

Reciclado en frío con emulsión bituminosa

La reutilización de pavimentos agrupa todas aquellas técnicas en las que se tratan materiales que forman parte de un firme e incluso, con carácter más general, materiales que ya han sido empleados para cualquier tipo de aplicación. El reciclado de capas de firme ofrece numerosas versiones que pueden clasificarse en base a diferentes criterios. En presente artículo, se pretende desarrollar exclusivamente la técnica de Reciclado en Frío con Emulsión, para intentar lograr un mayor conocimiento de este sistema dadas las ventajas que conlleva. A efectos del reciclado en frío con emulsión, tanto los materiales granulares como los procedentes del machaqueo de materiales tratados con conglomerantes hidráulicos tienen la consideración de áridos. Únicamente los materiales procedentes del machaqueo o fresado de mezclas bituminosas (MRMB (*)) tienen la posibilidad de ser tratados de forma que el aglomerante sea también reciclado y, en consecuencia, aprovechado. Este reaprovechamiento del ligante de la mezcla a reciclar se puede realizar adicionando además emulsiones de betunes blandos o de mezcla de betunes y productos rejuvenecedores. Cabe distinguir dos tipos de reciclados en frío con emulsión por la forma de puesta en obra: en planta o in situ.

Palabras clave: emulsión bituminosa, conservación, tecnología, medioambiente

The pavement recycling includes all those techniques that encompassed materials which has been part of pavement and even for whatever type of application. The pavement recycling offers several versions that it can be classified according different criteria. The aim of this article is to describe the cold pavement recycling with bitumen emulsion technique, trying to achieve a better knowledge of this system with their improvements. For the purpose of cold pavement recycling with bitumen emulsion, both, the granular materials and those from crushing of materials treated with hydraulic binders, are considered aggregates. Only the materials from crushing or milling, of asphalt mixtures (RAP) (*)), have the possibility to be treated, and the binder can be also used and recycled. Reusing this type of binder for this recycling mixture, can be performed using soft bitumen emulsions or blending bitumen and rejuvenation products to produce bituminous emulsions. According the production site, there are two types of cold pavement recycling: in plant or in situ.

Keywords: bitumen emulsion, maintenance, technology, environment

Daniel Andaluz García, gerencia@ateb.es
Francisco José Lucas Ochoa, fjucaso@repsol.com
Lucía Miranda Pérez,
lucia.miranda@composanindustrial.com
M^a del Mar Colás Victoria, marimar.colas@cepsa.com
Nuria Uguet Canal, nuria.uguet@eurovia-es.com
Rafael Guillén Carmona, rguillen@sacyr.com
Santiago Gil Redondo, sgil.ditecpesa@ferrovial.es
Verónica Contreras Ibáñez,
contreras.ibanez.veronica@repsol.com

Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas (ATEB)

1. Definición

Definimos como Reciclado en Frío con Emulsión bituminosa, en adelante RFE, a la mezcla homogénea, convenientemen-

te extendida y compactada, del material resultante del fresado de una o más capas de un firme existente en un espesor comprendido entre 6 y 12 cm, emulsión bituminosa, agua y eventualmente aditivos. Todo el proceso de ejecución se realizará a temperatura ambiente.

La operación de reciclado puede realizarse in situ o en planta. En planta pueden ajustarse los parámetros de fabricación con mayor precisión pero el coste también es mayor, por lo que suele ser mucho más habitual la puesta en obra directa in situ. Los equipos disponibles en la actualidad para la ejecución de reciclados en frío in situ, con sistemas de dosificación bastante precisos, permiten suponer un comportamiento mecánico similar durante toda la ejecución de la obra, si se siguen las reglas de buenas prácticas.

(*) Material Recuperado de Mezcla Bituminosa / Reclaimed asphalt pavement

Reciclado en frío con emulsión bituminosa

El RFE se puede realizar sin aporte de áridos (tasa de reciclado del 100%) o bien con aporte de áridos, normalmente en baja proporción (hasta un 15%), para corregir la granulometría. En lo sucesivo supondremos que la granulometría es suficientemente buena y que, en caso de no serlo, se recurrirá a su corrección.

2. Ventajas de la utilización del reciclado en frío con emulsión

La técnica del RFE presenta un buen número de aspectos positivos que hacen que su empleo sea enormemente atractivo pero no por ello constituye una solución universal. Entre estos aspectos destacan los siguientes:

- Conservación de recursos, ya que se minimizan las necesidades de ligantes y áridos nuevos, al reutilizar los existentes en el firme. Con ello, se elimina gran parte del transporte de materiales necesario en las operaciones de refuerzo convencionales, con lo que se minimizan los daños ocasionados por el tráfico de obra sobre la propia vía y la red adyacente.
- Se reduce el recrecimiento, casi siempre innecesario, de los arceles y minimiza el efecto sobre el gálibo, bordillos, etc., con lo que se obtienen economías adicionales en el proyecto.
- En general, el RFE permite mejorar la regularidad del firme existente. Esto es particularmente interesante, en las vías secundarias cuyas condiciones geométricas suelen ser bastante malas y cuya mejora requiere importantes capas de regularización.
- Desde el punto de vista operativo, el RFE, especialmente el realizado in situ, limita las interferencias con el tráfico y permite una apertura prácticamente inmediata a la circulación, con lo que se minimizan las molestias a los usuarios.
- Desde el punto de vista económico el RFE permite, en general, obtener un ahorro significativo frente a otras técnicas convencionales. Generalmente es una operación de costo similar o inferior a un simple refuerzo y considerablemente más económica que la de fresado y reposición de la capa del firme con nuevos materiales.
- Finalmente, la técnica del RFE reduce el impacto ambiental asociado a otras técnicas, ya que minimiza el consumo energético durante la fabricación, al eliminar la nece-

