

2.1. Introducción al reciclado de pavimentos asfálticos

El pavimento de una carretera está sujeto a la acción continua del tráfico y de la meteorología. Estos dos factores, junto con el envejecimiento natural de los materiales, hacen que el firme sufra un proceso de progresivo deterioro. Este envejecimiento y deterioro del firme conlleva una disminución paulatina en los niveles de seguridad y confort del tráfico, que al sobrepasar ciertos valores hacen necesaria una operación de conservación.

La conservación de la red viaria es en la actualidad un aspecto de gran importancia debido a los recursos que moviliza. El presupuesto necesario para el mantenimiento, así como los problemas ambientales que de él se derivan, justifican la búsqueda de nuevas técnicas que permitan reducir costes y sean respetuosas con el medio. En este contexto, el reciclado de firmes, como medio de racionalizar los recursos, toma un renovado protagonismo y se convierte en una necesidad.

La creciente sensibilización social acerca de la necesidad de preservar el medio ambiente ha hecho que la legislación sea hoy mucho más proteccionista que en el pasado. Esto dificulta la obtención de materias primas adecuadas, aumentando su coste y el de su transporte hasta la obra, ya que casi nunca se producen en el lugar donde se necesitan. De igual manera, es creciente la dificultad para encontrar un vertedero para los materiales retirados del firme a precio razonable. Estos problemas son especialmente ciertos en ámbitos urbanos.

El desecho de los materiales envejecidos del firme, además de provocar problemas relacionados con la adquisición de nuevas materias y con su vertido, resulta contraproducente desde el punto de vista técnico, ya que pese a estar envejecidos, conservan buena parte de sus cualidades. El fresado y reutilización del conglomerado asfáltico comporta un gran ahorro [2], ya que requiere sólo de un 1% a un 3% de betún adicional, mientras que un nuevo hormigón asfáltico puede necesitar más del 6%. Este aspecto, junto con el reducido coste de transporte y la escasa energía necesaria para la producción de un firme reciclado, hacen que el ahorro energético sea importante respecto de la construcción convencional de pavimentos.

El sistema de gestión de cualquier firme debe controlar sus características durante toda su vida útil. De esta manera se podrá decidir en cualquier momento la mejor opción de conservación para mantener el nivel de servicio exigido por las necesidades del usuario. Estos sistemas pretenden ser la herramienta ideal para encontrar el momento y el procedimiento óptimo para realizar la conservación de modo que se obtenga el mejor resultado posible al menor coste para la sociedad. Incluimos en este coste social tanto el coste efectivo de la reparación como los posibles gastos externos referidos a la circulación de los vehículos, a los posibles accidentes que puedan derivar del mal estado del firme, a los tiempos de demora, etc. Las operaciones de conservación pueden ser muy frecuentes pero poco importantes o por el contrario, escasas y de mayor envergadura. Aquellas actuaciones de menor presupuesto o más espaciadas en el tiempo comportarán un mayor coste

social. En cambio, una actuación más completa y costosa o más frecuente comportaría un menor coste social. Así pues, es la administración la que debe decidir aquella actuación menos costosa socialmente posible teniendo en cuenta el presupuesto que dispone. El sistema de gestión proporciona los elementos de juicio necesarios para poder decidir cuál es la mejor estrategia para cada caso particular, considerando a la vez las necesidades y las prioridades de la red. El sistema simula las consecuencias positivas y negativas de cada actuación posible, lo que permite una mejor planificación de la red y una mejor administración del presupuesto destinado a la conservación.

2.2. Alternativas de rehabilitación estructural

Las técnicas de conservación de firmes pueden dividirse en técnicas clásicas y técnicas de reciclado. Ambas técnicas pueden resultar eficaces ante un mismo problema. Es por ello que expondremos brevemente a continuación los criterios de selección que se deben seguir para llevar a cabo la elección más conveniente en cada caso.

A la hora de abordar la rehabilitación de una carretera agotada tenemos muchas posibilidades. Sin embargo hay dos cuestiones claves que siempre nos deberíamos hacer:

- ¿Qué ha fallado en la carretera?, y
- ¿Qué quiere realmente el propietario de la misma?

La respuesta a estas dos preguntas reduce las opciones de rehabilitación a sólo aquellas que son compatibles con el presupuesto, la naturaleza del problema y el periodo de proyecto. Si además identificamos si el problema afecta a las capas superficiales o a la estructura del firme, la determinación de la mejor opción se ve simplificada.

En el caso de que el problema afecte a las capas superficiales, hasta 10 cm de profundidad, el reciclado con emulsión suele ser una magnífica opción. En estos casos el deterioro se suele producir por envejecimiento de la capa superior que se ha degradado, fisurado, descarnado, etc.

En estas situaciones, la nueva capa reciclada se comporta como una buena capa de base asimilable a una grava-emulsión. Dependiendo del tráfico, nos podremos plantear cubrirla con un simple tratamiento superficial o lechada bituminosa o un refuerzo convencional.

Las opciones de rehabilitación tradicionales son el refuerzo convencional y el fresado seguido de reposición (y normalmente, también de refuerzo). El primer caso tiene un coste parecido a la solución con reciclado; el segundo es mucho más caro.

En el caso de que los problemas afecten a la estructura del pavimento, debemos tener en cuenta que la rehabilitación a llevar a cabo se debe plantear

a más largo plazo. No debemos olvidar, que el agotamiento de la estructura no implica el agotamiento de los materiales que la componen.

Como regla general, la rehabilitación en estas situaciones debería tender a maximizar el valor residual que se puede rescatar de la sección actual. Esto implica que los materiales que han sido consolidados a través de los años por acción del tráfico, no deben ser alterados.

