

# Consideraciones sobre el diseño de rehabilitaciones estructurales de firmes mediante técnicas de reciclado en el contexto de la norma 6.3 IC

Alberto Bardesi, alberto.bardesi@upm.es  
Miguel Ángel del Val, miguel.delval@upm.es

Universidad Politécnica de Madrid

Tras unas breves consideraciones teóricas, se presenta en este artículo un ejemplo práctico que muestra cómo, a pesar de las supuestas limitaciones derivadas de la normativa vigente en España, es posible diseñar una rehabilitación del firme de una carretera con una alta intensidad de tráfico pesado recurriendo a las técnicas de reciclado. A este respecto, hay que tener presente que muchos proyectistas no abordan las posibles soluciones basadas en el reciclado amparándose en lo que ellos interpretan que es una prohibición de la normativa. Es muy posible, ciertamente, que esta necesite ser actualizada, pero, aun así, no debe emplearse como excusa de un proyecto insuficiente. Otra cuestión es la disponibilidad de instalaciones y de máquinas para que el resultado de lo que se ejecute se corresponda con las previsiones del proyecto.

**Palabras clave:** firme, rehabilitación, reutilización, reciclado, mezcla asfáltica, material de fresado

After some brief theoretical considerations, this article presents a practical example of how, despite the supposed limitations derived from the current regulations in Spain, it is possible to design a rehabilitation of a road pavement with a high volume of heavy traffic using recycling technologies. In this regard, we have to take into account that many engineers do not address the possible solutions based on recycling on the grounds of what they believe is a prohibition of the official guidelines. It is certainly very possible that the guidelines need to be updated; however, it should not be used as an excuse of an insufficient design. Another issue is the availability of asphalt plants and compactors in order for the result of what is built to correspond with the design projection.

**Keywords:** pavement, rehabilitation, reuse, recycling, asphalt concrete, reclaimed asphalt pavement (RAP)

## 1. Introducción

Este artículo contiene una reflexión y un ejemplo sobre cómo diseñar firmes con materiales reciclados, aportando algunas sugerencias sobre la aplicabilidad y la caracterización de dichos materiales. Al plantear en un proyecto de rehabilitación estructural, la posibilidad de recurrir a técnicas de reciclado, lo primero de lo que hay que ser conscientes es de que este tipo de proyectos son, sin duda, los más complicados entre los de diseño de firmes. La identificación correcta de tramos homogéneos, la interpretación de los datos de auscul-

tación y la caracterización o valoración de los materiales resultantes de los procesos de reciclado ponen las cosas especialmente difíciles.

Aunque siempre hay quien prefiere abordar el problema sin más ayuda que sus conocimientos del comportamiento de los firmes y de los materiales que los componen, una primera recomendación para el proyectista es que tenga a mano normas, manuales u otros documentos fiables que le permitan ir contrastando las decisiones que va tomando. En el caso español, por ejemplo, las normas 6.1 IC (Secciones de firme) y 6.3 IC (Rehabilitaciones de firme) constituyen un excelente

## Consideraciones sobre el diseño de rehabilitaciones estructurales de firmes mediante técnicas de reciclado en el contexto de la norma 6.3 IC

punto de partida; el método AASTHO, especialmente en otros entornos geográficos, también es una herramienta muy importante. Manejar programas de dimensionamiento analítico es así mismo muy recomendable, pero no como sustitutos de los anteriores, sino como complemento. Y, por supuesto, el sentido común y la experiencia: si algo no “suena” bien, si algo “choca” en una solución, desconfíese, seguramente estará mal. Bien es cierto que aquí surge un grave problema: si uno no tiene sentido común, seguramente no lo sabe; si uno no tiene experiencia..., algún día hay que empezar. Y para empezar, no se olvide que el que hace una pregunta quizás parezca ignorante algunos minutos, pero quien no la hace, será siempre ignorante.

En cualquier caso, debe partirse del convencimiento de que las técnicas de reciclado abren una gama de posibles soluciones con las que, frente a las convencionales, se puede lograr una reducción del impacto ambiental, un aumento de durabilidad y un menor coste de la actuación, que es de lo que esencialmente se trata.

### 2. Aplicabilidad y caracterización de materiales reciclados

Si se pretende usar una técnica de reciclado, lo primero es asegurarse de que el material tiene las condiciones oportunas, esto es, que ha llegado, o está muy próximo a llegar, al final de su vida útil y, por otro lado, que sometido al proceso de reciclado el material obtenido tendrá unas condiciones mecánicas, a corto y a largo plazo, adecuadas para el futuro firme. Existe una excepción, sin embargo, puesto que en ocasiones puede interesar tratar un material, por ejemplo una capa granular, para aumentar notablemente su capacidad estructural, transformándolo en un suelocemento o en una gravaemulsión (aunque es discutible quizás si esto es propiamente un reciclado).