sidad de calentar el material a tratar, y evita gran parte del transporte, en particular cuando es in situ. Asimismo, se consigue una disminución drástica de las necesidades de árido virgen y de ligantes bituminosos así como la eliminación de espacios de vertido, en el caso que la rehabilitación del firme prevea operaciones de fresado.

Adicionalmente a estas ventajas generales del RFE, en el caso del reciclado in situ, cabe destacar las siguientes ventajas con respecto a la rehabilitación del firme con nuevas capas de refuerzo:

1. Se consiguen mejoras estructurales o de regularidad con aportación mínima de materiales nuevos.
2. Mantiene o modifica levemente la rasante.
3. Permite la rehabilitación estructural de carriles individualizados
4. No es necesario ensanchar la plataforma para la operación
5. Permite la colocación de las capas nuevas de refuerzo sobre material no deteriorado, consiguiéndose así una mayor vida de servicio.

Asimismo, el reciclado in situ con emulsión presenta las siguientes ventajas respecto a las operaciones de fresado y sustitución con nuevos materiales:

1. Mayor rapidez de ejecución
2. Mayor economía
3. Menor incidencia en la circulación, al reducir el número de vehículos pesados necesarios para la ejecución de la obra
4. Menor impacto para los firmes del entorno al reducirse el flujo de vehículos que transportan materiales.

Con todo ello, el RFE debería ser considerado como una posible solución en todas las actuaciones de rehabilitación de firmes.

3. Campos de aplicación

Este sistema de reciclado se ha subdividido en tres tipos diferentes: I, II y III, que responden a tres situaciones posibles de reciclado en las que, si bien la técnica de puesta en obra es

similar, los resultados obtenidos difieren en cuanto a la calidad del material final y, por tanto, a sus prestaciones en cuanto al dimensionamiento. Los tres diferentes tipos de RFE se caracterizan por:

RFE-I

Se corresponde con aquellas situaciones en las que se pretende reciclar reutilizar materiales que en su mayor parte no están tratados con ligantes bituminosos. Este es el caso, por ejemplo, de los firmes denominados tradicionalmente flexibles, que están constituidos por capas granulares con un revestimiento formado por tratamientos superficiales o capas finas (espesor igual o inferior a 4/5 cm) de mezclas bituminosas. Naturalmente también se incluyen en este tipo los caminos rurales no pavimentados.

En general, la aplicación de la técnica del RFE a este tipo de firmes permite obtener una capa de base, tipo grava-emulsión de calidad media, de características mecánicas mejoradas en relación al material granular de partida, que se puede terminar con un tratamiento superficial o un aglomerado flexible en capa fina. El espesor del reciclado puede variar en función de las condiciones del tráfico desde los 8 cm, en los casos de tráfico más ligero, a los 12 cm. Con este sistema pueden rehabilitarse firmes típicos de tráfico T4 o bien re-

habilitar o transformar firmes flexibles para adaptarlos a una categoría de tráfico superior, T3, añadiendo una capa de rodadura sobre el material reciclado.

El tratamiento en espesores menores, 6 cm por ejemplo, es posible en muchos casos pero con la idea de mejorar la capacidad portante más por el efecto de impermeabilización del firme que por el aporte estructural de la capa reciclada.

Un caso particular de esta técnica, muy propio de caminos agrícolas o firmes flexibles en los que se ha empleado un material de base con plasticidad, es el reciclado en dos fases. En la primera se trata el material granular en una profundidad importante (20-25 cm) con cal para corregir el problema de plasticidad. En la segunda fase se trata un espesor menor (8-12 cm) con emulsión.

En el RFE-I no se valora, en general, el efecto del ligante existente en el firme a tratar y la emulsión a emplear tiene como base un betún 160/220 ó 70/100. Los contenidos de emulsión pueden variar, normalmente, entre el 4 y el 7%.

RFE-II

Se corresponde con una situación intermedia en la que se pretende reciclar reutilizar simultáneamente materiales tratados con ligantes bituminosos y otros no tratados o tratados con conglomerantes hidráulicos, de forma que la parte de

Tabla 1. Identificación de los diferentes tipos de reciclado en frío con emulsión.