La solución indicada en estos casos puede ser el reciclado, con cemento o emulsión, en un espesor tal que recupere la totalidad de las capas afectadas. Estamos hablando de espesores de reciclado que pueden llegar a los 15 cm si trabajamos con emulsión y hasta 40 cuando trabajamos con cemento.

Si existe presencia de materiales plásticos, como por ejemplo en el caso de contaminación de finos procedentes de la explanada, se puede utilizar también cal para corregir este efecto.

Como en el caso de la rehabilitación superficial, se pueden plantear una o varias capas de refuerzo posterior al reciclado, dependiendo de las condiciones del tráfico. Esta solución también es adecuada, cuando existen graves deficiencias de la explanada en carreteras de tráfico moderado a bajo. En tales casos, un reciclado con cemento en un espesor importante puede evitar la reconstrucción total de la sección. Las capas tratadas con cemento suelen tener una rigidez considerable, por lo que no se deben de utilizar en pequeños espesores sobre capas de escasa capacidad portante por los problemas asociados de fragilidad que pueden presentar.

El proceso de selección de alternativas en conservación de firmes se puede resumir en cuatro fases [2]:

Fase 1. Descripción de las condiciones existentes en el firme:

- Recopilación de información preliminar (localización y longitud del tramo, clase de carretera, sección del firme existente, geometría de la carretera, características del tráfico, características de las capas inferiores del firme...).
- Descripción del firme (condiciones superficiales y condiciones estructurales).

Fase 2. Identificación de las alternativas viables de rehabilitación:

- Rehabilitación superficial.
- Rehabilitación estructural.
- Reconstrucción parcial o total.

Fase 3. Evaluación de las alternativas de rehabilitación estructural:

Una vez se ha tomado la decisión de mejorar la capacidad estructural del firme, se dispone de varias técnicas diferentes para llevarla a cabo. Entre las más importantes podríamos comentar las siguientes [2]:

- *Técnicas convencionales o clásicas.* Se trata de las técnicas usuales que se utilizan de forma generalizada en la actualidad. Con estos métodos, los deterioros más importantes se corrigen colocando una capa de refuerzo superficial a base de materiales vírgenes. Si los deterioros son muy importantes, se procede a eliminar el grosor defectuoso y se substituye por nuevas capas bituminosas.

- *Técnicas de reciclado.* Este tipo de métodos se basan en la reutilización de los materiales del firme defectuoso. Junto con estos materiales envejecidos, se pueden añadir otros elementos (agentes rejuvenecedores, nueva mezcla bituminosa, etc.). Estas técnicas se pueden dividir en varios tipos diferentes, que exponemos brevemente a continuación:

· Reciclado “in situ” en caliente. Se reutiliza la totalidad de los materiales extraídos del firme envejecido mediante un tratamiento con aportación de calor que se realiza en el mismo lugar de la obra. El firme se calienta mediante unos quemadores y se fresa un grosor determinado. Este material es mezclado normalmente con agentes químicos rejuvenecedores y con nueva mezcla. Finalmente, la nueva mezcla se extiende y se compacta mediante procedimientos convencionales.

· Reciclado “in situ” en frío con cemento. Este es un procedimiento que se basa en el fresado en frío de un cierto grosor del firme envejecido y el mezclado de este material con un conglomerante hidráulico (cemento normalmente). El nuevo material se extiende y se compacta definiendo una sólida base para posteriores refuerzos.

· Reciclado “in situ” en frío con emulsiones bituminosas (RFSE). Esta técnica, que es la utilizada en los tramos que posteriormente estudiaremos y comentaremos, permite reutilizar la totalidad de los materiales extraídos del firme envejecido en condiciones técnicas, económicas, sociales y ambientales muy favorables. El procedimiento usual y básico consiste fundamentalmente en las siguientes operaciones:

- Fresado en frío de un cierto grosor del firme
- Mezclado del material obtenido con una proporción determinada de emulsión y otros aditivos
- Extensión en obra de la nueva mezcla
- Compactación enérgica
- Curado de la capa reciclada
- Extensión de una capa delgada de rodadura a base de mezcla en caliente

· Reciclado en planta. Este procedimiento permite reciclar el conjunto o sólo una cierta proporción de material envejecido mediante una central asfáltica adaptada. Al ser el porcentaje de material envejecido relativamente bajo, esta metodología permite corregir problemas graves de dosificación o calidad de los materiales.

Dadas todas las técnicas de conservación posibles, debe hacerse un análisis de cada una de ellas teniendo en cuenta todos los condicionantes que las puedan afectar. Algunos de los más importantes serían [2]:

- Coste. Cada técnica tendrá un cierto coste que hay que tratar de minimizar. El coste se puede considerar en términos económicos, sociales y medioambientales.
- Experiencia. La empresa y los técnicos pueden tener más experiencia con una técnica que con otra, con lo que las garantías de éxito son diferentes en cada caso.
- Equipos disponibles. La empresa debe tener disponibles los equipos humanos y materiales necesarios para poder utilizar una determinada técnica.
- Tiempo requerido de ejecución. El tiempo de entrega de la obra acabada puede ser determinante a la hora de elegir una técnica de conservación.
- Otros varios.

Fase 4. Selección de la alternativa óptima:

Tras un detenido análisis de todas las alternativas existentes se debe elegir la que se estime más conveniente en cada situación. Una vez conocida la técnica a emplear, un estudio de laboratorio determina la fórmula de trabajo (dosificación de todos los elementos de la mezcla reciclada) y el procedimiento de construcción.