Si no se dispone del conocimiento, de la experiencia o de los equipos necesarios para abordar una solución con una determinada técnica de reciclado, es siempre mejor optar por otra técnica, evitando así dejar al director de obra en una difícil situación. Esto no quiere decir que no se deban proyectar soluciones tecnológicamente novedosas, sino más bien al contrario: se debe fomentar la innovación, pero entonces hay que dar al proyecto un enfoque diferente del habitual, especialmente en lo que se

refiere al sistema de licitación y a los requerimientos exigidos a los eventuales licitadores.

Por último, el proyectista debe ser conocedor de las posibilidades que ofrecen las distintas técnicas de reciclado. Difícilmente se estará ante un proyecto en el que pueda plantearse una amplia variedad de soluciones. Lo más normal es que, junto a las soluciones clásicas de rehabilitación, haya una, máximo dos, opciones viables con materiales reciclados, especialmente si se quiere que los materiales a reciclar procedan de la propia obra. En este sentido, se deben tener en cuenta las aplicabilidades reales de cada una de las distintas técnicas de reciclado.

#### 2.1 Reciclados *in situ* con cemento

Existen dos campos preferentes de actuación. En primer lugar están las “reconstrucciones” de firmes totalmente agotados, prácticamente arruinados. Es una situación a la que se llega por un mal proyecto, una deficiente ejecución y una inadecuada o inexistente conservación. La opción de reciclar los materiales existentes en una profundidad entre 20 y 30 cm (incluso más si se disponen medios de ejecución adecuados) permite un diseño que debe tomar como referencia una solución de firme nuevo (de la Norma 6.1 IC, por ejemplo), estableciendo algún tipo de equivalencia entre el material reciclado con uno convencional (la relación 1:1 con el suelocemento es la preconizada en el anejo 2 de la Norma 6.3 IC). De optarse por un dimensionamiento analítico habría que caracterizar en laboratorio sobre un material lo más parecido al que resultaría del proceso (aspecto clave, como en cualquier otra técnica de reciclado). Si se obvia esta determinación, hay que ser prudentes y emplear módulos y una ley de fatiga similares a las de un suelocemento (por ejemplo:  $E = 8.000 \text{ MPa}$ ;  $\sigma = 0,25$ ;  $r/RF = 1 - 0,08 * \log N$ )

Por otro lado, hay que hacer referencia a la adaptación de firmes de vías de baja intensidad de tráfico (caminos rurales, vías agrícolas, vías forestales, carreteras de uso general con muy bajas intensidades de tráfico pesado) a un tráfico superior. Sobre este campo de actuación existe una experiencia excelente en algunas administraciones españolas. En una línea similar, aunque se trata de algo distinto, hay que llamar la atención sobre la aplicación de esta técnica en operaciones de ensanchamiento de la plataforma. En estos casos se deben adoptar algunas precauciones muy importantes:

- Tomar en consideración la enorme diferencia entre los módulos de los materiales granulares no tratados y los módulos de los tratados con cemento.
- Hay que recordar que los materiales tratados con cementos suelen ser más impermeables que los granulares (atención a la acumulación de agua en el firme antiguo en caso de eventuales infiltraciones a través de superficies fisuradas).
- Sobre los soportes nuevos de las bandas de ensanche difícilmente se podrán dejar con un buen acabado los materiales tratados con cemento, por lo que habrá que recurrir a operaciones posteriores de reperfilado.

Cualquiera que sea el caso, los factores clave del éxito, supuesto que se cuenta con un equipo de reciclado de potencia suficiente para las operaciones de fresado y de mezcla en el espesor establecido, son el sistema de incorporación del cemento (de preferencia en forma de lechada, para poder garantizar la homogeneidad de la dotación de conglomerante), el equipo de compactación (que debe garantizar en todo el espesor las densidades exigidas) y el rigor en los tiempos de curado y en el momento de llevar a cabo la prefisuración (siempre aconsejable).

## 2.2 Reciclado en frío *in situ* con emulsión o con espuma de betún

El campo de aplicación menos habitual es el de la transformación de firmes de vías de baja intensidad de tráfico con subbases y bases de materiales granulares (normalmente zahorras, aunque puede encontrarse también macadam al agua) en otros con base bituminosa constituida a partir del reciclado en frío (lo que se complementa con una o varias capas de mezcla asfáltica, aunque a veces se pueda recurrir también a una capa de rodadura formada por un riego con gravilla o una lechadas bituminosa).

