envejecimiento.

En el espectro IR se observa un aumento de los grupos sulfóxidos, acompañado de un leve aumento de carboxilos. Estos aumentos serán más o menos marcados en función de la resistencia al envejecimiento de los diferentes betunes. No hay que olvidar que, con técnicas cromatográficas, se separan diferentes especies en función de su afinidad a ciertos disolventes, mientras que en IR se puede observar la evolución de ciertos grupos funcionales y evaluar cualitativamente el grado de envejecimiento.

Para concluir el estudio, se evalúa cómo puede afectar este envejecimiento en las características reológicas, como las deformaciones plásticas y a fatiga, mediante ensayos realizados con un reómetro de corte dinámico DSR. Según los protocolos SHRP (*Strategic Highway Reserch Program*), la mejor forma para caracterizar un ligante es a través de sus propiedades reológicas fundamentales, no basta con ensayos empíricos. Teniendo en cuenta esto, se desarrollaron las especificaciones SUPERPAVE (*Superior Performing Asphalt Pavements*).

Estos ensayos permiten diseñar un betún en función de la climatología de la zona y la carga aplicada, es decir, el tráfico y la capa por la cual es diseñado.

2.2 Diseño de mezclas

Una vez concluido el primer estudio, se pasan a fabricar mezclas para evaluar su comportamiento mecánico una vez diseñada la mezcla y comprobar que los resultados obtenidos en el apartado de ligantes se corresponden con los obtenidos en mezclas. Se fabrican cuatro tipos de mezclas diferentes a diferentes tasas de reciclado, que se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Resumen de las mezclas fabricadas.

Tipo	Mezcla
Reciclado	AC 22 surf 50/70 D (R 50)
	AC 22 surf 50/70 S (R80)
Reciclado de reciclado RAP2	AC 16 bin S (R20)
	AC 16 bin S (R 70)
Reciclado de NFU RAP C	AC 16 bin S (R 20)
	AC 16 bin S (R 50)

En todas las mezclas se realizan principalmente los siguientes ensayos de caracterización mecánica:

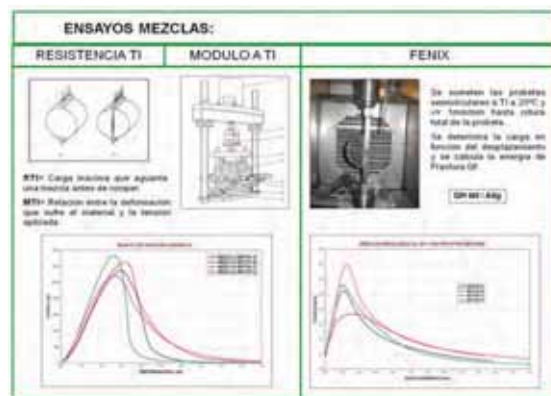


Gráfico 2: Resumen ensayos mecánicos realizados a las mezclas.



Gráfico 3: Resumen ensayos mecánicos realizados a las mezclas.

Mezcla bituminosa reciclada al 80%

A continuación se presentan los resultados de una de las mezclas, concretamente la que mayor reto presentaba en un principio, por tratarse de una mezcla con tasas de reciclado del 80%, tasa jamás utilizada para fabricar una mezcla bituminosa en caliente. Esta mezcla, AC 22 surf 50/70 S, se fabrica con tres rejuvenecedores diferentes: un betún rejuvenecedor con ceras, una emulsión rejuvenecedora y un betún rejuvenecedor comercial, en adelante betún 1, betún 2 y betún 3, respectivamente. Los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos son los que recoge la tabla 2.

En los ensayos de resistencia a la tracción indirecta, determinación del módulo de rigidez y Fénix se ha observado que las

Las 10 grandes respuestas sobre reciclado

Tabla 2: Resultados obtenidos en los ensayos mecánicos realizados en las mezclas con RAP 80%.