Reciclado en frío con emulsión				
		Tipo I	Tipo II	Tipo III
Material reciclado del firme existente		Capa bituminosa (< 4/5 cm) + base granular	Capa bituminosa (5-10 cm) + base no bituminosa (>50% "negro")	Mezclas bituminosas
Emulsión (60% B. Res.)	Tipo	Emulsión de betún blando (70/100 ó 160/220)	Emulsión de betún blando o regenerante	Emulsión de betún blando o regenerante
	Dotación	(4-7%)	(3-5%)	(2,5-4%)
Espesor de reciclado		8-12cm	8-12cm	6-12cm
Objetivo		Mejora de las características mecánicas o geométricas del firme existente	Idem tipo I y, eventualmente, regeneración del ligante existente	Reciclado y regeneración del ligante existente

materiales "negros" es al menos del 50% del espesor total a tratar (preferentemente >75%). Concretamente esta situación puede darse en aquellos firmes, típicos de la anterior Instrucción 6.1-I.C., constituidos por una o dos capas de mezcla con un espesor entre 5 y 12 cm, apoyados sobre una base granular o tratada con ligantes hidráulicos.

Sin embargo, no debe asimilarse necesariamente este tipo de firme con un RFE-II. En estos firmes caben varias posibilidades:

- Si el problema afecta a la base granular puede realizarse un levantamiento de las capas superiores de mezcla y actuar con un retratamiento con emulsión de la base, en cuyo caso es una situación del tipo RFE-I, o bien con cal, cemento e incluso una estabilización granulométrica.
- Si el problema afecta sólo a la mezcla, por ejemplo, un problema de fisuración por reflexión, la actuación se debería realizar exclusivamente sobre la mezcla, con lo que se trataría de una situación tipo RFE-III.

Finalmente, puede plantearse el retratamiento conjunto de las capas superiores de mezcla y de toda o una parte de la base. En este caso estaríamos en una situación del tipo RFE-II, en la que se recicla un espesor que puede ir desde los 8 cm hasta los 12 cm y empleándose una emulsión formulada a partir de un betún blando o, excepcionalmente, un ligante regenerante según las circunstancias. El material obtenido tiene características similares a las de una grava-emulsión clásica. Los contenidos de emulsión pueden variar, normalmente, entre el 3 y el 5%.

Los RFE tipo II con proporciones próximas al 30-50% de materiales granulares se han tratado con mucho éxito mediante la técnica del reciclado mixto (Conglomerante = Emulsión bituminosa + Cemento).

RFE-III

Es la situación que se plantea cuando únicamente se reciclan materiales tratados con ligantes bituminosos. Es el caso, por ejemplo, de los firmes constituidos por capas bituminosas en los que el RFE se concibe como un retratamiento de mezcla bituminosa exclusivamente. Se trata normalmente de carreteras de tráfico medio o pesado, con problemas de rotura a fatiga, despegue de capa de rodadura, envejecimiento, etc.

También puede darse este caso cuando se pretenda reciclar las capas superiores de mezcla bituminosa de un firme semi-rígido con problemas de reflexión de fisuras.

En general son estructuras muy homogéneas que permiten encontrar una fórmula de reutilización del firme existente mediante una emulsión de efecto regenerante en proporciones del 2,5-4%. Lo más habitual es el tratamiento en espesores de 6 a 12 cm y, en cualquier caso, con un espesor mínimo superior al de la capa de rodadura existente para evitar los problemas de interfase. El material obtenido después del proceso de maduración presenta generalmente unas características mecánicas mejores que el de una grava-emulsión clásica y próximas a las de una mezcla gruesa para capa de base.

En la práctica, el comportamiento del RFE tipo II está muy ligado a las proporciones respectivas de materiales bituminosos y granulares. Cuando la proporción de material granular es superior al 20-25%, especialmente si presenta algún tipo de actividad plástica, el comportamiento se aproxima a los del tipo RFE I, mientras que con proporciones inferiores al 15%, y materiales "limpios", el comportamiento es asociable a los del tipo RFE III. A la vista de lo anterior podemos admitir la existencia de dos tipos básicos de comportamiento de RFE que desde el punto de vista del diseño y el control podríamos asociar con materiales del tipo grava-emulsión y del tipo mezcla cerrada en frío respectivamente.

4. Especificaciones. marco normativo (Art. 20 del PG-4 (Orden Circular 8/2001)).

4.1 Norma 6.3 IC de rehabilitación de firmes y Art. 20 del PG-4

Según refiere la Norma 6.3 IC, entre las posibles soluciones de rehabilitación estructural de firmes que tengan pavimento bituminoso, básicamente se considerarán los tipos de actuación siguientes:

- Eliminación parcial de una parte del firme existente y reposición con mezcla bituminosa hasta la misma cota que la superficie original del pavimento existente.
- Recrecimiento mediante mezclas bituminosas o mediante pavimento de hormigón.
- Combinación de los dos tipos de actuación anteriores, incluyendo las técnicas de reciclado de materiales.

Tabla 2: Especificaciones de las emulsiones catiónicas y aniónicas a utilizar en el reciclado en frío.