En segundo lugar está el reciclado *in situ* de mezclas bituminosas agotadas como técnica alternativa a la rehabilitación más tradicional basada en el fresado de esas mezclas y su reposición. Para valorar esta alternativa y poder diseñar la rehabilitación se puede recurrir también al Anejo 2 de la Norma 6.3 IC, el cual establece una equivalencia de 0,75 entre el reciclado en frío (entendido en el sentido del artículo 20 del PG-4) y la mezcla asfáltica en caliente convencional. Por

supuesto, cabe también realizar un dimensionamiento analítico, para lo que se necesitará caracterizar el material en laboratorio.

Más complicado es proponer valores de módulos y leyes de fatiga genéricas para estos materiales. Los valores del módulo de rigidez evolucionan con el grado de maduración, desde valores próximos a los de un material granular tras la compactación, hasta valores comparables a los de una mezcla tipo AC base G al cabo de 12-18 meses. Adoptar unos módulos de  $E = 3.000 \text{ MPa}$  y  $\nu = 0,35$  podría ser aceptable en primera instancia y a falta de mejores datos. Más difícil aún es elegir una ley de fatiga, por la falta de estudios sistemáticos sobre esta técnica.

Aspectos clave en estos procesos, aparte de contar con el equipo de reciclado adecuado, son la continuidad de las operaciones (para poder garantizar una granulometría razonablemente uniforme del material fresado o RAP) y un potente equipo de compactación (que pueda asegurar altas densidades con un mínimo de agua de aportación).

## 2.3 Reciclado templado en planta con emulsión o con espuma de betún

Es la versión más "moderna" de los reciclados con materiales bituminosos y se sitúa a medio camino entre los reciclados *in situ* con emulsión y los reciclados en caliente en planta. Con los primeros comparte el tipo de ligante y la proporción de RAP (100 %) y con los segundos las instalaciones de fabricación y de puesta en obra, así como los campos de aplicación. La combinación de temperatura media ( $< 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ) con la humedad proporcionada por la emulsión permiten una compactación más eficiente que en frío, lo que redundará en una calidad mayor del producto final. Esta técnica, aún incipiente pero ya con indudables éxitos, se configura como una de las alternativas más interesantes de empleo del RAP y a buen seguro ocupará próximamente un lugar entre los sistemas recogidos en España en el PG-4. La clave del éxito consiste en realizar una adecuada clasificación del RAP (en dos o tres tamaños diferentes) y en disponer de una planta con una configuración que permita el calentamiento del RAP sin riesgo de quemar el betún.

Por su forma de fabricación, al reciclado templado en planta debería, a efectos de valoración estructural, asignársele un mejor coeficiente de equivalencia en términos de

## Consideraciones sobre el diseño de rehabilitaciones estructurales de firmes mediante técnicas de reciclado en el contexto de la norma 6.3 IC

mezcla en caliente nueva que el reciclado en frío: coeficientes de 0,8 o de 0,85 podrían considerarse adecuados en principio. No se dispone aún de información acumulada suficiente para establecer criterios de caracterización a efectos de dimensionamiento analítico, por lo que en cada caso debería recurrirse a realizar los ensayos pertinentes. De todas formas es de esperar que los valores se sitúen bastante próximos a los de las mezclas en caliente, al menos a las del tipo AC base G.

### 2.4 Reciclado en caliente en planta

Al igual que los reciclados templados, los reciclados en caliente en planta tienen también dos campos de aplicación preferentes. Por un lado, en operaciones de rehabilitación importantes son una alternativa, dentro de la propia obra, a la solución de reposición de zonas fresadas con mezcla nueva. La cuestión principal es definir la proporción de RAP en la mezcla reciclada, teniendo en cuenta los espesores y las anchuras fresados frente a los de las capas en las que se podría emplear dicha mezcla reciclada; obviamente, hay que disponer de la planta adecuada para poder trabajar con la proporción de RAP que se determine.

El segundo campo es el del empleo de mezclas recicladas en cualquier tipo de obra: nueva construcción, recrecimiento o reposición tras fresado. Sin duda es el campo de aplicación prioritario en las grandes zonas metropolitanas donde se producen frecuentes, pero relativamente pequeñas, operaciones de fresado y reposición. Es imprescindible disponer de un eficiente sistema de almacenamiento, clasificación y homogenización del RAP que permita obtener el máximo rendimiento a numerosas entradas de RAP de orígenes diversos. Igualmente, la planta deberá disponer de un sistema de calentamiento del RAP adecuado a los porcentajes de RAP que se quieran utilizar.