Parámetro	AC 22 surf 50/70 S 80% RAP		
	Betún 1	Betún 2	Betún 3
Densidad probetas cilíndricas (g/cm ³)	2.521	2.521	2.517
Densidad probetas ensayo pista (g/cm ³)	2.464	2.491	2.456
Módulo de rigidez a 20°C (MPa)	5461	5524	7484
RTI en seco a 15°C (MPa)	2,31	2,40	3,08
RTI en húmedo a 15°C (MPa)	1,88	2,38	2,7
Tensión máxima Fénix a 20°C (MPa)	0,37	0,36	0,41
IRT Fénix a 20°C (kN/mm)	4,68	5,43	4,98
Energía de fractura Fénix a 20°C (J/m ²)	498	371	411
Módulo a flexión en 4 puntos a 20°C (MPa)	6.077	4.434	7.315
Ley de fatiga a flexión en 4 puntos a 20°C [$\epsilon = a \cdot N^{(-b)}$], a	0,0009	0,0014	0,0007
Ley de fatiga a flexión en 4 puntos a 20°C [$\epsilon = a \cdot N^{(-b)}$], b	0,119	0,1419	0,102
Ley de fatiga a flexión en 4 puntos a 20°C [$\epsilon = a \cdot N^{(-b)}$], ϵ_6 , (μm)	173,88	178,7	171,04
WTSaire ensayo de rodadura (mm x 10 ³ ciclos)	0,0452	0,0802	0,0573
Deformación total ensayo de rodadura (mm)	2,4	3,3	2,60
V105/120 ensayo de pista ($\mu\text{m}/\text{min}$)	4,0	8,0	6,7
Deformación total ensayo de pista (mm)	1,8	2,3	1,1

propiedades mecánicas de las mezclas fabricadas con el rejuvenecedor más ceras y la emulsión más ceras han sido similares, cumpliendo en todos los casos con las exigencias normativas.

La mezcla fabricada con la emulsión ha obtenido mejores resistencias conservadas tras inmersión en los ensayos de tracción indirecta.

La mezcla fabricada a partir del rejuvenecedor comercial ha sido la que ha obtenido mayores módulos y mayores resistencias a tracción indirecta.

En los ensayos de fatiga, la mezcla fabricada con el rejuvenecedor convencional obtuvo de nuevo los módulos más elevados y una menor pendiente para la ley de fatiga. La

mezcla fabricada con el rejuvenecedor convencional fue la que obtuvo mayores tensiones máximas, aunque fue la mezcla fabricada a partir del rejuvenecedor + ceras la que mostró las mayores energías de fractura.

Aunque las diferencias no han sido muy importantes, se observa cómo la mezcla que obtuvo los módulos más elevados en los ensayos de determinación del módulo de rigidez a tracción indirecta ha sido la que ha obtenido un menor pendiente en la ley de fatiga. Por lo tanto, dado que los valores de ϵ_6 (deformación unitaria al millón de ciclos en el ensayo de fatiga) son similares, la mezcla 3 sería la más adecuada para firmes potentes con alto nivel de tráfico. Es conveniente observar cómo, a mayor ϵ_6 , menor pendiente (valor de b). Por lo tanto, se puede decir que, cuanto más bajo sea el valor de ϵ_6 , más adecuado para firmes delgados y con poco tráfico pero pesado y, por el contrario, cuanto más alto sea el valor de ϵ_6 , mejor para mezclas en base de firmes potentes con bajas deformaciones.

Mezclas Bituminosas Recicladas de Reciclado (RAP 2)

El reciclado de firmes bituminosos se configura como una de las tecnologías que permitirá disminuir el coste ambiental de la construcción y el mantenimiento de carreteras. No obstante, existe poca experiencia sobre el reciclado de pavimentos en los que ya se haya utilizado esta técnica en rehabilitaciones anteriores. De existir alguna dificultad para reciclarlos de nuevo, el primer reciclado podría perder parte de su atractivo como técnica ambiental, puesto que la etapa final de su ciclo de vida sería problemática.

El presente trabajo ha pretendido arrojar luz sobre la viabilidad técnica de emplear en la fabricación de mezclas bituminosas material fresado procedente de un firme anteriormente reciclado, incorporándolo en tasas altas, hasta el 70%. (Marcobal, J.R et al. 2010).