2.3. Técnicas de reciclaje según la normativa española vigente O.C 8/01

El reciclado de firmes existentes comprende una serie de técnicas constructivas tendentes al aprovechamiento integral de materiales envejecidos de firmes y pavimentos que desde la crisis energética de los años setenta vienen empleándose cada vez con más profusión en la rehabilitación estructural de los firmes de carretera. En el caso de los realizados in situ se ha producido en la última década un significativo desarrollo en los equipos y en los sistemas constructivos empleados en su ejecución, con máquinas específicas para esa labor, que han permitido a su vez el desarrollo y potenciación de estas técnicas.

Tanto las obras realizadas en los últimos diez años y la experiencia adquirida en ellas, como la necesidad de considerar las técnicas de reciclado como

alternativas, por consideraciones ambientales, de seguridad vial y económicas, en los proyectos de rehabilitación de firmes aconsejan la redacción de unas especificaciones sobre las técnicas de reciclado de firmes.

El anejo de esta Orden Circular hace referencia a las tres técnicas más idóneas en el momento actual para la situación (tipología de las secciones estructurales y sus deterioros) existente en los firmes y pavimentos en nuestro país. Las técnicas aludidas son [3]:

- El reciclado in situ con emulsión de capas bituminosas.
- El reciclado in situ con cemento de capas de firme.
- El reciclado en central en caliente de capas bituminosas.

En el presente trabajo únicamente describiremos brevemente el reciclado in situ con emulsión de capas bituminosas (RFSE) por tratarse, como ya hemos comentado en apartados anteriores, del tipo de técnica de reciclado utilizado en los tramos que hemos estudiado.

2.4. Ventajas del reciclado como técnica de conservación

Las técnicas clásicas tienen importantes defectos. Un firme envejecido sin problemas estructurales graves se compone de unas capas inferiores más o menos sanas y de unas capas superficiales deterioradas. La colocación sin ningún tratamiento de una nueva capa sobre la superficie envejecida (refuerzo o recrecido) hace que en el nuevo firme exista una capa intermedia deteriorada que ha perdido sus cualidades mecánicas y que constituye por tanto un elemento inútil y perturbador para su buen funcionamiento. En la actualidad, multitud de capas de rodadura colocadas en una operación de refuerzo por recrecido convencional resultan grave y prematuramente dañadas debido a su mal asiento. El reciclaje de esta capa deteriorada antes de la extensión de la nueva capa superficial asegura un buen funcionamiento estructural del conjunto del firme, una mayor durabilidad y un mejor servicio a los usuarios.

El reciclado de pavimentos asfálticos supone en primer lugar un aprovechamiento de los recursos disponibles en la obra. Los materiales envejecidos pueden ser reutilizados mediante una técnica adecuada de forma que son nuevamente válidos para la construcción del firme. Con este tipo de técnicas, en las operaciones de conservación se puede disminuir mucho la demanda de materiales (áridos, betún, etc.), se elimina la necesidad de encontrar canteras y vertederos próximos a la obra, se mejoran los rendimientos de fabricación, etc. Además, los métodos de reciclaje “in situ” permiten eliminar las operaciones de transporte de los materiales, tanto de los envejecidos hasta un vertedero como de los nuevos desde su punto de suministro hasta la obra. Todas estas mejoras repercuten en importantes ahorros y en un mayor respeto hacia el medio ambiente. Los métodos de reciclaje tienen otras ventajas técnicas, entre las que están las siguientes [2]:

- **Evita problemas de gálibo.** La técnica clásica de recrecer el firme, utilizada de forma sucesiva puede provocar problemas asociados al crecimiento de la cota de la superficie del firme. Suele darse este problema en túneles, en ciudades (pérdida de desnivel respecto a la acera), en puntos de recogida de aguas, puede afectar a las pendientes, a la altura de la señalización vertical, etc.

- **Facilita las actuaciones relativas al cambio de la geometría de la carretera.** Así, se pueden hacer cambios en la alineación vertical y horizontal sin la necesidad de grandes actuaciones, cosa que sería más difícil hacer mediante técnicas clásicas.

- **Optimiza los recursos disponibles.** El recrecimiento de los firmes puede no optimizar los recursos, como es el caso de una vía de varios carriles, donde los deterioros se concentran en los carriles exteriores ya que por ellos circulan los vehículos pesados de forma canalizada. La técnica clásica obliga a recrecer todos los carriles, quedando sobredimensionados los centrales, mientras que las técnicas de reciclado permiten rehabilitar sólo el carril que lo necesita. Además, esta actuación permite el paso del tráfico por los carriles que no son tratados.

- **Tienen un nivel de afección al tráfico menor.** Es posible reciclar sólo un carril y permitir la circulación por los restantes. Además, el tiempo de ocupación de la vía es menor que el de las técnicas clásicas, ya que un firme reciclado puede generalmente abrirse al tráfico en pocas horas.

- **Permite la estabilización de las capas inferiores en caso de problemas estructurales y el aprovechamiento de la capa de rodadura envejecida.** Es posible reparar fallos estructurales sin necesidad de desechar los materiales existentes.

- **Mejora las condiciones de adherencia superficial.** Además, si el firme tiene otros deterioros superficiales, el reciclado puede resolver el problema automáticamente.

El reciclaje no es aplicable a todas las operaciones de conservación realizables. Estas técnicas pueden tener un coste económico superior al de las clásicas, pueden no ser aceptables ambiental o socialmente, o simplemente pueden no dar buenos resultados desde el punto de vista técnico. De este modo, el análisis de los fallos es fundamental para la elección de la técnica de conservación a emplear.

2.5. Consideraciones previas para proyectar un reciclado

Cuando nos planteemos el reciclado de una carretera, hay tres grandes áreas que deberíamos considerar para asegurar el éxito de la operación: la técnica, la ambiental y la económica. Cada uno de estos bloques, contiene elementos que pueden inclinar la balanza a favor de un determinado tipo de técnica [4].