Respecto a la caracterización del material de cara al dimensionamiento, aparte de que siempre sea recomendable realizar los correspondientes ensayos de determinación de módulos y de la ley de fatiga, se puede recurrir como primera aproximación a la equiparación con mezclas convencionales. Desde el punto de vista del módulo quizá sea razonable pensar en mezclas del tipo AC base S, es decir, en valores de los módulos del orden de  $E=6.000-7.000$  MPa y  $=0,33$ . Sin embargo, en lo que a la ley de fatiga se refiere

parece más prudente decantarse por las de las mezclas del tipo AC base G. En las normas 6.1 IC y 6.3 IC se adopta una ley de fatiga idéntica ( $r=6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$ ) para todas las mezclas del tipo AC, excepto para las de alto módulo (MAM), pero para mezclas recicladas se habla de una ley específica (se entiende que a determinar en cada caso en base a ensayos). Siguiendo con el criterio de prudencia podría emplearse un coeficiente de 6,617 (correspondiente a mezclas MAM) o de 6,443 (propugnado en el método ICA-FIR de la Junta de Andalucía para las mezclas del tipo AC base G) en lugar del 6,925, manteniendo sin embargo el exponente de N.

Si prefiere la simplificación que supone el uso de coeficientes de equivalencia en términos de mezcla nueva, se dispone de una referencia en el Anejo 2 de la Norma 6.3 IC, que cifra esta equivalencia entre 0,8 y 1. Resulta evidente que el valor de 1 es perfectamente aplicable a mezclas recicladas con bajo contenido en RAP (de hecho cuando el porcentaje de RAP es inferior al 10 % la mezcla se debe considerar como nueva a todos los efectos). A falta de mayor concreción en futuras versiones de la propia Norma 6.3 IC o en las especificaciones sobre materiales reciclados en el PG-4, habría que relacionar ese coeficiente con el contenido concreto de RAP (a más RAP, más se aleja la mezcla reciclada de una mezcla nueva. El límite inferior estaría en el 0,8 que parece propuesto para los mayores porcentajes de RAP ( $\geq 50$  %)). También tendría su lógica establecer alguna modulación al coeficiente de equivalencia en función de las características de la planta asfáltica y de su capacidad para manejar mayores o menores contenidos de RAP, pero no parece fácil poder considerar esto en la fase de proyecto.

### 3. Un ejemplo de aplicación

Supóngase que se está planteando la rehabilitación del firme de una de las dos calzadas de un tramo de 12 km de una autovía de dos carriles por sentido. La autovía se encuentra en una zona con temperaturas muy suaves en verano y de baja pluviometría (menos de 600 mm anuales). La obra se construyó en el año 1999. La sección del firme (ver figura 1), apoyada en una explanada de categoría E2, está formada por 20 cm de suelocemento (SC), 20 cm de gravacemento (GC), una capa intermedia de 9 cm de mezcla asfáltica (granulome-

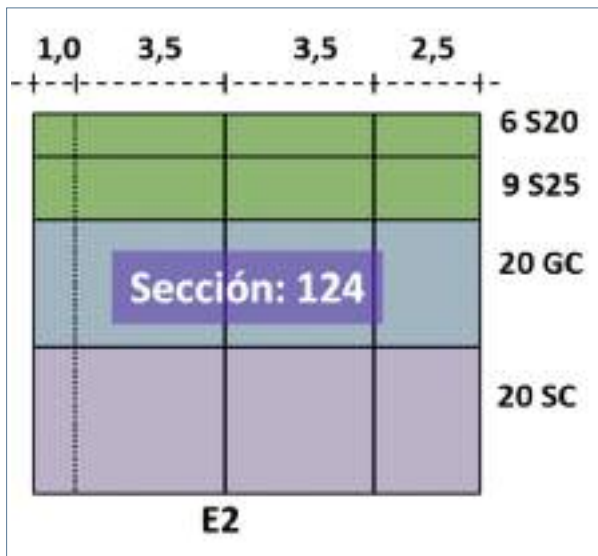


Fig. 1. Esquema de la sección de firme existente.

tría S25, áridos calizos y un 4,2 % s/áridos de betún que originalmente era 60/70) y una capa rodadura de 6 cm de mezcla asfáltica (granulometría S20, áridos silíceos y un 4,75% s/áridos de betún que originalmente también era 60/70).

