

RECICLADO EN FRIO CON EMULSION

ASOCIACION TECNICA DE EMULSIONES BITUMINOSAS
(ATEB)



Coordinado por :
José Antonio Soto
José Luis Peña

ÍNDICE

1. **INTRODUCCIÓN.**
2. **DEFINICION.**
3. **CAMPOS DE APLICACIÓN.**
 - 3.1. RFE-I.
 - 3.2. RFE-II.
 - 3.3. RFE-III.
4. **DISEÑO DE RFE.**
 - 4.1. Definición de tramos homogéneos.
 - 4.2. Toma y análisis de muestras.
 - 4.3. Viabilidad del RFE.
 - 4.3.1. Granulometría del material a reciclar.
5. **PUESTA EN OBRA EQUIPOS.**
 - 5.1. RFE en planta.
 - 5.2. RFE in situ.
 - 5.3. Equipos de compactación.
6. **CONTROL DE CALIDAD.**
7. **DIMENSIONAMIENTO DE FIRMES CON CAPAS RECICLADAS.**
 - 7.1. Dimensionamiento por métodos analíticos.
 - 7.2. Dimensionamiento por métodos empíricos.

RECICLADO EN FRÍO CON EMULSION

1 INTRODUCCIÓN.

El reciclados 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 la presente publicación, 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, pues es, en la actualidad, una de las técnicas de reciclado de pavimentos más empleada en España y de la que se tiene mayor experiencia.

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 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 empleando emulsiones de betunes blandos o de mezcla de betunes y productos regenerantes.

Cabe distinguir dos tipos de reciclados en frío con emulsión por la forma de puesta en obra: en planta o in situ. Esencialmente en esta publicación se tratará de los reciclados in situ, que presentan algunas peculiaridades en la puesta en obra, ya que en el caso de los reciclados en planta es similar a la de las mezclas cerradas en frío.

2 DEFINICIÓN.

Definimos como **Reciclado en Frío con Emulsión bituminosa**, en adelante **RFE**, a la mezcla homogénea, convenientemente 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 si se siguen las reglas de buena práctica.

El RFE se puede realizar sin aporte de áridos (tasa de reciclado del 100%) o bien con aporte de áridos, normalmente en baja proporción (alrededor del 10-15%), 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.

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.

RECICLADO EN FRÍO CON EMULSION				
		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 (80/100 ó 150/200)	Emulsión de betún blando ó 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

Los tres diferentes tipos de RFE se caracterizan por:

3.1. RFE-I

Se corresponde con aquellas situaciones en las que se pretende reciclar 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 4/5cm) 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 con respecto 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 8cm, en los casos de tráfico más ligero, a los 12 cm. Con este sistema pueden rehabilitarse firmes típicos de tráfico T4 o bien rehabilitar 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 150/200 u 80/100. Los contenidos de emulsión pueden variar, normalmente, entre el 4 y el 7%.

3.2. RFE-II

Se corresponde con una situación intermedia en la que se pretende reciclar simultáneamente materiales tratados con ligantes bituminosos y otros no tratados o tratados con conglomerantes hidráulicos, de forma que la parte de materiales "negros" es al menos el 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

bituminosa con un espesor entre 5 y 12cm, 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.

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 tratamiento 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%.

3.3. 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 fisuración por fatiga, despegue de la capa de rodadura, envejecimiento, etc. También puede darse este caso cuando se pretenda reciclar las capas superiores de mezcla bituminosa de un firme semirrígido con problemas de reflexión de fisuras.

En general son estructuras muy homogéneas que permiten encontrar una fórmula de reciclado del firme existente mediante una emulsión bituminosa 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.

3.4. Consideraciones generales.

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, especialmente si presenta algún tipo de actividad plástica, es superior al 20-25% el comportamiento se aproxima a los del tipo I, mientras que con proporciones inferiores al 15%, y materiales "limpios", el comportamiento es asociable a los del tipo 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.

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 (el conglomerante es una combinación de emulsión bituminosa y cemento).

La técnica del RFE presenta un buen número de aspectos positivos que hacen que su empleo sea enormemente atractivo pero, y esto debe de quedar muy claro desde el principio, no universalizable. Entre estos aspectos destacan los siguientes:

- Se minimizan las necesidades de ligantes y áridos nuevos al reutilizar los existentes en el firme. A la vez, se elimina gran parte del transporte 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.
- Reduce el recrecimiento, casi siempre innecesario, de los arcenes y minimiza el efecto sobre el gálbo, bordillos, etc., con lo que se obtienen economías adicionales en el proyecto.
- En general, el RFE permite mejorar el perfil y 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.
- Finalmente, la técnica del RFE limita el impacto ambiental asociado a otras técnicas, ya que minimiza el consumo energético al eliminar la necesidad de calentar el material a tratar y evitar 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.

Sin embargo, el RFE presenta, como cualquier otra técnica, algunas limitaciones:

- No todos los materiales son susceptibles de ser reciclados de forma efectiva y económica. Cualquier operación de RFE requiere un estudio previo de las secciones y de los materiales.
- El RFE no permite solucionar algunos tipos de problemas habituales en los firmes, en particular aquéllos que están asociados a mala calidad de la explanada o de capas profundas. Tampoco es fácil solucionar problemas de deformaciones plásticas, y cuando es posible suele ser necesario el empleo adicional de árido para corregir la formulación de la mezcla existente.
- Por último, el RFE requiere un período de "maduración", como la

grava-emulsión, durante el que la mezcla va adquiriendo sus características finales. Ello hace que en algunas ocasiones existan reticencias sobre el empleo de esta técnica, dada la inconveniencia de actuar inmediatamente después del reciclado. Actualmente, nuevos tensoactivos nos permiten disponer de emulsiones que acortan considerablemente este periodo.



Carril antes y después de reciclar

Además, como característica común a todos los tipos de RFE hay que señalar que la profundidad de tratamiento está bastante limitada por la capacidad de compactar las capas recicladas. Aunque en la bibliografía se encuentran descritos tratamientos de RFE en espesores de hasta 30 cm, la experiencia existente en España con esta técnica nos muestra que los medios de compactación, incluso los que se consideran más potentes dentro de los habituales, no permiten actuar con eficacia más allá de los 12-15 cm, especialmente si el soporte de la capa reciclada es un material granular o una mezcla muy fisurada. Para mayores espesores no es extraño encontrarse con situaciones de subcompactación en el fondo de la capa y, como consecuencia, problemas de falta de cohesión. Es éste un factor a tener muy en cuenta, ya que la capacidad mecánica de los RFE depende de forma muy directa del nivel de compactación alcanzado en obra.