Para la fabricación de la nueva mezcla bituminosa, que ha de incorporar proporciones crecientes de RAP-2 hasta el 70%, se seleccionó una granulometría AC 16 bin S.

En total, se han estudiado por tanto tres formulaciones, que en función del contenido de RAP-2 se denominaron F0, F20 y F70, respectivamente.

Los valores mecánicos obtenidos en el reciclado de reciclado a diferentes tasas se resumen en la tabla 3.

Tras los ensayos descritos en los apartados anteriores, se opta por seleccionar unos contenidos de ligante óptimos,

Tabla 3. Resumen de resultados para las mezclas de reciclado de reciclado a tasas de 20% y 70%.

	% ligante s/a	V _m (%)	Marshall (EN 12697-34)			Tracción indirecta (EN 12697-12)			Pista de laboratorio (NLT-173)
			Est. (kN)	Def. (mm)	Est./Def (kN/mm)	Seco (MPa)	I(MPa)	RC (%)	V ₁₀₅₋₁₂₀ (µm/min)
F0	4,5	6,3	12,7	2,1	6	2,9	1,8	63	8
	5,0	3,6				3,0	2,0	66	14
	5,5	3,4				3,3	2,7	82	21
F20	4,5	6,1	13,0	1,9	6,8	2,4	1,7	70	7
	5,0	4,3				2,4	1,7	70	12
	5,5	3,7				2,4	1,9	79	23
F70	5,0	7,6	12,6	1,6	7,8	2,4	2,1	87	7
	5,5	6,9				2,5	2,5	100	9
	6,0	6,6				2,5	2,5	100	23

obtenidos como compromiso entre la resistencia a la acción del agua, que recomienda contenidos altos, y la resistencia a las deformaciones plásticas, que mejora al reducir el contenido de ligante.

Las principales conclusiones que podemos extraer son:

- El empleo de tasas altas de RAP-2 requiere un mayor tiempo de envuelta para lograr la transferencia de calor entre los áridos vírgenes y el material reciclado, así como para conseguir una adecuada envuelta del conjunto. Esto podría significar instalaciones industriales equipadas con cámaras de mezclado de áridos vírgenes y RAP-2 de mayor volumen, de modo que el tiempo de mezclado aumentase sin afectar al rendimiento horario de la planta. También puede suponer un mayor envejecimiento de la mezcla durante la etapa de fabricación.
- Para tasas altas (del orden del 70% de RAP-2), cabe mencionar que el exceso de finos que tiene el material fresado respecto a los husos granulométricos de mezclas bituminosas convencionales obligaría también a mejorar el sistema de clasificación de dicho RAP-2 y de los áridos vírgenes, de modo que se puedan componer granulometrías dentro de esos husos, tarea particularmente complicada en los tamaños más finos.
- La compactación es menos eficiente a medida que se incorpora mayor proporción de RAP-2.

- Al aumentar el contenido de RAP-2 la mezcla bituminosa resulta más rígida a temperaturas de servicio altas y pierde resistencia a tracción indirecta a temperaturas intermedias. Sin embargo, la presencia de partículas precubiertas de ligante y tiempos prolongados de envuelta puede ejercer un efecto beneficioso sobre la resistencia conservada tras inmersión, al menos con proporciones altas de RAP-2. Las resistencias a las deformaciones plásticas parecen similares a las de la mezcla sin RAP-2.
- El módulo dinámico de la mezcla bituminosa disminuye con el contenido de RAP-2 y su ley de fatiga mejora. Ambos fenómenos podrían atribuirse a la presencia de partículas de árido preenvueltas.
- Por todo ello, parece viable la fabricación y puesta en obra de mezclas con tasas altas, del orden del 70%, de RAP-2.