En la primavera de 2014 se ha procedido a una auscultación general del tramo con vistas a evaluar su capacidad estructural y a redactar un proyecto de rehabilitación. La entrada en servicio de la obra estaría prevista para el otoño de 2015. Los datos disponibles son:

- La IMD del tramo, calculada a través de los datos de aforo disponibles, es en 2013 de 19.850 vehículos, con una proporción de vehículos pesados del 12,25 %. El crecimiento anual acumulativo de los 5 últimos años del tráfico pesado ha sido del 1,2 % pero, por seguridad, se adoptará un 4 %.

- La inspección visual del tramo mostró, de forma resumida, un agrietamiento transversal característico cada 4-6 m en todo el tramo y una grieta longitudinal aproximadamente coincidente con la línea de separación de carriles. En el carril derecho, el agrietamiento transversal inicial se ha ido ramificando en algunas zonas con pérdida de material que ha tenido que ser bacheado en distintas actuaciones de conservación rutinaria. Adicionalmente, se observa un problema generalizado de envejecimiento de la capa de rodadura con algo de fisuración.
- Los valores medios de CRT obtenidos con SCRIM son de 0,38 en el carril derecho y de 0,43 en el izquierdo.
- La auscultación estructural, realizada con deflectómetro de impacto cada 200 m, permite distinguir dos zonas (A y B) claramente diferenciadas. Los valores de deflexiones, ya corregidos, son los de la Tabla 1 (en primera instancia no se han considerado los cuencos de deflexión).

Se desea considerar una solución de recrecimiento conforme a la Norma 6.3 IC y alternativamente una solución basada en técnicas de reciclado, pero que cumpla también los criterios de la Norma 6.3 IC. Se compararán económicamente entre sí.

Los ocho pasos que deberían darse son los que se exponen seguidamente.

#### 1. Determinación de la categoría de tráfico pesado (en 2015) y tipo de sección estructural

Tráfico:  $19.850 \times 0,5 \times 0,1225 \times 1,042 = 1.315$  veh. Pesados por día y carril T1

Tipo de sección: SC+GC+MB Semirrígida

Tabla 1. Resumen de la medida de deflexiones.

Zona	Carril	Longitud	Deflexión patrón	Deflexión de cálculo
A	Derecho	8000m	75-90	125-150
	Izquierdo	8000 m	25-35	50-80
B	Derecho	4000 m	40-65	80-125
	Izquierdo	4000 m	15-25	< 40

# Consideraciones sobre el diseño de rehabilitaciones estructurales de firmes mediante técnicas de reciclado en el contexto de la norma 6.3 IC

Tabla 2. Espesores de recrecimiento.

Zona	Carril	Deflexión de cálculo	Recrecimiento mínimo (cm)	Recrecimiento necesario (cm)
A	Derecho	125-150	18	18
	Izquierdo	50-80	12	18
B	Derecho	80-125	15	15
	Izquierdo	< 40	Act. preventiva	15

## 2. Determinación de zonas localizadas en las que aparece agotamiento estructural que afecta a la explanada

En estas zonas habría que realizar reparaciones de saneo (incluyendo la explanada). Para determinar si son necesarias se parte del valor de la deflexión patrón, que se compara con los valores de la Tabla 2 de la Norma 6.3 IC. Dado que no existe ningún punto que presente una deflexión patrón superior a 100 se pasa sin más a la siguiente fase.

## 3. Determinación de zonas localizadas en las que hay un agotamiento estructural del firme

Se trata de zonas en las que sería necesario realizar actuaciones de saneo sobre el firme si no se llevase a cabo un recrecimiento en el tramo en el que están. Para ello se compara el valor de la deflexión patrón con los de la Tabla 3 de la Norma 6.3 IC: las zonas que presentan una deflexión patrón superior a 40 (el valor de referencia para el tipo de sección estructural y la categoría de tráfico pesado) pertenecen todas ellas al carril derecho. Caben las opciones de recrecimiento, de fresado y reposición, y de fresado, reposición y recrecimiento.

## 4. Espesores mínimos de mezcla asfáltica nueva equivalente tras la rehabilitación

De acuerdo con la Tabla 4 de la Norma 6.3 IC, si tras el proceso de rehabilitación se mantiene la gravacemiento el espesor mínimo final de mezclas asfálticas equivalentes a nuevas debería ser de 18 cm. Este criterio debe aplicarse siempre que se frese o se recicle el firme existente.