Como consecuencia de todo lo anterior, en los RFE es preciso asegurarse de que el firme a tratar no presenta un problema estructural significativo en las capas inferiores a las que es posible reciclar y, como es lógico, que la aplicación del RFE va a conducirnos a la obtención de un material de mejores características mecánicas que el existente, es decir, que el material a tratar es “valorizable”.

4 DISEÑO DE RFE.

En la técnica de los reciclados en frío con emulsión (RFE), para el diseño de la fórmula de trabajo se deben seguir criterios similares a los de las mezclas cerradas en frío (consideradas en sentido amplio, incluyendo la grava-emulsión). Sin embargo, en el estado de conocimientos actual de esta técnica conviene ser especialmente cuidadoso en el proceso de diseño por dos razones básicas: el material a tratar puede presentar diferencias importantes a lo largo de la traza, lo que se deberá identificar y tener en cuenta previamente, y el material es en muchas ocasiones una mezcla de áridos y ligante envejecido cuyo comportamiento no tiene por qué ser igual al de un árido convencional. Ello nos lleva a plantear el estudio en unos términos algo más amplios que con el resto de los materiales, desglosándolo en las siguientes fases:

- Definición de tramos homogéneos
- Toma y análisis de muestras
- Viabilidad
- Estudio de la fórmula de trabajo

4.1. Definición de tramos homogéneos

Lo primero que se debe realizar es una definición de tramos homogéneos de la vía a tratar. Ello implica una determinación previa de las condiciones externas: tráfico y climatología, y de las

propias condiciones del firme existente. Para ello deberá realizarse una recopilación de datos históricos relativos a construcción, ensanches, reformas, refuerzos, etc. Además, se deberá contar con datos de auscultación estructural e imperativamente se deberá realizar una inspección visual de todo el tramo. Para la comprobación de la homogeneidad de los tramos se procederá a la extracción de testigos: dos por perfil y, al menos, un perfil por cada 1.000 m o por tramo si fuera de menor longitud. Sobre cada testigo se determinarán espesores y tipos de material.

Con todo ello 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.

4.2. Toma y análisis de muestras .

Definidos los tramos homogéneos en la fase primera, se procederá a la toma de muestras representativas de los materiales a tratar en cada tramo homogéneo, mediante extracción de testigos, calicatas u otros métodos de toma de muestras, comprobando el espesor y tipo de material en las diferentes capas. Como mínimo se realizarán dos testigos y una calicata por kilómetro o tramo diferenciado si su longitud fuera menor. El muestreo debe ser más intenso para los tipos I y II ya que las posibilidades de variación de los materiales granulares son mayores. En la práctica, en los RFE del tipo I y II suele ser necesario duplicar la toma de muestras en relación a los del tipo III. Las muestras obtenidas deben caracterizarse en laboratorio y esta caracterización debe servir además para redefinir, si fuera necesario, los tramos homogéneos establecidos en la fase primera.

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 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. Los ensayos mínimos a realizar sobre las muestras así obtenidas son los correspondientes a granulometría del material fresado y contenido y tipo de ligante (penetración y punto de reblandecimiento como mínimo, y composición vía IATROSCAN o ASTM 2006 si es posible). Adicionalmente pueden realizarse ensayos de caracterización del ligante existente mediante sistemas de fraccionamiento en columna que permiten conocer mejor su composición y estudiar las posibilidades de reconstitución de una composición acorde con un ligante no envejecido.

Cuando sea posible, la toma de muestras de los materiales tratados con betún se obtendrá preferentemente mediante fresado, aunque en el caso de materiales no tratados ello no es imprescindible. De estas muestras se analizará la granulometría, 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.

4.3. Viabilidad del RFE.

Una vez realizado el análisis de las muestras y redefinidos eventualmente los tramos homogéneos, se procederá a una evaluación de la viabilidad del RFE a la vista de la experiencia existente en esta materia. Si el RFE es viable técnicamente, se procederá a su evaluación económica y ambiental frente a las soluciones alternativas, al objeto de establecer si se continúan o no los estudios previos. Éste es un punto siempre delicado ya que la continuación de los estudios suele suponer un coste no despreciable en tiempo y dinero (del orden de los 2.500 € por muestra de tramo homogéneo). Cuando no se disponga de experiencia en esta técnica, se podrán emplear como criterios de viabilidad técnica los siguientes:

Tipo I : Cuando se trate de vías de tráfico T3 (50-200 de $IMDV_p$ = intensidad media de vehículos pesados por día y carril), se emplearán los criterios correspondientes a una grava-emulsión. Cuando se trate de vías de tráfico T4 ($IMDV_p < 50$), se podrán emplear los criterios correspondientes a la grava-emulsión, o bien los correspondientes a una estabilización con emulsión, en función de la estructura final de que se quiera dotar al firme y de la función a desempeñar por el material reciclado. En cualquier caso, si el material presenta deficiencia de tipo granulométrico, se podrá corregir mediante aporte de árido y si la deficiencia es por calidad, (normalmente será por presentar plasticidad), será necesario pensar en una corrección mediante aporte de cal o cemento.

Tipo II :Se asimilarán a las del tipo I cuando: el contenido de material granular sea superior al 25% y/o el tráfico sea T4 mientras que para tráfico T2 (IMVp=200-800) o superior y/o contenido de material granular inferior al 10-15% se asimilarán tipo REF-III. En casos intermedios, tráfico T3 y contenido de material granular del orden del 15-25% la asimilación a tipo I o tipo III dependerá de la situación final del firme que se quiera alcanzar, de forma que si encima del RFE se coloca una capa relativamente delgada se deberá ser más exigente (más próximo al tipo III) que si se van a disponer dos capas (con 10cm de mezcla bituminosa, por ejemplo)

Tipo III : Habrá que tener en cuenta la homogeneidad de los espesores y calidades de las capas de materiales al objeto de que se pueda encontrar una fórmula de trabajo bien adaptada que confiera al RFE unas características próximas a las de una mezcla de calidad (niveles de calidad que se verán en la parte siguiente de la comunicación). También habrá que considerar las características del betún envejecido para elegir el betún más adecuado.

Caracterización mecánica - Estudio de la fórmula de trabajo.