2.5.1. Consideraciones de carácter técnico

Los firmes están integrados por diferentes capas de materiales cuya misión es transmitir las solicitaciones del tráfico que llegan a la superficie, a la explanada, de forma que ésta, que no tiene una gran capacidad portante, no sufra deformaciones plásticas. Cada una de las capas está definida por su espesor y la naturaleza del material que la forma, que le confiere un cierto comportamiento mecánico cuantificable a través de su módulo elástico.

Cabe recordar que estas capas funcionan principalmente de dos formas. Cuando son materiales granulares, la transferencia de cargas se realiza a través del esqueleto mineral de la capa. Con el tiempo, se produce una reordenación de las partículas minerales que se traduce en deformaciones en la superficie.

Cuando hablamos de materiales ligados, la capa funciona en su conjunto actuando (en mayor o menor grado) como una placa. Esto significa que en su parte superior moviliza una serie de compresiones horizontales y las correspondientes tracciones en su zona inferior. Estos materiales fallan por acumulación de ciclos de carga-descarga que fatigan el material dando lugar a fisuras que se transmiten de abajo a arriba.

Cuando nos enfrentamos a una rehabilitación es fundamental tener en cuenta lo anterior. Tendremos que identificar cuál es el espesor de cada una de las capas del firme y su naturaleza, qué tipo de explanada tenemos y qué tipo de fallo se ha producido.

Los fallos que proceden de los cimientos del firme (explanadas de mala calidad, deficiente capacidad portante, etc.), deben ser estudiados de manera particular. Sin embargo, cuando los fallos proceden de las capas superiores, el identificar la naturaleza de los mismos ayuda a determinar cuál es la solución más adecuada para su rehabilitación.

Además de la identificación de los materiales existentes, es muy importante que conozcamos sus condiciones de trabajo. Para ello debemos conocer con exactitud cuál es el tráfico que soporta la carretera en el momento presente y cuál es su evolución previsible (especialmente en lo que respecta a los vehículos pesados). No debemos de olvidar que estos proyectos tienen un periodo de diseño de 10 a 20 años. El análisis de las deflexiones nos aportará muchos datos para una mejor comprensión del comportamiento mecánico de las capas.

Por último, es importante señalar dentro de este capítulo la disponibilidad de materiales y equipos, así como las propias condiciones de la obra.

2.5.2. Consideraciones de carácter ambiental

Todavía hoy es frecuente que el diseño de las secciones de firme se realice en base a criterios estructurales a pesar de las diferentes condiciones ambientales. Las condiciones ambientales afectan a la carretera de tres maneras:

- La superficie del firme está expuesta al clima del lugar. Los ciclos térmicos y la radiación solar producen un envejecimiento y progresivo deterioro de la capa.
- La estructura del firme es muy sensible al ingreso de agua que se produce a través de las fisuras y grietas superficiales. Esta agua, en combinación con los mencionados efectos térmicos, puede tener un efecto totalmente destructivo para la carretera.
- Las condiciones medioambientales, que afectarán a la disponibilidad de nuevos áridos (explotación de canteras), posibles puntos de vertido, emisiones a la atmósfera, etc.

Todos estos factores se deben de tener en cuenta a la hora de considerar cuál es la solución más adecuada de rehabilitación.

2.5.3. Consideraciones de carácter económico

Es bien evidente que sienta este el bloque que se menciona en último lugar, es el que probablemente tenga una mayor peso específico a la hora de decantarse por una solución u otra.

En general, todas las propuestas que implican un proceso de reciclado son más económicas por cuestiones obvias. Sin embargo, en algunos casos, la comparación económica no es claramente favorable para el proceso de reciclado en sentido estricto. Aun en estos casos, el proceso de reciclado siempre es más económico en términos globales, si tenemos en cuenta todas las externalidades que se producen en muchos de los procedimientos convencionales.

2.6. Sistemática para la metodología de diseño

2.6.1. Datos de partida

La sistemática que se describe a continuación tiene lugar una vez que se ha determinado que la mejor opción de rehabilitación para la vía es un reciclado. Antes de llevarla a cabo, es preciso conocer:

- Periodo de proyecto.
- Tipo de reciclado.
- Tráfico.

- Historial del firme a reciclar.
- Geometría actual y futura de la vía.
- Posible aportación de materiales.
- Nivel de propiedades funcionales esperado.
- Presupuesto para la ejecución de los trabajos y la posterior conservación de la vía.
- Comportamiento del pavimento actual.
- Capa o capas a situar sobre el reciclado.
- Disponibilidad de materiales y equipos.
- Época en la que se ejecutarán los trabajos.

2.6.2. Reconocimiento del firme

a) Inspección visual

Se necesita llevar a cabo una inspección visual del pavimento existente, por parte de personas expertas y, a poder ser, en la época más adecuada del año (después de un periodo prolongado de lluvias, pero con el pavimento ya seco), tomando nota de lo siguiente:

- Tipo y gravedad de los deterioros distinguiendo entre superficiales, estructurales localizados y estructurales generalizados.
- Tramos que muestran similares tipos y niveles de deterioro.
- Zonas localizadas con deterioros importantes, que pueden necesitar un tratamiento específico.
- Tramos que han sufrido ya reparaciones.
- Tramos que requieren una regularización superficial.
- Problemas relacionados con la presencia de bordillos, arquetas, obras de fábrica, estructuras y accesos.
- Características y estado de los arcenes.
- Problemas relacionados con el drenaje.
- Trazado de la vía y relieve del terreno.
- Zonas donde se puedan estacionar los equipos de construcción.