## 5. Cálculo de espesores de recrecimiento

Con la categoría de tráfico pesado y la deflexión de cálculo se entra en la Tabla 5B de la Norma 6.3 IC para obtener el espesor mínimo de recrecimiento. Para mantener la rasante

habría que recrecer en toda la anchura de la sección con el espesor máximo de ambos carriles, por lo que la solución quedaría como se indica en la Tabla 2. Esto supondría colocar espesores de recrecimiento muy superiores a los necesarios tanto en el carril izquierdo como en los arcenes.

## 6. Análisis de la solución con fresado del carril derecho y recrecimiento

La utilización de esta solución permite optimizar el espesor de mezcla en cada carril, evitando tener que extender el espesor de recrecimiento del carril con mayor deterioro a todo lo ancho. Se parte de que se va a disponer una rodadura BBTM 11B en toda la anchura, lo que vendría obligado porque es el único tipo de mezcla que la Norma 6.1 IC acepta para la categoría de tráfico pesado T1 y una zona pluviométrica seca.

### Zona A

Como el mínimo recrecimiento de ambos carriles es 12 cm, se dispondrá sobre ellos una capa intermedia de 9 cm de mezcla del tipo AC22 bin S y después los 3 cm de BBTM 11B en la capa de rodadura. Lógicamente, la capa intermedia se colocaría también tanto en el arcén interior como en el exterior. Siempre que se frese y se repone hay que comprobar si se cumplen los espesores mínimos de mezcla equivalente a nueva, teniendo en cuenta la aportación de la mezcla efectivamente nueva y la de la mezcla antigua que no se va a fresar afectada de un coeficiente de minoración que tenga en cuenta su grado de deterioro. En el carril derecho faltarían 6 cm de mezcla nueva para llegar a los 18 cm de espesor de recrecimiento que, además, coinciden con los del criterio de espesor mínimo de mezcla nueva equivalente. La solución sería fresar 6 cm y reponer con mezcla del tipo AC22



base S en los 3,5 m del carril derecho. Aun siendo más caras que las G, las mezclas S tienen un mejor comportamiento frente a la reflexión de fisuras, por lo que en este caso, sobre una capa de gravacemento, sería la mejor opción.

### Zona B

Como en el carril izquierdo y en el arcén no hace falta recrecer, en el carril derecho faltarían 12 cm de mezcla nueva para llegar al espesor de recrecimiento. La solución sería fresar y reponer con mezcla AC32 S en los 3,5 m de dicho carril derecho. Pero dado que se fresa, el criterio de diseño debe ser el del espesor mínimo de mezcla sobre la gravacemento; como este espesor mínimo es de 18 cm, se necesita fresar y reponer los 15 cm actuales. La solución, en definitiva, sería fresar los 15 cm y reponer con 6 cm de AC22 bin S y 9 cm de AC32 base S en el carril derecho, además de poner los 3 cm de BBTM como capa de rodadura nueva en toda la anchura, solucionando así los problemas de envejecimiento de la capa rodadura antigua en los arcones y en el carril izquierdo. Como medida adicional, en la zona no fresada se debería pensar en realizar un sellado de fisuras previo a la colocación de la capa nueva de BBTM.

## 7. Análisis de la solución con materiales reciclados de la misma obra

### 7.1 Reciclado con cemento

Esta solución no tiene sentido en este caso, pues si se reciclan las capas de mezcla con cemento se obtendría un ma-

terial similar al suelocemento ubicado sobre dos capas de naturaleza análoga. Además habría que seguir disponiendo un mínimo de 18 cm de mezclas asfálticas. Por tanto, esta solución queda descartada.

### 7.2 Reciclado en frío con emulsión

#### Zona A

Teniendo en cuenta una equivalencia entre el reciclado y una mezcla nueva de 0,75, para obtener un espesor equivalente a 6 cm de mezcla del tipo AC22 S, será necesario reciclar en un espesor de 8 cm; esto es factible, pues hay un total de 15 cm de mezcla. Se debería abordar un análisis económico en el que se tuviese en cuenta el ahorro de áridos y de betún, así como el ahorro por no tener que llevar a vertedero o planta de reciclado parte del material de fresado. Esta solución podría ser viable en este tramo.

#### Zona B

Hay varias limitaciones que deben ser tenidas en cuenta. Por un lado, la citada equivalencia de 0,75 (Tabla 11 de la Norma 6.3 IC) entre la mezcla reciclada en frío y la mezcla nueva convencional; en segundo lugar, que el espesor máximo de reciclado en frío es de 12 cm; en tercer lugar, que con una categoría de tráfico pesado T1 un reciclado en frío debe quedar cubierto por un mínimo de 8 cm de recrecimiento; finalmente, que hay que alcanzar los 18 cm mínimo de mezcla equivalente sobre la gravacemento. Por ello, habría que disponer una capa intermedia de mezcla, cuyo espesor mínimo sería de 5 cm, bajo la rodadura es de 3 cm; así se alcanzarían los 8 cm mínimos de recrecimiento y se necesitarían otros 10 cm de mezcla equivalente a nueva que se obtendrían mediante el fresado en frío de los 12 cm superiores, que equivaldrían a 9 cm de mezcla nueva (los 3 cm inferiores aportarían el centímetro restante: un factor de equivalencia de 0,33 parece prudente).