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. En cualquier caso debe tenerse en cuenta que el material obtenido en una operación de RFE debe ofrecer una capacidad mecánica inicial mínima independientemente de la que pueda obtener tras el período de maduración. 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 a un 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. Se utilizarán emulsiones convencionales del tipo EAL-2, ECL-2 o ECL-2m con betunes base del tipo 80/100 ó 150/200. La proporción 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. Al 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, de forma que se optimice la formulación 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 y 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 ensayo 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 también EAL-2, ECL-2 o ECL-2m, si bien, en la experiencia existente en España con los RFE siempre se han realizado con emulsiones catiónicas. En cuanto al tipo de ligante de base podrá optarse por uno de tipo convencional, B-150/200, bien por uno más duro, emulsiones del tipo ECL-2d que permiten teóricamente (en la práctica no se han empleado) obtener resistencias mecánicas iniciales más altas, o bien por uno más blando, emulsiones del tipo ECL-2b con un ligante base que permita regenerar el betún existente. En este último caso,

deberá caracterizarse el ligante finalmente obtenido, aún a sabiendas de que la regeneración del ligante utilizando el RFE es un proceso lento y que depende de las condiciones de temperatura y tráfico que se den en cada caso.

La mayor parte de las operaciones realizadas en España de reciclado tipo RFE-III se han diseñado y ejecutado con emulsiones ECL-2 y ECL-2b y puede afirmarse que la experiencia acumulada hasta el momento es muy satisfactoria.

4.3.1. Granulometría del material a reciclar:

La Orden Circular 8/2001, fija para RFE tipo III los husos RE1 de utilización para aplicaciones con espesores superiores a 10 cm y el huso RE2 para espesores comprendidos entre 6 y 10 cm

HUSOS GRANULOMÉTRICOS CERNIDO ACUMULADO (% en masa)

TIPO DE REICLADO 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

En cuanto a los RFE tipos I y II, no existe una normativa oficial, pero la experiencia obtenida en estos reciclados ha permitido fijar los husos granulométricos que se muestran en la tabla siguiente:

HUSOS GRANULOMÉTRICOS CERNIDO ACUMULADO (% en masa)

TIPO DE REICLADO 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

- Resistencias mínimas en el ensayo de inmersión-compresión:

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.

- Contenidos límite de ligante:

En los RFE, en función del tipo que se aplique, se limitarán los contenidos de emulsión a aportar a los siguientes valores:

Tipo de reciclado	Emulsión al 60% B. res.		Ligante	
	(% en peso sobre material a reciclar)		(% en peso sobre material a reciclar)	
	Mín.	Máx.	Mín.	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

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

5. PUESTA EN OBRA – EQUIPOS.

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 de obras públicas 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.

A esto habrá que sumar todas las operaciones complementarias de carga y transporte que sean necesarias en función de que la operación de mezclado se realice in situ o en planta y del equipo empleado. Con algunos equipos de RFE algunas de estas operaciones pueden obviarse o incluso pueden realizarse en un orden diferente.

La puesta en obra del RFE puede realizarse en planta o in situ empleando equipos específicos. Pero también pueden emplearse, al menos en parte, equipos convencionales utilizados en otras técnicas: fresadoras, mezcladoras, extendedoras, ... A continuación se describen los equipos más empleados dentro de la amplia gama existente.

5.1. RFE en planta.

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

El RFE comienza por la demolición, levantamiento, carga y transporte del material a tratar. Esto puede realizarse con diferentes medios. Puede emplearse directamente una o varias fresadoras con carga directa a camión o apoyadas con palas cargadoras. Como alternativa se puede usar un equipo formado por martillos rompedores y palas cargadoras. El primer procedimiento tiene varias ventajas como son que el material a tratar ya está machacado, que el espesor afectado se controla mejor y la regularidad del fondo de capa suele ser mayor. Como inconveniente, el empleo de fresadoras es más costoso. La decisión a favor de las fresadoras puede depender de dos aspectos: que el material reciclado se emplee en la misma vía y que con ellas se obtenga una granulometría aceptable que haga innecesario el empleo posterior de un equipo de machaqueo.

Si la granulometría obtenida en el fresado no es aceptable o si se emplean martillos para demoler el pavimento, será necesario recurrir al empleo de un equipo de machaqueo y clasificación para producir un material con el tamaño máximo adecuado, de acuerdo con el espesor de capa a extender. Resulta siempre muy conveniente la realización de pruebas previas al objeto de asegurar la idoneidad de la fórmula de trabajo definida: control de granulometría, tipo y contenido de ligante. También pueden ser necesarios estos equipos cuando parte del material a reciclar es de tipo granular y contiene elementos excesivamente gruesos (p.e. macadam).

El mezclado 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 que previsiblemente será necesario añadir para ajustar la humedad al valor de la fórmula de trabajo. La incorporación del agua se efectuará directamente al mezclador, preferentemente de forma que se produzca una premezcla sólo con agua.

En este punto es preciso señalar la importancia del control de la humedad del material a reciclar y de la dosificación al objeto de que se obtenga una buena envuelta y de que el material llegue a la compactación con el contenido de fluidos idóneo. A tal efecto se deberán tener en cuenta las pérdidas durante el acopio (si lo hubiere), el transporte y la extensión.

En la planta se incorporarán también las proporciones previstas de áridos para corrección granulométrica y de aditivos (p.e. cal o cemento). La incorporación de áridos y aditivos no tiene porqué ser siempre necesaria; sin embargo, cuando lo sea, el mezclado en planta permite asegurar una mayor homogeneidad y un mayor control que el mezclado in situ. Como es obvio, son preferibles los sistemas de dosificación ponderal, si bien los de tipo volumétrico están muy extendidos para la fabricación de mezclas en frío y grava-emulsión y se cuenta con amplia experiencia en su empleo. En cualquier caso, como mínimo, para la dosificación de la emulsión se dispondrá de contadores que permitan controlarla.

La extensión del material reciclado se realizará preferentemente con extendedoras autopropulsadas dotadas de los elementos de guiado y nivelación que fueran precisos para obtener el perfil deseado. Resulta muy conveniente que la extendedora disponga de un buen sistema de precompactación para ayudar a alcanzar las densidades previstas. El empleo de motoniveladoras debe reservarse a trabajos donde no sea necesaria una gran precisión (camino agrícolas, capas de subbase, etc.).