Emulsion original			
Requisitos	Norma	C60B5 REC	A60BL
Polaridad de las partículas	EN 1430	Positiva	Negativa
Índice de ruptura (filler Forshammer)	EN 13075-1	>170	
Estabilidad por mezcla con cemento, %	EN 12848		<2
Tiempo de fluencia 2 mm a 40 °C, s	EN 12846-1	15-70 a	40-130 b
Adhesividad con el árido de referencia, %	EN 13614	≥ 90	
Contenido de ligante (por contenido en agua), % o ligante residual después de la destilación, %	EN 1428 EN 1431	58 – 62 ≥58	58-62
Residuo de tamizado (tamiz 0,5mm), %	EN 1429	≤ 0,1	≤ 0,1
Tendencia a la sedimentación (almacenamiento durante 7 días), %	EN 12847	≤ 10	≤ 10

- a Se pueden emplear emulsiones con tiempo de fluencia (40-130) s a 40 °C con el orificio de 2 mm, especialmente en los casos en los materiales a reciclar presenten humedad elevada.
- b Puede ser fabricada con viscosidad inferiores (15-70) s a 40 °C con el orificio de 2 mm, en función de sus condiciones de empleo.
- c El contenido de ligante de la emulsión determinado por el método de destilación descrito en la Norma EN 1431 debe definirse como (porcentaje en masa de ligante residual + contenido en masa del fluidificante destilado).

Por consideraciones ambientales y de reutilización de los materiales existentes en los firmes y pavimentos, en actuaciones cuya superficie de rehabilitación sea superior a 70.000 m², se deberán tener en cuenta en el análisis de las soluciones las técnicas de reciclado.

En el proyecto de la rehabilitación de un firme se podrá utilizar el reciclado en frío in situ con emulsión bituminosa teniendo en cuenta las limitaciones y prescripciones siguientes:

- En carreteras con categoría de tráfico pesado T1 se podrán utilizar mezclas bituminosas recicladas in situ con emulsión bituminosa en arcenes cuando sobre este material se disponga como mínimo una capa de rodadura. También podrá ser aplicable este último tipo de material reciclado en capas de reposición en calzada cuando sobre ellas se coloquen capas de recrecimiento con mezclas bituminosas en caliente en un espesor total mínimo de 8 cm.
- Para carreteras con categorías de tráfico pesado T2 a T4, incluidas las vías de servicio no agrícolas de autovías y autopistas, podrá utilizarse el reciclado in situ con emulsión,

con la condición de disponer sobre él, como mínimo, una capa de mezcla bituminosa en caliente del tipo densa (D) o semidensa (S).

Adicionalmente, el Art. 20 del PG-4, iniciado con la O.C. 8/2001, inequívocamente define la unidad "Reciclado in situ con emulsión de capas bituminosas", indicando los materiales, tipo de mezcla, equipo necesario para la ejecución y desarrollo de la misma, así como el control de calidad necesario, y especificaciones de la unidad terminada.

4.2 Especificaciones emulsiones bituminosas

Las especificaciones de las posibles emulsiones a emplear se encuentran, en el caso de las emulsiones bituminosas catiónicas, en el Anexo Nacional recogido en la norma UNE-EN 13808:2013/1M:2014 y, en el caso de las emulsiones bituminosas aniónicas, en la norma española UNE 51603.

A continuación se muestran las especificaciones recogidas en dichos documentos:

Tabla 3: Especificaciones para el residuo de las emulsiones catiónicas y aniónicas.

Ligante residual		C60B5 REC			A60B1
		Ligante residual por destilación	Ligante recuperado	Ligante estabilizado	Ligante residual por destilación
Requisitos	Norma	EN 1431	EN 13074-1	EN 13074-1 seguido por EN 13074-2	EN 1431
Penetración a 25°C, 0,1 mm	EN 1426	≤ 270 ^a	≤ 330 ^a	≤ 270 ^a	220-330 ^a
Punto de reblandecimiento, °C	EN 1427	≥ 35 ^a	≥ 35 ^a	≥ 35 ^a	≥ 35

a Se admiten emulsiones fabricadas con betunes más duros (Penetración ≤150 0,1mm y Punto de reblandecimiento ≥ 43°C, a emplear en zonas cálidas o con tráfico intenso.

5. Criterios de diseño

Un correcto diseño de la fórmula de trabajo de los reciclados en frío con emulsión (RFE), debe seguir criterios similares a los de las mezclas cerradas en frío, incluyendo a la grava-emulsión. En el proceso de diseño se debe prestar atención al material a tratar ya que puede presentar diferencias a lo largo de la traza, por ello se deberá identificar y tener en



Figura 1: Detalle de la extracción de un testigo.

cuenta previamente sus características tanto mecánicas como de forma.

5.1 Inspección del firme a reciclar

Se considera una de las fases más relevantes para un correcto diseño, se debe realizar una definición de tramos homogéneos, determinación del tráfico, climatología y las condiciones estructurales y visuales del firme. Se procederá a la extracción de testigos: dos por perfil y, al menos, un perfil por cada 1.000 m, o por tramo si este fuera de menor longitud. Sobre cada testigo se determinarán espesores y tipos de material.

Con esta información se procederá a una definición de tramos caracterizados por la homogeneidad de su estructura longitudinal y transversal, en lo que se refiere a espesor de capas, tipos de materiales y estado de las mismas.

La frecuencia de muestreo debe ser mayor para los tipos I y II ya que puede haber más variación en los materiales granulares. Las muestras obtenidas se caracterizan en laboratorio y la información obtenida servirá además para redefinir, si fuera necesario, los tramos homogéneos establecidos en la fase primera.