Mezclas bituminosas recicladas con polvo de neumático fuera de uso (RAP C)

El empleo de mezclas bituminosas con caucho de neumáticos fuera de uso está conociendo en España un importante desarrollo. Dentro de una década existirán ya muchos firmes que incorporan caucho y que, probablemente, habrán de ser reciclados. Sin embargo, aún no se ha estudiado suficientemente la viabilidad técnica de estos procesos de reciclado de

Las 10 grandes respuestas sobre reciclado

mezclas con caucho, que podrían ofrecer dificultades adicionales a las del reciclado de mezclas convencionales. El objetivo de este apartado es, precisamente, analizar dicha viabilidad (Gallego, J. et al. 2010).

En el presente estudio se ha empleado material procedente de una mezcla bituminosa con muy alto contenido de caucho, utilizada como sistema antirreflexión de fisuras, en la fabricación de nuevas mezclas bituminosas. Se han llegado a incorporar proporciones del 50% de material reciclado de la antigua mezcla.

Para la fabricación de la nueva mezcla bituminosa, que había de incorporar el RAP-C, se selecciona inicialmente una granulometría AC 16 bin S. El motivo fue utilizar una granulometría de tamaño máximo moderado para disminuir las dispersiones de resultados en el laboratorio. En cuanto a los contenidos de RAP-C a incorporar en la mezcla final se seleccionaron dos: uno de ellos relativamente moderado, el 20%, en correspondencia con experiencias ya contrastadas (Xiao et al., 2008); el otro, el 50%, más alto de lo experimentado hasta ahora. También se fabricó una mezcla con la misma granulometría y sólo árido virgen, de modo que sirviera de referencia. Por tanto, se han estudiado en total tres formulaciones, que por su contenido de RAP-C se denominaron F0, F20 y F50, respectivamente. La relación ponderal polvo mineral / betún que se adoptó fue de 1,1, y el ligante, como se ha indicado más arriba, de penetración 50/70. Esta granulometría se utilizó en las formulaciones F0 y F20.

Las características volumétricas de las mezclas son similares a las de las que se fabricaron durante la etapa anterior, de caracterización básica. No son idénticas, dado que el tipo de compactación es diferente, más allá de otros factores que pudieran considerarse. En general, de modo similar a lo que ocurría con las mezclas con RAP-2, la incorporación de RAP-C disminuye el módulo de la mezcla y mejora apreciablemente su ley de fatiga. A partir de los ensayos realizado con el RAP-C, podemos concluir:

- El empleo de tasas altas de RAP-C requiere un mayor tiempo para la transferencia de calor entre los áridos vírgenes y el material reciclado, así como para conseguir una adecuada envuelta del conjunto. Este fenómeno es relativamente poco importante cuando se incorpora un 20% de RAP-C, pero resulta significativo cuando se incorporan tasas del 50%, lo que podría dar lugar a la necesidad de diseños adaptados de las instalaciones industriales, a fin de no reducir el rendimiento de la producción.
- La incorporación de un 20% de RAP-C parece técnicamente viable, dando lugar a mezclas bituminosas de una cierta menor resistencia a tracción indirecta, aunque buena resistencia a la acción del agua. La resistencia a las deformaciones plásticas también es buena, debido sin duda a la presencia del caucho.
- La incorporación de un 50% de RAP-C resulta problemática cuando se trata de fabricar nuevas mezclas con contenidos de ligante en torno al 4,5%. El RAP-C (proceden-

Tabla 4. Resumen de resultados para las mezclas con reciclado de NFU a tasas de 20% y 50%.

	% ligante s/a	V _m (%)	Marshall (EN 12697-34)			Tracción indirecta (EN 12697-12)			Pista de laboratorio (NLT-173)
			Est. (kN)	Def. (mm)	Est./Def (kN/mm)	Seco (MPa)	I(MPa)	RC (%)	V ₁₀₅₋₁₂₀ (µm/min)
F0	4,5	6,3	12,7	2,1	6,0	2,9	1,8	63	8
	5,0	3,6				3,0	2,0	66	14
	5,5	3,4				3,3	2,7	82	21
F20	4,5	7,8	14,0	2,3	6,1	2,0	1,7	85	2
	5,0	5,4				2,4	2,2	92	4
	5,5	4,3				2,3	2,2	97	4
F50	9,2	5,0	12,9	2,0	6,45	2,0	1,7	85	2

te de mezclas antifisuras con más del 9% de ligante s/áridos) aporta todo el ligante de la nueva mezcla, lo que, desde el punto de vista operativo, no es viable.