Toda esta información se debe reflejar en unos esquemas de fácil consulta.

b) Auscultación

La auscultación de un firme es un proceso no destructivo que proporciona una información sobre la capacidad resistente de aquel. Básicamente, se aplica una sollicitación al firme, la cual simula las cargas del tráfico, y se mide la respuesta del firme ante ella. El análisis de esta respuesta puede proporcionar una valiosa información acerca de la calidad y estado de los componentes del firme, así como acerca de la presencia de problemas en la explanada.

El tratamiento de las deflexiones obtenidas se hace según se prescribe en la Orden Circular 9/2002 de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento. Se obtiene así una deflexión patrón.

Si el pavimento presenta roderas, se puede medir su profundidad, a intervalos regulares o, mejor, obteniendo su valor característico para cada uno de los tramos que presentan una deflexión uniforme.

La forma más habitual de medir los espesores de las distintas capas de firme es la obtención de probetas testigo por medio de una sonda rotatoria. Actualmente hay también unos equipos no destructivos y de alto rendimiento, como el georradar, capaces en teoría de determinar los espesores de capas que tengan unas características definidas (por ejemplo, ser bituminosas o granulares).

c) Toma de muestras

La fase de toma de muestras es crítica no sólo desde el punto de vista del reconocimiento de la sección del firme a reciclar sino como paso previo para establecer la estrategia de tramificaciones más adecuada para la ejecución de las obras. Además la caracterización de estos materiales nos adentra en la etapa siguiente, el diseño de la fórmula de trabajo.

La representación en un mismo diagrama del resultado de la inspección visual, de las auscultaciones y, si se dispone de él, del historial, proporciona una imagen más clara del estado del firme y permite asociarla a las zonas homogéneas que presentan un nivel similar de deterioro.

Para establecer el muestreo del firme, que son forzosamente puntuales, se tienen que hacer en unos puntos aleatoriamente determinados dentro de esas zonas aparentemente homogéneas. En los reciclados de las clases II y III (ver Tabla 2.1.), que afectan principalmente a capas bituminosas, suele bastar con sacar unos testigos, o mejor, fresar una parte de las capas superficiales, incluso con un equipo pequeño. Además de tomar nota de los espesores de las capas del firme encontradas, se deben obtener muestras separadas para cada capa, en una cantidad suficiente para realizar unos ensayos de identificación (granulometría y plasticidad, si son aplicables), de estado (humedad natural) y de resistencia.

2.6.3. Fórmula de trabajo

a) Control de materiales

Los ensayos a los materiales se tendrían que llevar a cabo sobre unos materiales ya sometidos a la acción de los equipos de disgregación. Sin embargo, es muy frecuente que las muestras extraídas del firme no estén disgregadas, esta circunstancia debe ser tenida en cuenta y, en la medida de lo posible, habría que estimar o simular en laboratorio los efectos de la futura disgregación, especialmente en la fase en la que se establezcan las fórmulas de proyecto.

Las muestras obtenidas se ensayan en laboratorio a fin de:

- Definir la naturaleza de la explanada.

- Definir las características de los materiales a reciclar en cuanto a granulometría, calidad del árido grueso, limpieza, compactibilidad, homogeneidad.

En los reciclados de las clases II y III hay que comprobar además las características del betún de las capas que se vayan a reciclar y especialmente el contenido de betún residual, consistencia (penetración), punto de reblandecimiento y en ocasiones su contenido de asfaltenos y viscosidad.

b) Criterios de selección del ligante (emulsión bituminosa)

El tipo de emulsión bituminosa más frecuentemente empleado en los reciclados in situ en frío es la ECL-2 o a veces la EAL-2, con una penetración del betún residual en torno a 200 décimas de milímetro.

Esta es la respuesta correcta desde el punto de vista de la asignación del tipo de emulsión adecuada para esta aplicación, pero como es bien sabido, no cualquier ECL-2 o EAL-2 responderá adecuadamente a los requerimientos que esta técnica impone. Empecemos por tanto, por repasar los requerimientos básicos:

- La emulsión debe ser compatible con la naturaleza y la granulometría de los materiales que se van a reciclar.
- La estabilidad de la emulsión debe permitir antes de la rotura un reparto lo más homogéneo posible del betún residual en la masa de dichos materiales.
- La toma de cohesión y las propiedades mecánicas finales de la mezcla deben ser las adecuadas para el tráfico durante la fase de ejecución y las sollicitaciones finales del firme.

c) Fórmulas de proyecto

La determinación de la fórmula de proyecto es la consecuencia de los ensayos realizados en el laboratorio, y las exigencias propias del trabajo a realizar. Para la determinación de la fórmula de proyecto es fundamental que los materiales sean lo más representativos posible, no sólo respecto de su procedencia, sino también del proceso de fresado al que van a ser sometidos.

Para conocer con exactitud qué efecto va a tener el fresado en las características de los materiales sobre los que va a actuar (disgregación de los que presenten cohesión, degradación de los materiales, etc.), es muy conveniente, antes de iniciar la rehabilitación propiamente dicha, realizar unos tramos de prueba con el equipo que se vaya a utilizar finalmente.

Hay una gran variación internacional sobre procedimientos para llegar a la fórmula de proyecto:

- Método del Instituto de Asfalto.
- Método Marshall Modificado para Emulsiones.
- Método de la Universidad de Illinois.

- Método de Probisa para mezclas densas en frío.
- Método de la Compañía Chevrom.
- Método de ensayo para la determinación del porcentaje y grado de agente reciclante para el uso en reciclado en frío.
- California Test 378.
- Método basado en el ensayo de inmersión-compresión (Normativa Española vigente O.C. 8/01).