Reciclado en Planta independiente

Otras de las ventajas que puede presentar el RFE en planta son:

- Realizar operaciones de fresado/reciclado variando con facilidad la anchura de la zona afectada.
 - Tratar la interfaz entre el pavimento antiguo y el material reciclado. La limpieza del fondo de capa y la adherencia/imprimación del soporte pueden realizarse sin problemas por medios convencionales con plenas garantías, lo que no siempre es posible con los sistemas de RFE in situ.
 - Modificar el perfil del pavimento antiguo. Esta operación se puede realizar con algunos equipos de RFE in situ, a condición de que no se varíe el volumen de material total.
 - Aumentar o disminuir fácilmente el espesor de la capa final en relación a la inicial. En los RFE in situ también es posible realizarlo pero requiere en el primer caso que se incorpore previamente la parte correspondiente de material adicional (granular o procedente de fresado) y en el segundo la realización de un fresado y eliminación del espesor correspondiente.
- el del mayor coste que, al menos en principio, debe tener por los movimientos, cargas y transporte, que hay que dar al material a reciclar.
 - el desfase entre la retirada del material a reciclar y su puesta en obra tras el mezclado, naturalmente siempre y cuando la aplicación se realice en la misma vía. Este problema puede resolverse sustituyendo material reciclado por otro de características similares (mezcla convencional, grava-emulsión,...) y diseñando una fórmula de trabajo que permita acopiar el material reciclado durante algún tiempo (1-2 días).

De todas formas, cuando se aborda una operación de RFE resulta conveniente analizar las dos posibilidades, in situ o en planta, tanto desde el punto de vista técnico como económico, teniendo en cuenta las condiciones de la obra y la disponibilidad de determinados equipos.

5.2. RFE in situ

A diferencia del RFE en planta, en el RFE in situ el mezclado se realiza sobre la misma carretera por lo que requiere equipos específicamente diseñados para ello. Esta especificidad se refiere fundamentalmente a los equipos que realizan el levantamiento del firme, el mezclado y la extensión, ya que, como se ha indicado, la compactación y operaciones posteriores son comunes al RFE en planta.

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.

Frente a algunas de las ventajas mencionadas del RFE en planta, esta técnica presenta también algunos inconvenientes de los que los principales, sin duda, son:



“Full train” (USA)

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 que incluyen fresadora, machacadora, mezclador y sistema de extensión con regla de alta compactación. Además, pueden estar constituidos por varias máquinas trabajando a cierta distancia unas de otras o bien por varias máquinas trabajando conectadas entre sí o por una única máquina compacta. Como resultado de ello son posibles un sinnúmero de configuraciones, con costes, calidades y rendimientos muy diferentes. A continuación se describen algunas de las configuraciones y equipos que se emplean con más frecuencia y/o que resultan más interesantes en el momento actual.

Fresadora-Machacadora-Mezcladora + Extendidora

Es una configuración empleada en USA y Canadá, pero no es normal en Europa y en España no se ha utilizado hasta el momento. Se conoce bajo la

denominación de “Single-pass Recycling Train” o “Full Train”. Junto a un coste de adquisición elevado proporcionan altos rendimientos y una gran calidad de ejecución.

En esencia se trata de una fresadora de gran potencia, habitualmente de 3,50m. de ancho, unida a una plataforma sobre la que se ha dispuesto un equipo de machaqueo y cribado que permite procesar el material aportado por la fresadora limitando el tamaño máximo (generalmente a 20-25 mm, según espesor de capa). Con el material ya procesado se alimenta un mezclador que va montado sobre la misma plataforma anterior o bien sobre otra solidaria de la anterior. La alimentación de emulsión y agua se realiza mediante cisternas conectadas por mangueras y la dosificación a través de bombas y contadores, de la misma forma que en la mayor parte de los equipos. En el caso de que se requiera un aporte de áridos para corregir granulometría, éstos se extienden sobre el pavimento, por delante del equipo.



Fresadora+ Mezcladora-Extendedora

En esta configuración y en las sucesivas se prescinde del elemento de cribado y machaqueo visto en la configuración anterior. Por ello en todas estas configuraciones anotaremos como inconveniente la imposibilidad de reprocesar el material fresado para ajustar el tamaño máximo, lo que obligará a extremar los cuidados en la operación de fresado. En este caso se emplean dos equipos trabajando en serie. El primero es una (o varias) fresadora convencional que levanta el pavimento. El material fresado debe llegar a la mezcladora-extendedora para lo cual existen tres posibilidades:

- puede depositarse formando un cordón, en cuyo caso la carga de la mezcladora-extendedora se hace mediante un equipo ad hoc: cargadora de cadenas o de cangilones.
- puede cargarse sobre camión y éste se encarga de depositar el material en la tolva de la mezcladora-extendedora. En este caso puede tratarse la superficie (limpieza y adherencia o imprimación) previamente a la extensión.
- puede depositarse sobre la tolva de la fresadora-extendedora mediante una cinta transportadora convencional.



Fresadora + Mezcladora-Extendedora (USA)

Fresadora-Mezcladora+Extendedora

En esta configuración y en las siguientes se prescinde de otro elemento independiente: la mezcladora, y el mezclado se realiza simultáneamente al fresado. La idea que inspira estos equipos de fresadora-extendedora es la de aprovechar la energía del fresado para obtener la mezcla dentro de la campana o carcasa de la fresadora. Para ello se dispone una rampa que inyecta la emulsión dentro de la cámara de fresado. Existen numerosos equipos de este tipo y prácticamente todos los grandes fabricantes de fresadoras disponen de equipos de fresadora-mezcladora derivados de sus fresadoras convencionales. El suministro de emulsión se realiza a través de una tubería flexible desde una cisterna que se solidariza con la fresadora-mezcladora por una barra rígida. La inyección de emulsión se regula mediante una bomba de caudal variable y se controla con contadores o caudalímetros, además se dispone generalmente de un sistema de retorno. Cuando se necesita incorporar agua, además de la emulsión, la mejor solución es disponer una segunda rampa de inyectores duplicando el sistema de impulsión y control. Como alternativa puede realizarse una conexión de las mangueras de emulsión y agua regulando el caudal de ambas bombas de forma que la proporción sea constante.

La incorporación de áridos para corrección granulométrica o de aditivos, tipo cal o cemento, se realiza extendiéndolos sobre la superficie a reciclar antes del paso de la fresadora-mezcladora. La extensión de materiales pulverulentos puede dar lugar a algunos problemas (dosificación incorrecta, contaminación de áreas colindantes,...) en caso de vientos algo fuertes. Para solucionar este problema se han puesto a punto recientemente equipos que permiten manejar estos productos, en especial el cemento, en forma de lechada un aspecto a cuidar en este caso será el control del agua total introducida al sistema para evitar problemas de humedad excesiva. Las anchuras de trabajo de estos equipos de fresado-mezclado suelen ser fijas, desde 1 a 3,5m. normalmente, dependiendo de la fresadora de origen.