- Sin embargo, sí parece viable fabricar mezclas bituminosas con el 50% de RAP-C procedente de mezclas antifisuras, fabricando una nueva mezcla antifisuras con granulometría y contenido de BMAV-1 apropiados a estas funciones. Se pueden presentar problemas en la zona de finos. Para evitarlos en este caso de estudio, se incorporó únicamente árido virgen grueso y cemento Portland. La mezcla resultante mostró mayor rigidez a temperaturas de servicio altas que la mezcla antifisuras de referencia, pero una buena resistencia a las deformaciones plásticas, similar a la de la mezcla antifisuras original.
- La incorporación de RAP-C disminuye el módulo dinámico de la mezcla bituminosa y mejora la ley de fatiga de la mezcla. Ello se debe tanto a la presencia de partículas de árido preenvueltas como a la presencia del caucho en la mezcla.

Como en toda investigación, los avances que se realizan sacan a la luz nuevas cuestiones, que deberían ser resueltas en el futuro. En este caso, probablemente los problemas que deban afrontarse, más allá del empleo de otros materiales, de cara a generalizar los resultados obtenidos, son:

- El tipo de instalación industrial, que permita prolongar los tiempos de envuelta y mejorar la interacción entre los ligantes nuevos que se incorporan durante el reciclado y los ligantes residuales, existentes en el RAP.
- Minimiza el envejecimiento de los ligantes y la mezcla durante esta etapa de su producción.
- Avances en el tipo de rejuvenecedor, que contribuyan a mejorar la interactividad entre ligantes residuales del RAP y ligantes nuevos, a trabajar a la menor temperatura posible y con el tiempo de mezcla mínimo. En este sentido, cabe preguntarse por el papel que podrían aportar aditivos que permitan reducir la temperatura de operación durante el reciclado, lo que sería, desde el punto de vista medioambiental, doblemente beneficioso.

Se trataría por tanto, de aprovechar las ventajas del empleo de RAP, como la presencia de partículas preenvueltas, y seguir mejorando los puntos conflictivos de esta tecnología.

No parece, en definitiva, que existan problemas importantes añadidos por el hecho de tratarse de segundos reciclados o de reciclados con caucho, pero sí puede que algunos de los problemas en “reciclados convencionales” se acentúen ligeramente, por lo que conviene seguir avanzando en las direcciones señaladas.

2.3 Análisis del ciclo de vida de mezclas recicladas (ACV)

Este apartado tiene como objetivo describir la metodología que, de forma específica, ha sido desarrollada para determinar la huella de carbono, basándose en el análisis de ciclo de vida (ACV), de la construcción de pavimentos asfálticos de carreteras mediante la técnica de reciclado en caliente, empleando distintas proporciones de material procedente del fresado de las mezclas asfálticas envejecidas (RAP).

La metodología del ACV ha experimentado una gran aceptación y desarrollo durante los últimos años. Para esta aplicación se ha adaptado de forma específica, con el objeto de garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos y poder obtener así conclusiones válidas. En el momento actual, sin embargo, los ACV presentan aún una serie de incertidumbres y riesgos:

- Existen numerosas metodologías susceptibles de aplicar a cada caso, lo cual lleva a resultados, en muchas ocasiones, dispares e incluso contradictorios.
- Generalmente se aplican de forma parcial, lo cual, en opinión de los autores, impide obtener conclusiones consistentes.
- Los datos de consumos energéticos y de emisiones, fundamentales en el proceso y en los resultados, se obtienen, en la mayoría de los casos, de bases de datos o estimaciones difíciles de comprobar.