No parece, en principio, que el ahorro de áridos y de betún, así como de no tener que llevar a vertedero material de fresado, vaya a ser mayor que el coste de tener que emplear una unidad nueva (equipos diferentes) y, sobre todo, de la nueva capa intermedia que habrá que colocar. Por tanto, esta solución en el tramo B no parece a priori

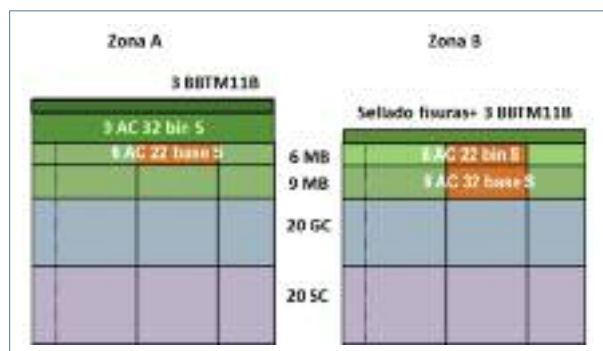


Fig. 2. Esquemas de las soluciones con fresado del carril derecho y recrecimiento.

## Consideraciones sobre el diseño de rehabilitaciones estructurales de firmes mediante técnicas de reciclado en el contexto de la norma 6.3 IC

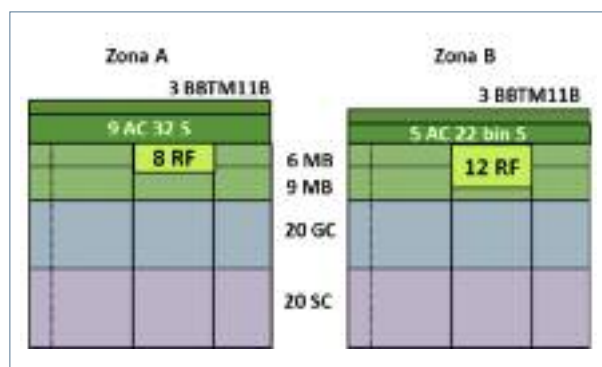


Fig. 3. Esquemas del posible reciclado en frío con emulsión.

viable económicamente, aunque tiene la ventaja de emplear el 100 % del RAP.

### 7.3 Reciclado en caliente en planta

La Norma 6.3 IC limita el uso del reciclado en caliente de la siguiente forma cuando la categoría de tráfico pesado es la T1:

- En los carriles: se requiere un espesor mínimo de recrecimiento de 6 cm
- En los arcones: se requiere que haya una capa de rodadura sobre el material reciclado.

De acuerdo con esto, en el ejemplo planteado la mezcla reciclada en caliente se podría utilizar en:

- Zona A: reposición del fresado (6 cm) y arcones (9 cm)
- Zona B: reposición de los 9 cm inferiores del fresado.

Por otro lado está la cuestión de la equivalencia estructural. La Tabla 11 de la Norma 6.3 IC establece un rango de 0,8 a 1 como equivalencia entre una mezcla reciclada y una nueva, pero no se detallan criterios de asignación dentro de ese rango. A su vez, el PG-3 admite el uso de hasta un 10 % de RAP en una mezcla para que sea considerada como nueva y en el artículo 22 del PG-4 se limita el uso de RAP en mezclas recicladas al 50 %.

De entrada, y como criterio de prudencia, se podría establecer el empleo de un 10 % de RAP en las mezclas para capa intermedia y un coeficiente de equivalencia de 1,0 en las mezclas recicladas en las que no se superase el 25 % de RAP. Debe tenerse en cuenta que en este momento en Espa-

ña apenas hay todavía plantas asfálticas que permitan trabajar con garantías con proporciones superiores de RAP.