En este tipo de configuración el extendido se realiza mediante una extendidora independiente para lo cual el material fresado y mezclado se suele dejar sobre el firme formando un cordón. Debe tenerse en cuenta el efecto desecación para ajustar correctamente la humedad en el mezclado. Existe también la posibilidad de enviar el material mezclado a un camión o directamente a la tolva de la extendidora mediante la cinta cargadora de la fresadora. Esta opción no es muy recomendable por la facilidad con el material tratado con emulsión se adhiere a la cinta lo que acarrea problemas de segregación además de acortar la vida de la propia cinta elevadora.

Como desventaja básica en relación con los equipos dotados de mezcladora independiente hay que señalar que la calidad del mezclado en estos equipos es muy buena en el sentido vertical pero, sin embargo, la homogeneización en sentido transversal puede considerarse mediocre. En esta configuración éste no es un problema

grave ya que el material después del mezclado se rehomogeniza, pero aún así, es un factor a tener muy en cuenta cuando el firme a reciclar no presente una estructura homogénea en sentido transversal.

Fresadora-Mezcladora-Extendidora

Como variante o mejora de la configuración anterior han surgido equipos que integran en una sola máquina las funciones de fresado, mezclado y extendido. En algún caso el mezclado es independiente del fresado y se realiza mediante una mezcladora de eje transversal que se ubica inmediatamente detrás de la fresadora.

Reciclado tipo RFE-III con dos máquinas Wirtgen 2100DCR trabajando en paralelo



Detalle de la 2100 DCR



Estos equipos, en particular la 2100 DCR, se están utilizando con gran éxito en España en la realización de obras de RFE in situ de gran volumen y están especialmente indicadas para los del tipo RFE-III

Fresadora-Mezcladora

Por último, la configuración operativa más sencilla para el RFE in situ es la de la fresadora-mezcladora por sí sola. En este caso se prescinde de la extendidora, acoplada o no, de las configuraciones anteriores y se deja el material simplemente perfilado mediante una compuerta regulable. Estos equipos, a diferencia de los anteriores que derivan del concepto fresadora, tienen su origen en la adaptación de equipos de estabilización de suelos. Por ello su forma y la disposición de sus elementos son diferentes, aunque el principio de funcionamiento es similar. Existen numerosos equipos de este tipo: Caterpillar, CMI, Wirtgen, Bomag, Bitelli, Hamm,...



Sus principales ventajas son su sencillez, robustez y coste relativamente reducido. Como inconvenientes básicos en relación con los anteriores hay que señalar al menos dos:

- La imposibilidad de homogeneizar en sentido transversal, lo que puede ser importante, como ya se ha indicado, en el caso de que el firme a reciclar presente irregularidades transversales en su composición (p.e. arcenes, ensanches,...).
- La dificultad para obtener un buen perfil transversal, e incluso longitudinal, así como la falta de precompactación. Ello conduce a que en ocasiones se emplee como complemento a la fresadora-mezcladora una motoniveladora o una extendidora.



5.3. 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.

6. CONTROL DE CALIDAD

Algunas de las precauciones a tomar se han ido destacando en los párrafos anteriores mientras se describían los distintos tipos de equipos y configuraciones posibles. A continuación se señalan una serie de precauciones a tomar con carácter general, en especial en relación con los equipos empleados actualmente en España, es decir, los del tipo fresadora-mezcladora-extendedora y los más sencillos tipo fresadora-mezcladora. Se trata, por tanto, de precauciones para el RFE in situ. En el caso del RFE en planta las ideas serán las mismas aunque, en general, salvo los problemas de segregación del material a reciclar en los acopios y los asociados con el control de humedad (acopio-planta-transporte) los problemas son más fácilmente solucionables al no estar condicionada toda la cadena de trabajo.

Como en otras técnicas, y en el RFE in situ aún más si cabe, es fundamental la realización de un **tramo de prueba** en el que se analicen y definan todos los parámetros que afectan a la puesta en obra. Se busca definir:

- La velocidad de trabajo del equipo y granulometría de referencia. La base para ello estará en el análisis de la granulometría obtenida con distintas velocidades. Se establecerá la granulometría de referencia sobre la base de la que se ha empleado para el diseño de la fórmula de trabajo y servirá para el control posterior. La velocidad a la que se obtenga será una referencia relativa porque a lo largo de la obra podrán variar las condiciones de fisuración del firme a reciclar.

- La densidad de referencia y el número de pasadas de los compactadores. Para ello se compararán las densidades obtenidas en el tramo de prueba, por el método de la arena, con distintos niveles de compactación con la obtenida en probetas fabricadas por el método de Proctor Modificado. Se entenderá que la densidad alcanzada con el equipo de compactación disponible es suficiente cuando se alcance el valor del 97% del P.M. en todo el espesor de la capa. En caso de no alcanzarse este valor deberán modificarse las condiciones de compactación, bien en lo que se refiere al contenido de fluidos, bien en el equipo de compactación empleado.

Puesto que las densidades de las fórmulas de trabajo están muy influenciadas por la granulometría, la mejor forma de garantizar la compactación adecuada es optimizar la compactación en el tramo de prueba, utilizando equipos adecuados. El valor de densidad del tramo de prueba se puede utilizar como referencia en el resto de la obra si las verificaciones de las granulometrías del fresado no muestran variaciones significativas.

- Correlaciones entre las densidades obtenidas por el método de la arena y otros métodos más rápidos de control como los densímetros nucleares, que sirvan para el control rápido de la compactación durante la ejecución de la obra.

El **ritmo de trabajo** es un aspecto que tiene gran influencia en la calidad de la ejecución del RFE. A medida que los equipos son más sencillos y realizan las operaciones de forma menos diferenciada, el establecimiento de un ritmo continuado de trabajo, evitando las paradas, resulta más importante para poder obtener una buena homogeneidad del producto final y también para obtener una buena regularidad superficial. Es importante, por tanto, establecer desde el primer momento cuáles son las cuestiones que, averías aparte, van a provocar la parada de los equipos. En función del tipo de equipo habrá que tener en cuenta los consumos

horarios de emulsión y de agua, los desgastes de las picas del tambor fresador, las cadencias de trabajo de los distintos elementos del equipo, etc. Se deberá establecer una velocidad de avance compatible con todos los elementos y programar las paradas para reducirlas al mínimo, aprovechando las que inevitablemente se produzcan para reponer partes fungibles y reabastecer los distintos elementos de almacenamiento.