5.2 Estudio de la fórmula de trabajo

Los análisis mínimos a realizar sobre las muestras dependen de si éstas corresponden a materiales tratados con ligantes bituminosos o no. Las muestras de materiales tratados con betún para los RFE tipo III (y los del tipo II asimilados: menos



Figura 2: Toma de muestras mediante fresadora.

de un 15-20% de material granular) deben ser obtenidas mediante una operación similar a la que posteriormente vaya a emplearse en obra, generalmente mediante fresado y, mejor aún, con el mismo tipo de máquina a emplear en el reciclado, al objeto de obtener una muestra representativa, aunque en el caso de materiales no tratados con ligantes bituminosos no es imprescindible.

Sobre las muestras se determinará la granulometría del material fresado, contenido y tipo de ligante y sobre el residuo extraído (penetración y punto de reblandecimiento como mínimo). Adicionalmente pueden realizarse ensayos de caracterización sobre el ligante mediante sistemas de cromatografía.

Sobre los áridos además se evaluará la calidad del árido grueso (dureza, caras de fractura, forma) y de la fracción fina (equivalente de arena e índice de plasticidad). También se determinará la humedad natural, si bien este parámetro deberá ser objeto de un control sistemático durante la ejecución.

El objeto de esta fase es la definición de una o varias fórmulas de trabajo y de los parámetros necesarios para el control de la ejecución. A tal efecto deberá asegurarse un buen esqueleto mineral en el material reciclado.

En general para los RFE-I y asimilados se siguen criterios similares a los de una grava-emulsión y por ello en ocasiones se precisará corregir la granulometría mediante aporte de árido. El contenido de emulsión se determinará en base al ensayo de inmersión-compresión y vendrá fijado de acuerdo con las exigencias mecánicas mínimas de resistencias en seco y conservadas establecidas en función de la posición del

material en la estructura del firme y del tráfico previsto, recogidas en el art. 20 del PG-4.

Se recomiendan utilizar emulsiones convencionales del tipo A60BL y C60B5 REC con betunes asfálticos del tipo 70/100 ó 160/220. La concentración de emulsión en peso sobre árido suele estar comprendida entre el 4 y el 7%, dependiendo del porcentaje de material bituminoso en el conjunto. Por encima de estas cantidades la operación de RFE puede no ser viable económicamente.

Con objeto de obtener buenas resistencias conservadas, sobre todo cuando el material original presenta algo de plasticidad, se podrá recurrir al empleo, además de la emulsión, de pequeñas proporciones (1-2%) de cal hidráulica o cemento. En general la cal es más eficaz para mejorar las resistencias conservadas mientras que el cemento tiene un menor efecto frente a la plasticidad del árido pero puede mejorar sustancialmente las resistencias mecánicas en seco y tras inmersión.

En todos los casos será necesario adaptar la humedad total y la formulación de la emulsión a las condiciones in situ y a las características mineralógicas del árido, para obtener una buena capacidad de envuelta, una velocidad de rotura adaptada a las condiciones de la obra y una buena adhesividad. El contenido de agua total debe ajustarse de forma cuidadosa ya que es un factor decisivo para obtener una envuelta correcta, efectuar una buena compactación es vital para el proceso de maduración.

En los RFE-III y asimilados se seguirá un criterio similar al de diseño de las mezclas cerradas con emulsión empleando el ensa-

Reciclado en frío con emulsión bituminosa

Tabla 4: Husos granulométricos para RFE tipo III cernido acumulado (% en masa).

Tipo de reciclado III	Cedazos y tamices UNE-EN 933-2 (mm)									
	40	25	20	12,5	8	4	2	0,500	0,250	0,063
RE1	100	78-100	69-95	52-82	40-70	25-53	15-40	2-20	0-10	0-3
RE2	-	100	80-100	62-89	49-77	31-58	19-42	2-20	0-10	0-3

Tabla 5: Husos granulométricos para RFE tipo I y II cernido acumulado (% en masa).

Tipo de reciclado I-II	Cedazos y tamices UNE-EN 933-2 (mm)									
	40	25	20	12,5	8	4	2	0,500	0,250	0,063
"RE 3"	100	78-100	69-95	52-82	40-70	25-53	15-40	8-25	5-20	2-12
"RE 4"	-	100	80-100	62-89	49-77	31-58	19-42	8-25	5-20	2-12

yo de inmersión-compresión para la caracterización mecánica, si bien las exigencias mínimas serán, en general, superiores a las de los RFE-I. En cuanto al tipo de emulsión a emplear podrá ser A60BL, C60B5, si bien, la experiencia existente en España con los RFE se basa mayoritariamente en el empleo de emulsiones catiónicas. En cuanto al tipo de ligante de base podrá optarse por un 160/220, ó bien por uno más duro tipo 70/100.

En las tablas 4 y 5 se muestran los husos granulométricos para los diferentes tipos de RFE.

Los valores de resistencias mínimas para los diferentes tipos de RFE en el ensayo de inmersión-compresión, según explica la Tabla 6.

En cuanto al contenido de ligante en función del tipo de RFE que se aplique, se limitarán los porcentajes de emulsión a aportar a los valores que refleja la Tabla 7.