Entre los métodos antes citados para establecer en laboratorio la fórmula de proyecto de las mezclas en frío y recicladas, algunos son contradictorios con la propia esencia del material, ya que llegan a calentarse las muestras a temperaturas muy superiores al punto de reblandecimiento del betún. Otros tienen métodos de drenaje de las probetas de discutible eficacia y paralelismo con la realidad.

2.7. Dimensionamiento de una sección reciclada con emulsión

El dimensionamiento de cualquier estructura y, en particular de los firmes, es siempre complejo. Esta afirmación es especialmente válida en el caso de las secciones recicladas, ya que el propio proceso de reciclado y la filosofía de esta técnica, aportan una cierta variabilidad en las capas así tratadas.

El fin último del proceso de dimensionamiento, una vez elegida la naturaleza de las capas que van a integrar la sección seleccionada es determinar el espesor de cada una de ellas. La tendencia más habitual suele ser acudir a catálogos de secciones que, en función normalmente del tráfico esperado y el nivel de deflexiones existentes, proporcionan los espesores buscados. Este camino permite simplificar el proceso para los no expertos, conjugando las bondades del cálculo analítico con la experiencia y racionalidad de lo que es constructivo y está sancionado por la experiencia.

Otra posibilidad es utilizar un procedimiento analítico de cálculo. Generalmente se utilizan los modelos de respuesta basados en el modelo elástico multicapa, complementado con un análisis del comportamiento a fatiga de la estructura. La dificultad principal radica en la determinación de los módulos de cada capa y de las correspondientes leyes de fatiga.

Para las capas recicladas con emulsión, es frecuente admitir un módulo (que está del lado de la seguridad) de 2.500 MPa. Sin embargo, este módulo penaliza mucho el comportamiento de la capa reciclada. En algunos casos, tanto es así, que por ser menor el módulo atribuido al reciclado que el de la mezcla bituminosa que actualiza, cuanto mayor es el espesor reciclado menos ejes soporta la sección en cuestión. De la experiencia se desprende que los módulos alcanzados con este tipo de mezclas, después de completado su periodo de curado, pueden llegar sin problemas a los 4.000 MPa.

FICHA I

TIPO DE FIRME EXISTENTE:
Flexible o semirígida

TÉCNICA DE RECICLADO EN FRÍO:
Con emulsión bituminosa

PERÍODO DE PROYECTO:
15 años¹

ESPESORES² DEL RECICLADO Y DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS DEL RECRECIMIENTO³

d _c (10 ² mm)	CATEGORÍA DEL TRÁFICO PESADO								
	T0	T1	T21	T22	T31	T32	T41	T42	T43
60-80	8+6	6+6	5+5	4+4					
80-100	10+7	8+6	6+6	5+5	4+4				
100-125	12+10	10+7	8+6	6+6	5+5	4+4			
125-150	12+12	12+10	10+7	8+6	6+6	6+4	5+TS	5+TS	
150-200	15+15	12+12	12+10	10+7	8+6	6+5	6+TS	5+TS	5+TS
200-300		15+15	15+11	12+10	10+6	8+6	8+TS	6+TS	6+TS

OPCIÓN A: MÍNIMO ESPESOR DE RECICLADO Y MÁXIMO DE RECRECIMIENTO

¹ Si tras de firmes que no tienen capas tratadas con conglomerantes hidráulicos. La diferencia entre ellos está en el espesor total de las mezclas bituminosas (menos o más de 12 cm)

² Si se quiere proyectar para un periodo de 20 años, se aumentará en un escalón la subcategoría de tráfico considerada, excepto si se partiera de una categoría T0, que se mantendrá. Si se quiere proyectar para un periodo de 10 años, se disminuirá en un escalón la subcategoría de tráfico considerada, excepto si se partiera de una subcategoría T43, que se mantendrá.

³ En todos los casos, el primer sumando indica el espesor mínimo del reciclado y el segundo sumando indica el espesor mínimo de las mezclas bituminosas del recrecimiento.

⁴ Para categorías de tráfico T32 o inferiores el recrecimiento con mezcla bituminosa se hará preferentemente con una mezcla bituminosa abierta en frío, sellada con una lechada bituminosa LB 3.

Guía para el dimensionamiento de firmes reciclados in situ en frío
Miguel Ángel de Val / Sandro Rocci
Mayo de 1998

Figura 2.1. Ficha tipo del catálogo de soluciones estructurales (Fuente: Guía Probisa)

En el caso de los reciclado en frío 'in situ' el dimensionamiento se convierte en una cuestión aun más compleja ya que existe una casi generalizada ausencia de normativa al respecto. Preocupada por esta situación, Probisa publicó en mayo de 1998 su *Guía para el dimensionamiento de firmes reciclados in situ en frío* [5] con ayuda de los profesores de la Universidad Politécnica de Madrid Miguel Ángel de Val y Sandro Rocci. Para elaborar las soluciones que recoge la Guía, se han empleado criterios empíricos y de cálculo por diferentes motivos:

- La modelización estructural es siempre una abstracción de la realidad, y por tanto, es necesaria la experiencia para llegar a las soluciones más adecuadas, aunque a menudo sea por tanteo.
- La variabilidad de los materiales reciclados es grande, por lo que es difícil su modelización.
- La experiencia acumulada no está aún demasiado consolidada, por lo que parece conveniente acotar las soluciones a una gama estructuralmente válida.

La presentación de las soluciones es también análoga a la utilizada en los catálogos de secciones estructurales con que trabajamos habitualmente. Se compone de ocho fichas que dependen de la naturaleza del firme existente y el tipo de reciclado a utilizar (emulsión o cemento). En la tabla 2.1. se muestra la

clasificación utilizada para los reciclados y en la Figura 2.1. una ficha tipo del mencionado catálogo de Probisa.