Cuando no se emplea equipo de machaqueo y cribado es necesario prestar mucha atención a las condiciones en que se realiza el **fresado** para obtener una **granulometría** adecuada. Los factores que condicionan la granulometría son muchos: tipo de material a fresar y situación de deterioro (cuanto más rígido y menos fracturado esté, más fino será el material fresado), el tipo de tambor-fresador (tipo, número y disposición de las picas), la velocidad de giro del tambor, la velocidad de avance de la fresadora, la profundidad de fresado y la distancia entre la rejilla o barra rompedora que sirve de "tope" para impedir el paso de elementos gruesos. En condiciones normales cabe pensar que se habrá escogido un tipo de tambor idóneo para el tipo de material a reciclar (cada fabricante dispone de varios modelos adaptados a cada tipo de material), que la velocidad de giro del tambor vendrá dada por la propia máquina y que la profundidad de trabajo es un parámetro de proyecto. Por ello, los parámetros a variar serán la velocidad de avance del equipo y la distancia de la barra rompedora al tambor (en las máquinas que permiten esta opción). Definida esta última por el tamaño máximo deseado, la velocidad de avance se fijará en función del tipo de material, su estado de fractura y la profundidad de trabajo. En general será posible establecer una **velocidad de avance idónea** por encima de la cual la calidad del fresado será mala y por debajo de la que no se conseguirá mejorar la granulometría. Las velocidades normales en el RFE in situ de mezclas asfálticas suelen ser del orden de los 3 a 8 m./min. En cualquier caso, los parámetros a controlar y las frecuencias de control serán:

- la velocidad de avance del equipo.
- la profundidad de fresado mediante un punzón graduado, con la mayor frecuencia posible
- la granulometría del material fresado sin extracción, al menos dos veces al día

Cuando se dispone de sistema de mezclado independiente no hay muchos problemas a la hora de **incorporar los áridos y aditivos**, con excepción de la problemática creada por el viento con la cal y el cemento, como ya se ha señalado. Ahora bien, si el equipo es de los del tipo fresadora-mezcladora se plantea el problema de la falta de homogeneidad transversal. En este caso los áridos deberán extenderse con algún equipo que garantice una dosificación superficial homogénea. Para los áridos pueden emplearse extendedoras convencionales o distribuidores de gravillas de los empleados en los tratamientos superficiales. Para la distribución de cal o cemento se debe emplear alguno de los equipos específicos existentes en el mercado evitando la distribución manual o mejor aún, los equipos que incorporan estos materiales en forma de lechada mediante inyección directa a la cámara de fresado-mezclado.

Como ya se ha visto en la parte dedicada al diseño de los RFE, la **humedad** del sistema juega un papel fundamental en el proceso. Es necesario que exista una cierta proporción de humedad para obtener una buena envuelta y un cierto contenido de fluidos, agua y emulsión, para optimizar la compactación. Sin embargo, la adquisición de las características finales se produce tras el periodo de maduración que, en esencia, es un proceso de expulsión de agua del sistema. Por ello es imprescindible estudiar y controlar la proporción de agua en el RFE controlando la humedad de forma

sistemática. Los aspectos que pueden modificar el contenido óptimo de humedad definido en la fórmula de trabajo son las variaciones de temperatura del pavimento y las manipulaciones que reciba el material hasta la compactación.

Las temperaturas altas del pavimento, unidas al efecto de calentamiento del fresado, pueden provocar una aceleración de la rotura de la emulsión y como consecuencia de ello puede haber problemas de envuelta. Es posible compensarlos aumentando el agua aportada al sistema a condición de que ello no suponga sobrepasar la humedad óptima de compactación. Si se presenta este problema deberá recurrirse a un aumento de la estabilidad química del sistema, bien aumentando la estabilidad de la emulsión, bien incorporando un retardador de rotura a través del agua incorporada. En cualquier caso, cuando se presente este tipo de problemas, habrá que ser muy cuidadoso y evitar que se tomen decisiones a la ligera en la obra.

Cuando el material mezclado no sea extendido directamente por el equipo, nos encontraremos con un conjunto de operaciones (puesta en cordón, carga,...) durante las cuales puede producirse una desecación de la mezcla. Estas pérdidas de humedad deberán valorarse para corregir la dosificación de agua pero, además, los responsables en obra deberán valorar las condiciones ambientales (temperatura, viento,...) para corregirla sobre la marcha. Los defectos de humedad pueden paliarse a posteriori reprocesando el material e incorporando agua. Sin embargo esto difícilmente solucionará un defecto en la envuelta del material. Los excesos de humedad sólo podrán paliarse oreando el material y retrasando la compactación.

Resulta obvio que la correcta **dosificación de la emulsión** así como el control de sus características (en particular el contenido y tipo de ligante residual) resultan fundamentales para garantizar el éxito del RFE. Hay que señalar en lo que respecta al control, la conveniencia de conocer, no tanto las características del ligante residual obtenido en el ensayo de destilación, como las del realmente empleado en la fabricación de la emulsión. Pueden encontrarse diferencias entre ambos debidas al proceso de envejecimiento del propio sistema de destilación (temperatura de ensayo de 260°C), especialmente cuando se trata de ligantes blandos o con adición de productos de tipo regenerante.

A nivel de ejecución de obra el aspecto más importante de la emulsión será el relativo a la velocidad de rotura (UNE-EN 13075-1). La **estabilidad de la emulsión** en relación con el material deberá ser suficiente para garantizar una buena envuelta pero, de la misma manera que un exceso de humedad es negativo, un exceso de estabilidad de la emulsión tendrá efectos retardadores en la maduración. Incluso podrían darse problemas de lavado del material y peladuras si se produjesen precipitaciones en los primeros momentos tras la puesta en obra. Así pues, la estabilidad de la emulsión, como la humedad, tiene su punto idóneo que es función de las características del material y de las condiciones ambientales.

Se comprobará, al menos dos veces al día, la dosificación de ligante y la humedad del material reciclado. Estas comprobaciones no son fáciles de realizar en obra. El control de la

dosificación se hará por extracción (NLT- 164) pero dada la facilidad para que los datos den mucha dispersión se realizará también un control diario de consumos de emulsión y volumen de material reciclado. En cuanto a la humedad, el control en laboratorio se realizará mediante secado en estufa hasta peso constante pero en obra se deberá emplear algún método rápido. Diariamente se tomarán muestras para la realización del ensayo de inmersión-compresión. Así mismo, se verificará frecuentemente que no se producen segregaciones y que la envuelta es buena.