De esta forma se sustituirían la mezcla de reposición de 6 cm del carril derecho de la zona A y los 9 cm inferiores (antigua capa intermedia) de los 15 fresados en el carril derecho de la zona B por mezcla reciclada con un 25 % de RAP. Además, en el recrecimiento del arcén exterior de la zona A se emplearía también mezcla reciclada con el 25 % de RAP; en el resto de la capa intermedia de recrecimiento de la zona A (arcén interior y los dos carriles) se emplearía mezcla con un 10 % de RAP. En definitiva, se aprovecharía en la propia obra un 46,5 %, aproximadamente, del RAP obtenido en el fresado. Obviamente, subiendo el porcentaje de RAP en las mezclas recicladas (hasta el límite del 50 % permitido en este momento por la Norma 6.3 IC), podría aumentar el aprovechamiento del fresado, pero también habría que cuestionarse el coeficiente de equivalencia adoptado, lo que obligaría a replantear el conjunto de la solución. El esquema de la solución adoptada sería el indicado en la Figura 4.

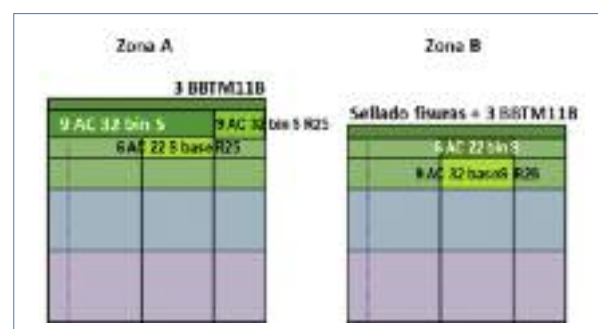


Fig. 4. Esquemas de las posibles soluciones utilizando mezcla reciclada en planta.

### 7.4 Opciones fuera del ámbito de la Norma 6.3 IC

Cabe pensar, por supuesto, en la posibilidad de aprovechar en la mayor medida posible el RAP generado dentro de la obra obviando algunas de las limitaciones que establecen la Norma 6.3 IC o el artículo 22 del PG-4. Por ejemplo, podría plantearse ir más allá del límite del 50 % de RAP. Como se ha indicado, esto sólo es factible con algunas plantas asfálticas, las de doble tambor concéntrico, por ejemplo, y requiere además unos sistemas de clasificación y dosificación del RAP muy precisos y rigurosos. Así mismo, como también se ha apuntado más arriba, habría entonces que reconsiderar el co-



eficiente de equivalencia (adoptando, por ejemplo, un valor de 0,80-0,85).

Otra posibilidad sería emplear mezcla reciclada en la capa intermedia de la zona A. Con esta medida se aumentaría el porcentaje de RAP aprovechado hasta, aproximadamente, el 80 %. Si, simultáneamente, se elevase la tasa de RAP en la mezcla reciclada al 31 % se estaría aprovechando el 100 % del fresado producido. Habría que replantearse también el coeficiente de equivalencia (por ejemplo a 0,9) y, en consecuencia, una medida de prudencia sería aumentar el espesor de la intermedia de 9 a 10 cm.

Finalmente, hay una opción que se corresponde con la experiencia adquirida en muchos proyectos de rehabilitación. Téngase en cuenta que, por buenos que sean los resultados de medida de las deflexiones en el carril izquierdo de la zona B, tras 15 años de servicio un pequeño recrecimiento con 5 cm de capa intermedia en toda la anchura de la sección no parece descabellado. Si además se fuese a una tasa del 26 % de RAP en la mezcla reciclada, se estaría aprovechando la totalidad del material obtenido del fresado y dotando al firme en las zonas de una solución de refuerzo potente, durable y habiendo empleado todo el RAP en la misma carretera.

## Referencias

- AASHTO (1993): AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, AASHTO, Washington, D.C.
- DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS (2001): Reciclado de firmes (Artículos 20, 21 y 22 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras PG-4), 36 pág., Centro de Publicaciones del Ministerio de Fomento, Madrid
- DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS (2003): Secciones de firme, Norma 6.1 IC de la Instrucción de carreteras, 41 pág., Centro de Publicaciones del Ministerio de Fomento, Madrid
- DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS (2003): Rehabilitación de firmes, Norma 6.3 IC de la Instrucción de carreteras, 74 pág., Centro de Publicaciones del Ministerio de Fomento, Madrid
- DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS (2004): Firmes y pavimentos (Parte 5ª del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3), 116 pág., Centro de Publicaciones del Ministerio de Fomento, Madrid

#22

## AFIRMACIONES ASFÁLTICAS

“Innovaciones como las de las mezclas semicalientes reducen el consumo de energía y emisiones” (Mezcla reciclada semicaliente de tasa media; número 15)

#SOSTENIBILIDAD\_Y\_MEDIO\_AMBIENTE