Los resultados obtenidos en estas metodologías deben considerar dos aspectos fundamentales: la durabilidad y la reciclabilidad de cada una de las soluciones analizadas. Para ello, los parámetros se han calculado de forma unitaria; es decir, la unidad funcional considerada ha sido la tonelada de mezcla asfáltica en caliente fabricada y colocada en obra (t MBC). De esta forma, no serán comparables con otras actividades ni habrá distorsiones por las diferencias que podrían suponer los distintos espesores de capas considerados; por otro lado, se considera que la durabilidad de cualquier tone-

Las 10 grandes respuestas sobre reciclado

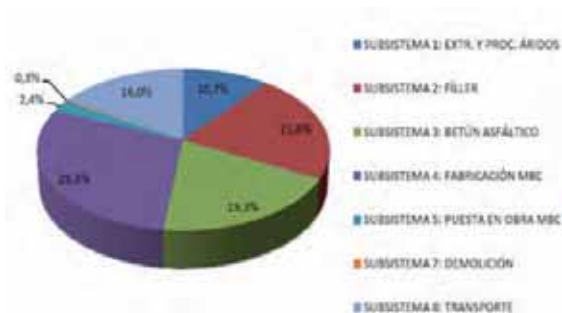


Gráfico 6: Contribución de cada subsistema en el cálculo del ACV.

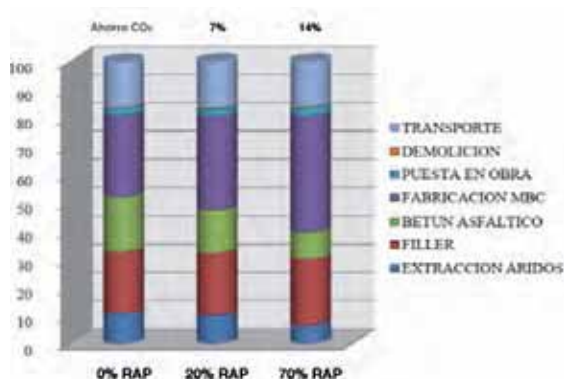


Gráfico 7: Influencia del uso del RAP en el cálculo de kg CO₂ eq / t MBC.

lada de mezcla asfáltica será, a priori, la misma. Por último, con el objeto de incorporar la reciclabilidad de los materiales, se ha considerado que los impactos de cualquier residuo o material reciclado empleado en el proceso son nulos.

Una de las innovaciones que supone esta metodología es la de estar basada en datos y ratios reales, medidos sobre instalaciones y obras representativas de estas técnicas de pavimentación en España, y otros contrastables y obtenidos por otros sectores. Para poder aplicarla a cualquier tipo de obra que pudiera surgir, todos los indicadores se han manejado en función de los parámetros o grados de libertad de los que se ha podido observar que dependen: distancias, potencia, rendimiento, tipo de combustible, etc.

El ecoindicador utilizado para este trabajo ha sido el **kilogramo emitido de CO₂ equivalente por tonelada de mezcla asfáltica (kg CO₂ eq. / t MBC)** (Sampedro, A. et al. 2011).

La fase clave corresponde al Inventario de ciclo de vida (ICV) o Inventario de cargas ambientales en las mezclas asfálticas en caliente (MBC), realizando los balances de mate-

ria y energía empleados tras definir correctamente el sistema estudiado y presentarlo mediante un diagrama de flujo, donde deben aparecer todas las etapas del proceso. Como criterio general, el transporte entre etapas de proceso, actividad fundamental a considerar, debe aparecer de forma agrupada como una sola actividad. Así, el sistema “mezclas asfálticas” está compuesto por una serie de subsistemas que deben evaluarse por separado. Estos subsistemas comprenden, por separado, los distintos procesos necesarios para su puesta en servicio, posterior funcionamiento en perfectas condiciones y demolición y retirada tras su vida útil. Los subsistemas considerados son: Extracción y procesado de áridos, Filler, Betún Asfáltico, Fabricación de la MBC, Puesta en obra de la MBC, Conservación, Demolición, Transporte.

En el gráfico 6 se representan los resultados obtenidos para una mezcla convencional en la que no se emplea ningún porcentaje de RAP. Los resultados de ACV están representados en porcentaje kg CO₂ eq. / t MBC. Como se puede observar, el subsistema que más influye en emisiones de CO₂ es el subsistema 4, correspondiente a la fabricación de la mezcla, contribuyendo en un 29,3% del total.