CLASE	I	II	III
DOSIFICACIÓN DE LIGANTE	4 - 7%	3 - 5%	2 - 4%
FIRME QUE SE RECICLA	Pavimento bituminoso (<5cm) + base granular	Pavimento bituminoso (<10cm) + base	Mezclas bituminosas
ESPESOR RECICLADO (cm)	8 - 15	8 - 15	5 - 15
OBJETIVOS	Estabilización y regularización del firme		Reciclado y regeneración del ligante existente

Tabla 2.1. Tipología de los RFSE (Fuente: Revista Carreteras núm. 124)

2.8. Ejecución de la obra. Equipos específicos

El reciclado 'in situ' en frío se puede llevar a cabo en principio con equipos muy diversos. Para cada una de las fases del proceso hay una o varias máquinas de uso múltiple a las que cabe recurrir. En general, las operaciones de reciclado en frío 'in situ' con emulsiones bituminosas pueden consistir en:

- Fresado en frío del pavimento.
- Adición de nueva mezcla bituminosa.
- Adición de nuevo asfalto o agente regenerador.
- Mezclado.
- Extendido.
- Aireación.
- Compactación.
- Curado.
- Aplicación de una capa de recubrimiento.

Como ya hemos comentado, algunas de estas operaciones pueden combinarse en una sola máquina u operación, mientras que otras pueden no ser necesarias

en algunos proyectos. En la figura 2.2 podemos observar la secuencia habitual de un tren de reciclado [6]:

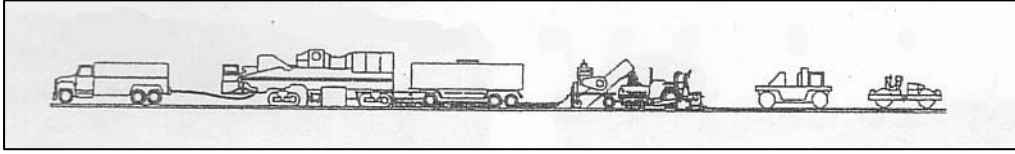


Figura 2.2. Secuencia habitual de un proceso de reciclado (Fuente: Transportation Research Record núm. 1545)

La Normativa Española establece que [3], salvo justificación contraria, para las carreteras de tráfico pesado T1 o T2 o cuando la superficie a tratar sea superior a los 70.000 m² será preceptivo el empleo de equipos que integren en una sola máquina las operaciones de fresado, de dosificación y de distribución de la emulsión, de mezcla y extensión.

Establece también que el equipo de fresado, compuesto por una o más máquinas fresadoras, con anchura mínima de medio carril y dotadas de rotor de fresado de eje horizontal, deberá ser capaz de fresar el firme existente en la profundidad y anchura especificadas, produciendo un material homogéneo con la granulometría requerida en una sola pasada y deberá hacerlo a una velocidad constante adecuada. Las fresadoras estarán dotadas de un dispositivo de control automático que asegure el espesor especificado. Además estarán provistas de un dispositivo que evite el levantamiento en bloques del material.

En cuanto al equipo de dosificación de la emulsión bituminosa y del agua y los aditivos, se compondrá de depósitos, bombas de caudal variable y difusores adecuadamente dispuestos, con control automático programable de dosificación, que permita realizar las dosificaciones de la fórmula de trabajo correspondiente, según la profundidad y anchura del material fresado que se vaya a reciclar, y según la velocidad de avance de la máquina.

El mezclador deberá garantizar una mezcla homogénea y uniforme en toda la anchura y profundidad de reciclado. La mezcla podrá realizarse mediante una mezcladora independiente o bien en las propias máquinas fresadoras aprovechando la energía del rotor de fresado, en cuyo caso el sistema de dosificación deberá ir incorporado al elemento de fresado.

El suministro de la emulsión y del agua a la unidad de mezcla se realizará desde cubas o depósitos móviles, de modo que no se produzcan paradas de los elementos de mezcla y extensión del material reciclado.

Se deberá evitar la segregación del material mezclado y se realizará una extensión y precompactación homogéneas y con el perfil deseado, mediante una maestra de extensión con dispositivos de nivelación automáticos.

Para dar unos ejemplos de la maquinaria actualmente existente, presentaremos dos de los equipos que actualmente se utilizan y comentaremos sus características técnicas así como sus configuraciones de trabajo más habituales en función de los trabajos a realizar [4]:

· Wirtgen 2100 DCR

Se trata de una máquina de gran rendimiento adaptada fundamentalmente a los reciclados, aunque eventualmente se puede utilizar para trabajos de estabilización (ver Foto 2.1). Por contar con regla de extendido, esta máquina permite llevar a cabo trabajos de gran calidad en lo que a regularidad y homogeneidad del material reciclado extendido se refiere.

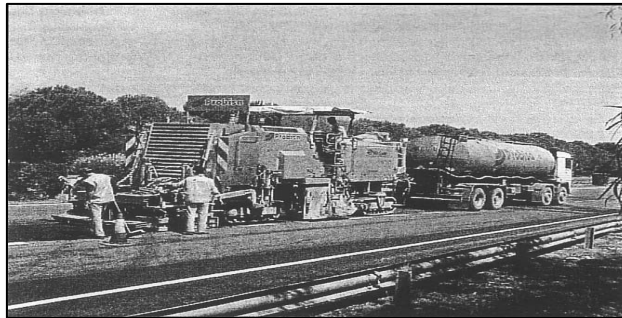


Foto 2.1. Equipo de reciclado W-2100 DCR trabajando en obra (Fuente:Revista Carreteras)

El campo de actividad en el que se aprovechan mejor sus cualidades, es el de los reciclados con emulsión en capas de espesores moderados (hasta 15 cm), ya que generalmente se buscan capas de base de características geométricas y mecánicas muy exigentes.