En el caso de los RFE-III debe tenerse muy en cuenta la limitación superior para evitar problemas de exudaciones y/o deformaciones plásticas.

Tabla 6: Valores de resistencias mínimas para los diferentes tipos de RFE.

Tipo de reciclado	Categoría del tráfico pesado	Valores mínimos		
		Resistencia en seco (MPa)	Resistencia tras inmersión (MPa)	Resistencia conservada (%)
RFE-III	T1 (sólo capas de base) - T2 y (*)	3	2,5	75
	T3-T4 y ARCENES	2,5	2	70
RFE-II >75% "negro"	T2 y (*)	3	2,5	75
	T3-T4 y ARCENES	2,5	2	70
RFE-II <75% "negro" y RFE-I	T3-T4 y ARCENES	2,5	2	70
	Caminos agrícolas y asimilados	0,9	0,7	50

* Vías de servicio no agrícolas de autopistas y autovías interurbanas.

Tabla 7: Valores de contenido de ligante para los diferentes tipos de RFE.

Tipo de reciclado	Emulsión al 60% B. res.		Ligante	
	(% en peso sobre material a reutilizar)		(% en peso sobre material a reutilizar)	
	Min.	Máx.	Min.	Máx.
RFE-III	2,5	4	1,5	2,4
RFE-II	3	5	1,8	3
RFE-I	4	7	2,4	4,2

6. Puesta en obra

La realización de un reciclado en frío con emulsión (RFE) supone la ejecución de un conjunto de operaciones en cadena. Estas operaciones pueden ser ejecutadas directamente in situ o bien en planta independiente. Los equipos empleados pueden ser monofunción o multifunción. De hecho, como se verá más adelante, los fabricantes de maquinaria han diseñado equipos específicos que pueden realizar prácticamente todas las operaciones en una única pasada del equipo.

De forma elemental la ejecución de un RFE puede desglosarse en las siguientes operaciones:

- Demolición, levantamiento y retirada del pavimento en el espesor de proyecto
- Machaqueo del material hasta reducirlo al tamaño conveniente
- Mezclado del material machacado con la emulsión y otros elementos: áridos, agua, aditivos,...
- Extensión del material mezclado
- Compactación
- Tratamientos de protección
- Apertura al tráfico.

6.1 RFE en planta

La realización del RFE en planta independiente supone transportar el material a reutilizar a una instalación de mezclado para incorporarlo con el resto de los componentes definidos en la fórmula de trabajo.

El RFE en planta comienza por la demolición/fresado, levantamiento, carga y transporte del material a tratar. El mez-

clado se realiza generalmente en plantas convencionales de mezcla en frío, aunque nada impide que se empleen plantas de mezcla en caliente de tipo continuo o discontinuo. En cualquiera de ambos casos, será necesario dotar a la planta de un sistema adicional para dosificar el agua de preenvuelta. Se incorporarán también las proporciones previstas de áridos para corrección granulométrica y de aditivos (p.e. cal o cemento).

La extensión del material reciclado se realizará preferentemente con extendedoras autopropulsadas dotadas de los elementos de guiado.

El resto de las operaciones: compactación, tratamiento de protección y apertura al tráfico, se plantean de la misma forma que en el RFE in situ, por lo que se tratarán conjuntamente.

6.2 RFE in situ

En el RFE in situ el mezclado se realiza sobre la misma carretera por lo que requiere equipos específicamente diseñados pa-



Figura 3: Reciclado en Planta independiente.

Reciclado en frío con emulsión bituminosa



Figura 4: Recicladora mezcladora con regla de extensión y precompactación.



Figura 5: Compactador metálico y neumático.

ra ello. Esta especificidad se refiere fundamentalmente a los equipos que realizan el fresado del firme y el mezclado en la cámara de fresado, reduciendo así notablemente el ruido y la contaminación atmosférica, y la posterior extensión. La compactación y operaciones posteriores son comunes al RFE en planta.

Existe una variada gama de equipos para la ejecución del RFE in situ. Desde equipos muy sencillos derivados de las máquinas de estabilización de suelos hasta equipos completos. Derivado de la experiencia de esta técnica en España, han surgido equipos que integran en una sola máquina las funciones de fresado, mezclado, extendido y pre-compactado.

Estos equipos al estar dotados con una regla de extendido permite obtener planimetrías de alta calidad, tanto transversal como longitudinal.

Estos equipos se están utilizando con gran éxito en la realización de obras de RFE in situ de gran volumen y están especialmente indicadas para los del tipo RFE-III. Sus principales ventajas son su sencillez, robustez y coste relativamente reducido.

6.3 Equipos de compactación

En general, las necesidades de compactación son mayores que las que se requerirían para la compactación de una capa de mezcla bituminosa en caliente del mismo espesor, especialmente los reciclados del tipo RFE-III. Ello se debe a que este tipo de materiales, al igual que las grava-emulsiones, son

bastante "agrios" y con poca trabajabilidad, pues normalmente se busca trabajar con el mínimo posible de humedad al objeto de acortar el periodo de maduración.