Con el objeto de analizar la viabilidad técnica del reciclado en caliente con altas tasas de mezclas asfálticas recuperadas de pavimentos ya reciclados, se diseñan dos tipos de mezclas, la primera con un 20% de RAP, y la segunda con una tasa del 70% de RAP. Aplicado el ACV, los resultados obtenidos, comparándolos con los de la mezcla de referencia, son los que se reflejan en el gráfico 7.

Como puede apreciarse, se obtienen, en ambos casos, ahorros de emisiones de CO₂ equivalente. Para la F20, el ahorro es del 6,7% y para la F70, el ahorro llegaría al 13,5% en el caso concreto planteado. Este ahorro se debe, fundamentalmente, a la reducción del betún asfáltico necesario y a la menor necesidad de extracción y procesamiento de áridos. Por el contrario, se aprecia que el sobrecalentamiento que requieren los áridos, debido al empleo de RAP, incrementa las emisiones de fabricación de la mezcla asfáltica.

Conclusiones

- Los ensayos empíricos clásicos de punto de reblandecimiento y penetración no son suficientes para caracterizar el comportamiento de un ligante.

- El diseño de un betún rejuvenecedor se ha de realizar haciendo un estudio reológico de sus propiedades, en función de las solicitaciones mecánicas, térmicas y de envejecimiento a los que va a ser sometido.
 - No hay que rejuvenecer por igual una capa de rodadura, como una intermedia o una de base, ni un betún que va a someterse a climas fríos, cálidos o calurosos.
 - El reciclado en caliente a altas tasas es viable en laboratorio, siendo posible rejuvenecer los betunes al efecto de obtener calidades adecuadas, bien para capas de base, intermedias o de rodadura.
 - Las mezclas obtenidas con los betunes rejuvenecidos no solamente no son inferiores a las convencionales, sino que superan a éstas en propiedades específicas.
 - La fabricación en planta a altas tasas presenta problemas todavía no resueltos satisfactoriamente, que obligan a modificaciones en la maquinaria actual.
 - El RAP producido en la actualidad se elimina sobradamente mediante tasas de reciclaje del 10% al 20%, por lo que, de momento, salvo excepciones que siempre habrá, no existe en este sector demanda de nuevos métodos que permitan el reciclado a altas tasas.
 - En el reciclado de rodaduras in situ sí que se utilizan altas tasas de reciclado, y es donde se puede aprovechar toda la experiencia obtenida en el laboratorio.
 - El ACV planteado para estas mezclas es favorable y las emisiones de CO₂ equivalente aumentan a medida que aumentamos la tasa de reciclado, pero a un nivel inferior del que esperaríamos a priori.
- Lesueur D, et al. 1996. A structure-related model to describe asphalt linear viscoelasticity.
 - Lesueur, D .2002. La rhéologie des bitumes. Principios y modificación
 - Mroueh, U., 2000. Life cycle assessment of road construction. Finnra Reports 17/2000. The Finis Nacional Road Administration.
 - NCHRP Report 430. Improved Safety Information to Support Highway Design. Transportation Research Board. National Research Council.
 - NCHRP REPORT 459. Characterization of Modified asphalt Binders in Superpave Mix design. Transportation Research Board. National Research Council.
 - NCHRP Report 465. Simple Performance Test for Superpave Mix Design. Transportation Research Board. National Research Council.
 - Sampedro a. 2011. Huella de carbono del reciclado en planta asfáltica en caliente con altas tasas de RAP. CILA 2011

Bibliografía

- Buisson J. 2009. Envejecimiento de los ligantes bituminosos empleados en mezclas recicladas en caliente con muy altas tasas. ASEFMA.
- Choki S. 2005. Life cycle assessment of road maintenance works in Sweden. Environmental Engineering and Sustainable Infrastructure (EESI) Report. Estocolmo.
- Imad L. et al..March 2007.Reclaimed asphalt pavement. A literature review. Illinois Center for Transportation . Series No. 07-001
- Lancaster M. 2009. Bitumen Lifecycle & Footprint. UK Technical Department, Nynas UK AB. London.