La 2100 DCR puede fresar al mismo tiempo las capas de aglomerado existentes y la base granular inferior, mezclando simultáneamente estos materiales con el nuevo ligante. Su motor, de 610 CV de potencia, le permite trabajar con espesores prácticos hasta 22 cm en un ancho de 200 cm.

Esta máquina cuenta entre otras con las siguientes prestaciones:

- Regulación automática de potencia.
- Instalación combinada de rociado con agua y ligante con equipo de dosificación, asistido por microprocesador, que regular mediante una bomba volumétrica la cantidad de agua y ligante a utilizar en función del ancho y profundidad del fresado.
- Sistema electrónico de nivelación longitudinal y sensor electrónico de nivelación transversal.
- Dispositivo regulable para el extendido del material reciclado entre 2 y 3 m con equipo de vibración y compactación.

Dependiendo del tipo de reciclado, se utiliza una de estas tres configuraciones de trabajo:

- Cisterna de emulsión + W-2100-DCR + Compactador metálico + Compactador de neumáticos.

- Esparcidor de pulverulentos + W-2100-DCR + Compactador metálico + Compactador de neumáticos.
- WM-400 + W-2100-DCR + Compactador metálico + Compactador de neumáticos.

En todos los casos, se puede aportar el agua mediante una cuba conectada mediante mangueras a la máquina al frente del tren de reciclado, o llenando esporádicamente el depósito de 4.000 litros de la misma.

· **Wirtgen WR-2500**

La WR-2500 es una máquina de gran rendimiento especialmente versátil. Se adapta a los reciclados con cemento y emulsión y a las estabilizaciones a gran profundidad (ver Foto 2.2). No tiene regla de extendido, por lo que el material reciclado y/o estabilizado se suele extender y nivelar con ayuda de una motoniveladora.

Trabaja en un ancho de 250 cm y puede llegar a profundidades de 50 cm. Es una máquina de gran maniobrabilidad, ya que se mueve sobre grandes neumáticos motrices orientables.



Foto 2.2. Equipo WR-2500 trabajando en carretera (Fuente: Revista Carreteras)

Entre otras, cuenta con las siguientes prestaciones:

- Regulación automática de potencia.
- Instalación combinada de rociado con agua, ligante y lechada de cemento o cal, mediante dos rampas independientes de 16 inyectores cada una.
- Sistema electrónico de nivelación longitudinal y de nivelación transversal.

Las configuraciones clásicas de trabajo con esta máquina son las siguientes (ver foto 2.3):

- WM-1000 + WR-2500 + Compactador doble metálico + motoniveladora + Compactador de neumáticos.

- Cisterna de emulsión + WR-2500 + Compactador doble metálico + motoniveladora + Compactador de neumáticos.
 - Cisterna de emulsión + WM-1000 + WR-2500 + Compactador doble metálico + motoniveladora + Compactador de neumáticos.
-



Foto 2.3. Vista de un equipo mezclador WM 1000 delante de una WR-2500
(Fuente: Revista Carreteras)

· **WM-400 y WM-1000**

Son elementos auxiliares en el proceso de reciclado. Estas máquinas son básicamente mezcladores de agua-cemento o agua-cal (ver Foto 2.3)

La dosificación de agua se realiza volumétricamente mediante una bomba de desplazamiento positivo. El cemento se dosifica mediante pesada de alta precisión.

La proporción agua/cemento se fija y controla mediante un ordenador que regula la cantidad de lechada de cemento (o de cal) a proporcionar en el reciclado en función de los parámetros del mismo (velocidad, profundidad, densidad, anchura, etc.)

· **Equipos de compactación**

Todos los compactadores deben ser autopropulsados, tener inversores del sentido de la marcha de acción suave y estar dotados de dispositivos para mantenerlos húmedos en caso necesario [3].

La composición del equipo de compactación se determinará en el tramo de prueba, y deberá estar compuesto como mínimo por un compactador vibratorio de rodillo metálico y un compactador de neumáticos.

El compactador vibratorio dispondrá de un rodillo metálico con una carga estática sobre la generatriz no inferior a 300 N/cm y capaz de alcanzar una masa de al menos 15 toneladas con amplitudes y frecuencias de vibración adecuadas. El compactador de neumáticos será capaz de alcanzar una masa de al menos 35 toneladas y una carga por rueda de 5 toneladas, con una presión de inflado que pueda alcanzar al menos 0,8 MPa.

La compactación es una operación siempre delicada, especialmente si el espesor es grande. La humedad del material extendido no siempre coincide con la óptima de compactación: si fuera excesiva puede que haya que esperar algún tiempo a que se seque el material.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que, debido a la menor densidad del material una vez reciclado (sobre todo en los reciclados con emulsión), la superficie del material compactado va a quedar por encima de la rasante original, del orden de un 10% del espesor reciclado.

El tren de compactación habitual de una capa reciclada (ver foto 2.4) suele estar formado por:

- Un rodillo vibrante pesado, el cual hace que el material extendido y refinado termine por encajarse en el hueco abierto por el fresado.
- Y un rodillo de neumáticos también pesado que, con baja presión de inflado, compacta el fondo de la capa reciclada y, con alta presión, ayuda a la eliminación del agua y cierra la superficie.



Foto 2.4. Equipos de compactación de una capa reciclada (Fuente: Revista Carreteras)