No se ha definido aún la combinación idónea de compactadores. La combinación de rodillos lisos vibratorios en cabeza seguidos por compactadores pesados de neumáticos parece la más adecuada.

7. Dimensionamiento de firmes con capas recicladas

Cuando se piensa en emplear técnicas de reciclado, lo más habitual es que el firme analizado se encuentre en una situación de agotamiento estructural. Con carácter excepcional se puede pensar en reciclar sin que se haya llegado a dicho agotamiento.

Los sistemas de reciclado in situ con emulsión, son soluciones alternativas a las operaciones de fresado y reposición, compitiendo con éstas desde el punto de vista técnico y económico.

El dimensionamiento de firmes con capas recicladas resulta ser una variante, aunque más complicada, del dimensionamiento de una rehabilitación. Como ocurre con el diseño de firmes de nueva construcción es necesario el empleo de métodos analíticos y/o métodos empíricos.

7.1 Dimensionamiento por métodos analíticos

Como criterio o norma básica cuando se quiera realizar un dimensionamiento de este tipo se deberá tener una referencia

Tabla 8: Valores orientativos de módulos para capas recicladas.

Tipo de reciclado	Módulo dinámico E (MPa)	Módulo de Poisson ν	Observaciones
RFE-I	1.200-1.800	0.35	Valores a alcanzar tras la maduración
RFE-II	1.500-2.500	0.35	
RFE-III	2.500-3.500	0.35	

de tipo empírico, basada en una aproximación vía rehabilitación comparando con secciones de nueva construcción o vía coeficientes de equivalencia, que permita ir comprobando que los resultados obtenidos guardan una cierta coherencia con los sancionados por la experiencia: catálogos de secciones, método de la AASHTO, etc.

A los conocidos problemas habituales de los métodos analíticos en cuanto al discutible cumplimiento de las hipótesis de los métodos multicapa (elasticidad, homogeneidad, linealidad, etc.) hay que sumar la dificultad para determinar las condiciones iniciales de diseño (cálculo inverso a partir de los datos de deflexión), la caracterización de los materiales reciclados y la alteración de las condiciones iniciales por el propio proceso de reciclado. Si no tomamos en consideración este último aspecto quedan por estudiar los dos anteriores: cálculo inverso y caracterización de materiales reciclados.

El cálculo inverso es el proceso por el que, a partir de los datos de auscultación, se deducen las características mecánicas de las capas constituyentes del firme. Este conjunto de datos resulta casi imprescindible para poder valorar en términos analíticos la situación del firme existente con cierta aproximación. Existen programas informáticos que realizan este cálculo inverso a partir de los datos anteriores. Conviene, en todo caso, comprobar la coherencia de las salidas con los datos disponibles, especialmente a los datos de auscultación visual. El otro aspecto fundamental es el de la caracterización en sí de las capas recicladas. En los sistemas en frío in situ, las características mecánicas están muy condicionadas por la ejecución. Los resultados obtenidos en obra mediante extracción de testigos pueden presentar dispersiones importantes con los obtenidos en probetas de laboratorio, en gran medida debido a diferencias de compactación.

A efectos de un dimensionamiento previo, y salvo que se disponga de datos fiables de laboratorio, los valores de módulo a emplear podrían ser los recogidos en la Tabla 8.

Los datos disponibles respecto a las leyes de fatiga de estos materiales son más escasos aún que los de módulos.

En los RFE, como en la grava-emulsión, la fatiga no es un criterio de rotura como en las mezclas en caliente. Estos materiales presentan un marcado carácter no-lineal de forma que modifican su respuesta en términos de módulo en función de la sollicitación. Por tanto el criterio de rotura debe buscarse en la deformación vertical de la explanada o en la deformación tangencial de la mezcla de las capas superiores.

Las capas de mezcla que se coloquen sobre el un RFE pueden considerarse adheridas si se toman las precauciones habituales a nivel de puesta en obra. En cualquier caso hay que recordar que realmente estas condiciones absolutas de adherencia/despegue no se dan en la realidad pero que se modelizan como tales por las limitaciones de los métodos de cálculo.

Como es obvio, en todos los casos deberán comprobarse los distintos criterios de fallo, tanto de las capas recicladas, como del resto de las capas, y de la explanada. A estos efectos resulta recomendable que la estructura presente unos niveles de seguridad similares en todas sus capas evitando que unas capas se encuentren "al límite" y otras "muy desahogadas".

7.2 Dimensionamiento por métodos empíricos

El dimensionamiento por métodos empíricos supone proponer soluciones basándose en catálogos, referidos normalmente a una clasificación del tráfico y de la explanada, o en valores estructurales, determinados mediante la suma ponderada de los espesores de las capas con coeficientes de equivalencia de los materiales. Este segundo caso es el del conocido método de la AASTHO que en sus últimas versiones recoge ya algunas de las técnicas de reciclado antes analizadas, ofreciendo figuras de las que es posible obtener los coeficientes de equivalencia a emplear en el método.

Reciclado en frío con emulsión bituminosa

Tabla 9: Coeficientes de equivalencia entre materiales reciclados y convencionales.