Las **juntas de trabajo** constituyen un punto delicado de los RFE in situ. Como norma general se tratará de evitar las juntas limitando las paradas de los equipos y trabajando en el mayor ancho posible con equipos en paralelo si hay disponibilidad. En las juntas que sea inevitable realizar se tomarán las siguientes precauciones:

- en las juntas longitudinales se solaparán las pasadas en una anchura de aproximadamente el doble de la profundidad de trabajo (en la práctica, del orden de los 15-30 cm.)
- en las juntas transversales se reiniciará la operación actuando sobre la zona ya tratada (como mínimo 1m.), pero no se empezará a incorporar emulsión y agua hasta que se penetre en la zona aún no fresada. Esto requiere una cierta pericia por parte de los operarios y en ocasiones se pueden producir zonas con exceso de emulsión que deben retirarse y reponerse.

Cuando la **extensión** del material reciclado se realice con extendedora se tendrán las mismas precauciones que en los casos de materiales similares, como p.e. la grava-emulsión. Además se debe tener en cuenta el **esponjamiento** del material tras el fresado. Debido a ello la rasante tras la extensión queda significativamente por encima del nivel del firme antiguo. Para que la compactación se realice correctamente es necesario achaflanar los bordes. Esta operación podría realizarse automáticamente modificando ligeramente la regla de la extendedora o colocando unos perfiles adicionales en la compuerta de salida de la fresadora-mezcladora cuando no se emplea extendedora. Sin embargo, lo habitual es que se realice manualmente empleando rastrillos, palas o rastras. En este caso habrá que vigilar que el material retirado no dé lugar a segregaciones en la superficie que ocasionarían, con toda probabilidad, problemas de peladuras al abrir al tráfico.

Con la **compactación** del RFE se buscan tres objetivos. Uno es el de compacidad, como en cualquier otro material. Otro es el de completar el proceso de rotura de la emulsión que, si ha sido diseñada correctamente, debe encontrarse en la fase de coalescencia. Con la compactación se producen los contactos entre partículas que provocan la expulsión del agua del sistema hacia los huecos dejando que el betún se deposite definitivamente sobre las partículas minerales. Por último dejar la superficie lo más cerrada posible al objeto que pueda soportar mejor el paso directo del tráfico y para ello es muy recomendable mantener circulando el(los) compactador(es) de neumáticos sobre el material reciclado el mayor tiempo posible.

La compacidad que se alcanza inicialmente en las operaciones de RFE de mezclas asfálticas suele ser

relativamente baja: en torno al 82-90%. Estos valores pueden parecer bajos pero no lo son tanto si se tiene en cuenta que la estructura granulométrica real del material fresado (la que se obtiene sin eliminar el betún) contiene muy pocos finos y que la densidad del material de partida no es la de un árido convencional sino menor por la presencia del betún. Lo que sí se ha comprobado es que estos niveles de compacidad resultan satisfactorios a la vista del comportamiento posterior. La compacidad aumenta algunos puntos a lo largo del proceso de maduración hasta situarse en torno al 88-92%. Si la capa a reciclar tiene una proporción alta (>50%) de material no tratado de granulometría continua la compacidad final será similar a la de una grava-emulsión, en torno al 90%. Si la granulometría fuera cortada sin finos la compacidad podría ser todavía más baja.

Uno de los problemas que se presentan es el control de la compactación. Por un lado, por los problemas ya citados para definir la densidad de referencia y, por otro, porque normalmente no es posible la extracción de testigos en toda la profundidad de la capa tratada hasta pasadas varias semanas del periodo de maduración. Ello hace que la determinación de la densidad deba hacerse mediante el ensayo de densidad in situ por el método de la arena (NLT 109). Si se emplean densímetros nucleares deberán tararse previamente. La correlación entre los datos de este método y los de la arena deberán ir comprobándose diariamente durante toda la obra y, si es posible, con los datos de densidades obtenidos de la extracción de testigos. En cualquier caso, la densidad mínima a exigir será la correspondiente al 98% de la densidad de referencia obtenida en el tramo de prueba.

El momento de **apertura al tráfico** y la conveniencia de aplicar un tratamiento de protección son dos aspectos de la ejecución de un RFE que casi siempre crean incertidumbre en el responsable de la obra. Como principios generales hay que señalar la conveniencia de prolongar lo más posible tanto el tiempo de apertura al tráfico, como el tiempo en que el RFE se encuentra sin protección. La idea es maximizar la compactación, especialmente con neumáticos, y acelerar todo lo posible la maduración. Sin embargo, no siempre se dan las circunstancias que nos permitan alargar dichos espacios de tiempo. En la mayor parte de las ocasiones la apertura al tráfico se debe realizar con rapidez. Esto no representa un inconveniente grave a condición de que se restablezca la circulación de forma controlada, limitando la velocidad y evitando una canalización excesiva. Serán los vehículos los que realicen el efecto del compactador de neumáticos.

El **tratamiento de protección**, no siempre necesario, prolonga el periodo de maduración por lo que se ejecutará solamente cuando sean de temer precipitaciones intensas, que perjudicarían aún más la maduración, o cuando el tráfico produzca peladuras o erosiones. En este último caso puede pensarse en la realización de un

tratamiento de protección parcial, es decir, en aquellas zonas más sensibles a los deterioros (curvas, cruces, zonas con segregaciones,...). En caso de ser imprescindible algún tipo de protección se aplicará un tratamiento de sellado con arena o un riego monocapa con árido fino.

Por último queda la decisión sobre el momento de proceder a la cubrición del material reciclado con la(s) capa(s) prevista(s). Como ya se ha indicado conviene mantener el material reciclado sin cubrir tiempo suficiente para alcanzar un grado de maduración adecuado. Este grado de maduración puede estimarse en base a dos criterios:

- ◇ posibilidad de extracción de testigos. Si pueden extraerse en todo el espesor, se entiende que la mezcla ya tiene un nivel de maduración suficiente
- ◇ control de la humedad del material. Cuando la humedad alcanza valores próximos al 1%, se entiende que la mezcla ya tiene un nivel de maduración suficiente

Como resumen, los aspectos a los que el inspector de obra debe prestar especial atención:

- Velocidad de avance y espesor de fresado.
- Granulometría del material fresado sin extracción, especialmente tamaño máximo.
- Dosificación de ligante y humedad del material reciclado.
- Segregación y envuelta del material reciclado.
- Resistencia mecánica: inmersión-compresión.
- Densidad y espesor del material compactado.
- Regularidad superficial.