Tipo de reciclado	Coefficiente de equivalencia	Observaciones
RFE-I	0,6 MB ó 2,5 ZA	La asimilación puede ser frente a MB o ZA
RFE-II	0,7 MB	
RFE-III	0,8 MB	

A continuación se exponen otras posibilidades basadas en catálogos propios para firmes con capas recicladas o en asimilación de soluciones de nueva construcción y/o refuerzo mediante coeficientes de paso de materiales convencionales a materiales procedentes de reciclado.

Instrucción Española 6.1 IC y otros catálogos de firmes

Basándose en catálogos es posible dimensionar firmes con capas recicladas asimilando estas capas a materiales convencionales directamente o a través de coeficientes de equivalencia. De esta forma es posible emplear el catálogo de secciones de la Instrucción 6.1 IC y también las "Recomendaciones de proyecto y construcción de firmes y pavimentos" de la Junta de Castilla y León. Para el caso de que no se disponga de secciones fácilmente asimilables se pueden emplear coeficientes de equivalencia entre materiales. Con carácter meramente indicativo se ofrecen algunos posibles coeficientes:

Dimensionamiento basado en la Instrucción 6.3 IC

El criterio básico de esta instrucción es que las operaciones de rehabilitación devuelvan al firme a una situación estructural similar a la de un firme de nueva construcción con un periodo de vida de 20 años.

La situación más normal cuando se plantee un reciclado será la de agotamiento estructural. En principio se debe tratar de un agotamiento que no afecte a la explanada porque en este caso el reciclado no solucionará el problema.

8. Últimos avances en la técnica del reciclado con emulsión bituminosa

Desde hace ya unos años, el sector ha apostado por la sostenibilidad en obras de rehabilitación de firmes, desarrollando im-

portantes avances en las técnicas de reciclado in situ con emulsión, dando lugar a nuevas mezclas que se pueden denominar de altas prestaciones. Las últimas líneas de investigación van orientadas a mejorar dos aspectos fundamentales:

- Mejorar las características de la mezcla en términos de cohesión, módulo y comportamiento a la fatiga.
- Disminuir los tiempos de maduración de la mezcla para permitir la extensión de la capa de rodadura en el menor tiempo posible, minimizando así las molestias a los usuarios de la vía

Para ello se siguen diversas líneas de investigación:

- Agentes rejuvenecedores que aportan al betún envejecido las características perdidas por el paso del tiempo, mejorando así entre otros aspectos, como el comportamiento a la fatiga.
- Aditivos que consiguen mejores cohesiones iniciales que permiten un tapado curado del reciclado más rápido, minimizando así las afecciones a los usuarios de la vía.
- Sistemas mixtos emulsión cemento que permiten módulos más elevados.
- Mejoras en la maquinaria que permiten:
 - Mayor control en la granulometría del material que se va a reciclar
 - Una dosificación de los componentes de la mezcla más precisa
 - Una extensión de la mezcla reciclada más adecuada
 - Una compactación de la misma más homogénea

9. Conclusiones

La técnica de reciclado de firmes en frío con emulsión es una alternativa muy competitiva desde el punto de vista económico, técnico y medioambiental.

Esta técnica ha tenido una importante evolución por el desarrollo de nuevas emulsiones bituminosas, más adaptadas a esta técnica de pavimentación y específicas, en función de las características del material procedente de mezcla bituminosa a reutilizar

El RD 105/2008 cita que las Administraciones Públicas velarán por que en las obras en las que intervengan como promotores, se apliquen medidas tendentes a la prevención en la generación de residuos de construcción y demolición y que, además, velarán por que, en fase de proyecto, se tengan en cuenta alternativas que también generen menos residuos en la fase de construcción y de explotación. Igualmente las administraciones públicas fomentaran el empleo de dichas técnicas.

Por todo ello, el RFE se considera una técnica de pavimentación con un gran potencial de empleo a corto-medio-largo plazo.

10. Bibliografía

- Anexo Nacional de emulsiones bituminosas catiónicas UNE-EN 13808:2013/1M:2014
- Del Val, M y Rocci, S. Guía para el dimensionamiento de reciclados in situ en frío. 1998
- Especificaciones de las emulsiones bituminosas aniónicas UNE 51603
- García Santiago, J.L. et al. "Influencia de la temperatura de mezcla en las propiedades mecánicas del reciclado en frío" Congreso Latinoamericano del Asfalto. Brasil, 2011
- Instrucción 6.1 IC Secciones de firmes
- Instrucción 6.3 IC de refuerzo de firmes
- Páez Dueñas, A et al. "Reciclado en frío in situ de Altas prestaciones. Experiencias y resultados." Congreso de Firmes, Valladolid, 2008
- Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de conservación de carreteras. PG-4. Artículo 20 Reciclado in situ con emulsión de capas bituminosas.
- RD 105/2008. Regulación de residuos de construcción y demolición.
- Soto, J.A y Peña, J.L. Monografía ATEB: Reciclado en frío con emulsión.
- Soto, J.A., et al.. "Mezclas Bituminosas adaptadas al cambio climático" Valladolid, 2010

#9

AFIRMACIONES ASFÁLTICAS

Las mezclas asfálticas permiten conservar los firmes de modo eficiente

#CONFORT_Y_SEGURIDAD