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.

En el caso de agotamiento estructural, los distintos sistemas de reciclado se presentan como alternativa o complemento a otros métodos de rehabilitación o reconstrucción. Así, por ejemplo, los sistemas de reciclado in situ con ligantes bituminosos, en frío o en caliente, 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 el problema del dimensionamiento puede abordarse empleando métodos analíticos y/o métodos empíricos.

7.1. Dimensionamiento por métodos analíticos

El dimensionamiento de firmes por métodos analíticos en los que entra en consideración el reciclado de una o varias capas, el firme existente es uno de los problemas de diseño de firmes más complejos de abordar. Como criterio o norma básica cuando se

quiera realizar un dimensionamiento de este tipo se deberá tener una referencia 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. Los datos de entrada deben ser, además de los propios de la auscultación visual, los espesores de las distintas capas, obtenidos de datos históricos y/o extracción de testigos, y las medidas de deflexión y radio de curvatura del cuenco de deflexión. 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. También puede realizarse una hipótesis inicial basada en los datos de espesores disponibles y variando los parámetros del modelo, obtener curvas que relacionen las medidas de deflexión y radio del cuenco con módulos y espesores de capas. Un modelo que puede proporcionar buenos resultados con firmes flexibles y semiflexibles es el de suponer el firme existente constituido por explanada, una o varias capas granulares con módulos dependientes linealmente del de la explanada y una o varias capas de mezcla bituminosa cuyos módulos dependen de que se consideren o no agotadas. El valor típico de módulo para mezcla bituminosa no fisurada es de 6.000 MPa y en el caso de que esté fisurada el valor puede encontrarse entre 500 y 2.000 MPa dependiendo del tamaño de la malla, cuanto más fina (más próxima a "piel de cocodrilo") menor valor de módulo.

En cualquier caso, no puede afirmarse rotundamente que un tipo de aproximación al problema del cálculo inverso sea mejor o peor que otros. Lo importante es llegar a una modelización del firme existente que presente una buena correlación con los datos de auscultación y que sea coherente con los principios de

funcionamiento de los firmes. Además esta modelización deberá permitirnos establecer, junto con los datos sobre composición del firme, los tramos homogéneos en los que deberemos realizar el diseño del nuevo firme.

En algunas ocasiones se puede simplificar el problema considerando que el material que queda por debajo de la capa reciclada se asimila con una explanada de buena calidad, tipo E3 (CBR>20), con lo que se modeliza como un macizo semiindefinido de módulo 200 MPa. Esta simplificación puede ser aceptable en algunos casos pero debe ser comprobada, especialmente en casos de deflexiones altas, y si no concuerda, debe modificarse a valores inferiores.

El otro aspecto fundamental es el de la caracterización en sí de las capas recicladas. Mientras que los reciclados en caliente ejecutados en planta permiten un control similar al de una mezcla convencional, en los sistemas en frío in situ, además de no existir aún una gran experiencia, 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. Desde este punto de vista es fundamental, por tanto, ser muy exigente en la puesta en obra, especialmente con la humedad y la compactación.

Es preciso señalar que, aún contando con los medios adecuados y ejecutando correctamente la compactación, hay diferencias de compactación con los ensayos de laboratorio. Tal es el caso de los RFE donde las densidades obtenidas con una buena ejecución se sitúan en valores intermedios entre los del Proctor Modificado y la Inmersión-Compresión. 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 siguientes:

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	

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 material reciclado 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. 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

Como ya se ha indicado anteriormente, 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:

Coeficientes de equivalencia entre materiales reciclados y convencionales

Tipo de reciclado	Coeficiente 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	

- Dimensionamiento basado en la Instrucción 6.3 IC de la D. Gral. Carreteras del M^o Fomento (España)

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. Este criterio difiere de forma sustancial del existente en la antigua Instrucción 6.3-IC que aborda refuerzo con periodos de proyectos más cortos y espesores más reducidos, en muchos casos insuficientes.

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 y se deberá recurrir al saneo

del firme en la forma descrita en la propia instrucción.

En esta situación el reciclado se configura como una alternativa o como un complemento al fresado y reposición. Desde un punto de vista económico el fresado y reposición o el reciclado en caliente en planta estarán más indicado cuando el porcentaje de zona agotada sea bajo o las actuaciones sean de longitud reducida mientras que el RFE y el reciclado en frío mixto lo estarán cuando la zona a tratar sea mayoritaria y esté dispuesta en tramos de gran longitud. En principio queda excluido de esta posibilidad el reciclado con cemento que, como ya se ha indicado, hace referencia a una actuación de rehabilitación en profundidad o reconstrucción de firmes flexibles o semiflexibles en los que la calidad de los materiales granulares haga que su valorización mediante otras técnicas en frío sea dudosa.

El cálculo de los espesores de reciclado (sin olvidar que habrá que colocar una o dos capas de mezcla bituminosa por encima) como alternativa al fresado y reposición, debe tener en cuenta tres aspectos:

- Espesores máximos y mínimos de cada técnica de reciclado
- Espesores equivalentes (datos orientativos en la tabla correspondiente)
- Espesores mínimos que, en función del tráfico y del tipo de firme, deben quedar después de la actuación (ver en la tabla anterior, la columna de la derecha)

De cualquier forma, en el mercado español hay alguna empresa que ha preparado catálogos de soluciones con reciclados basadas en la tabla anterior de la instrucción. En nuestra opinión el campo de validez de las soluciones de reciclado es mucho más estrecho del que ofrecen estos catálogos y dada la magnitud de este tipo de operaciones resulta preferible emplear un poco de esfuerzo en buscar la solución ad hoc.

- Manuales de reciclado en frío de **Loudon & Partners**

Se trata de un completo manual que aborda los distintos aspectos de la técnica de los reciclados en frío. En él se propone una metodología de diseño y se ofrecen un conjunto de soluciones basadas en materiales reciclados en frío, tanto con emulsión como con cemento y mixtos. Las bases del dimensionamiento son:

- El periodo de proyecto establecido es de 15 años
- El tráfico se clasifica en cinco categorías: muy ligero, ligero, medio, pesado y muy pesado, correspondientes a tráficos diarios de proyecto de <10, 10-50, 50-150, 150-700 y 700-3.000 ejes equivalentes de 80 kN
- Explanada de buena calidad ($E_{exp} > 120$ MPa). Para explanadas de peor calidad se limita a indicar que los espesores deben ser aumentados.