





RECICLADO DE FIRMES
IN SITU CON CEMENTO

IECA
INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO Y SUS APLICACIONES

anter
ASOCIACIÓN NACIONAL TÉCNICA DE ESTABILIZADOS DE SUELOS Y RECICLADO DE FIRMES

Este Manual fue redactado a finales de 2018 por Jesús Díaz Minguela y Miguel López Bachiller
y revisado por los socios de ANTER
(Daniel Andaluz, David G. Cuenca, David Martín, José María Merino, Joaquín Moran, Hernán Reino y Ángel Sampedro)
además de los técnicos de IECA
(César Bartolomé, Sergio Carrascón, Ricardo L. Perona, Rafael Rueda e Iñaki Zabala).

MANUAL DE FIRMES RECICLADOS IN SITU CON CEMENTO **EDICIÓN REVISADA**
DEPÓSITO LEGAL: M-4802-2019
ISBN: 978-84-89702-29-5

RECICLADO DE FIRMES
IN SITU CON CEMENTO

IECA
INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO Y SUS APLICACIONES

anter
ASOCIACIÓN NACIONAL TÉCNICA DE ESTABILIZADOS DE SUELOS Y RECICLADO DE FIRMES

Este Manual fue redactado a finales de 2018 por Jesús Díaz Minguela y Miguel López Bachiller
y revisado por los socios de ANTER
(Daniel Andaluz, David G. Cuenca, David Martín, José María Merino, Joaquín Moran, Hernán Reino y Ángel Sampedro)
además de los técnicos de IECA
(César Bartolomé, Sergio Carrascón, Ricardo L. Perona, Rafael Rueda e Iñaki Zabala).

ÍNDICE

1. Introducción....7
   1.1. Definición....7
   1.2. Desarrollo Histórico....8
   1.3. Objetivos del reciclado....11
   1.4. Tipos de reciclado....12
   1.5. Ventajas y limitaciones de las técnicas de reciclado....19
   1.6. Empleo de este manual. Elección de un reciclado como rehabilitación....26
2. Estudios previos....28
   2.1. Introducción....28
   2.2.Viabilidad del reciclado....28
3. Definición del reciclado....38
4. Características mecánicas de los materiales reciclados con cemento....40
5. Determinación de la fórmula de trabajo....43
6. Dimensionamiento de la rehabilitación de un firme existente mediante reciclado in situ con cemento....50
7. Equipos para la realización de obras de reciclado....56
   7.1. Introducción....56
   7.2. Descripción de algunos equipos....58
8. Realización de las obras....70
   8.1. Proceso de realización....70
   8.2. Realización de las obras....72
   8.3. Aspectos a cuidar en un reciclado....89
9. Control de calidad....102
   9.1. Introducción....102
   9.2. Controles durante la realización de las obras....102
   9.3. Controles sobre la capa terminada....107
10. Estudio de costes....111
   10.1. Introducción....111
   10.2. Coste de realización de una capa reciclada....112
   10.3. Comparativa de costes entre secciones reforzadas y recicladas....118

Anejo 1. Propuesta de Proyecto de Reciclado in situ con cemento de una carretera....121
Anejo 2. Análisis tensional de firmes reciclados in situ con cemento....143
Anejo 3. Realización de juntas en fresco....148
Anejo 4. Procedimiento específico para medir la densidad a lograr en obra para materiales reciclados in situ....161
Anejo 5. Fichas de obras recicladas con cemento....165
Anejo 6. Bibliografía y Referencias....263

PRESENTACIÓN

El reciclado de firmes in situ con cemento es una técnica de rehabilitación que data de los años 90 y que se mantendrá siempre actual gracias a sus importantes ventajas tanto técnicas, entre las que destaca la homogenización de una carretera logrando una capa que recupera e incluso supera la capacidad estructural inicial, como las ventajas medioambientales, destacando la reutilización de los áridos existentes que permite no utilizar los yacimientos y vertederos, lo que se traduce todo en importantes ventajas económicas, puesto que la reutilización de los materiales supone un importante ahorro.

Es una práctica habitual en muchos países europeos de rehabilitación de carreteras que abarca la reparación de los firmes deteriorados, tanto los denominados flexibles (con mezclas bituminosas sobre una capa granular de zahorra machacada o macadam), como los semiflexibles (con mayor capa bituminosa) o semirrígidos (con capa de base de materiales que se trataron con cemento).

Esta práctica se realiza con equipos rápidos que proceden a un correcto mezclado del cemento con los materiales existentes en la carretera (normalmente un material granular con ciertos finos bituminosos) y que permite llegar a profundidades superiores a las que es posible densificar, logrando así materiales suficientemente flexibles (con módulos de rigidez inferiores a los de una base tratada con cemento) pero suficientemente rígidos en su conjunto para lograr una carretera que dotada de una rodadura cómoda y segura tenga un comportamiento correcto con el paso de los años, el tráfico circulante y el clima existente en la región.

Este Manual, actualización del que fue redactado en el año 1999 por los profesores Jofré, Kraemer y Diaz Minguela, pretende ser un documento de apoyo a los proyectistas y constructores de este tipo de carreteras recicladas, en el que se incluye, en castellano, todos los parámetros relacionados con la técnica.

Así, tras un primer capítulo introductorio en el que se abarca el desarrollo histórico en España, los objetivos que se persiguen con el reciclado con cemento de la carretera, los tipos posibles de reciclado y las ventajas y limitaciones de esta técnica, se analiza la misma detalladamente. Una vez definidos los estudios previos y el reciclado en sí, se analizan las características mecánicas de los materiales diferenciando entre dos tipos de reciclados bien se obtenga una resistencia a compresión mínima del material a 7 días de 2,5 MPa o 3,5 MPa.

Tras un dimensionamiento sencillo que se ofrece basado en un catálogo que tiene en consideración la intensidad del tráfico pesado que circulará por la carretera y las características de la capa de apoyo, se analizan todos los pasos de realización de las obras con los equipos adecuados y su control, incluyendo un capítulo sobre costes en el que se indica lo oneroso que puede resultar hacer las obras con ciertos defectos.

El sistema de prefisuración utilizado en Europa se inició en Alemania a finales de los años 80, aunque fue Francia quien lo registró primera como una actividad estandarizada en las obras. Para ello, se han desarrollado equipos con potencia y peso suficientes que pueden realizar un corte que afecta a gran parte del espesor de la capa y que al mismo tiempo efectúan algún tipo de tratamiento, para evitar que se

vuelvan a adherir las caras de la junta y conseguir que se abran todas las fisuras marcadas previamente, además de que se mantenga también una buena trabazón entre las losas generadas en la capa y, por lo tanto, una transferencia de carga satisfactoria. En el anejo nº3 se incluye con detalle cómo realizar y los equipos para esta prefisuración o realización de juntas en fresco.

Además, se incluyen otros 5 anejos entre los que figura el análisis tensional por si se quiere dimensionar el reciclado de acuerdo a ciertos parámetros obtenidos para una carretera reciclada en una universidad española (al menos, ley de fatiga y módulo) y que han servido de base para calcular las secciones dispuestas en el citado catálogo del capítulo 6, una propuesta de cómo realizar un proyecto de reciclado in situ con cemento de una carretera (incluyendo los cuatro documentos necesarios en España: memoria y anejos, planos, pliego de condiciones y presupuesto), un procedimiento empleado para medir la densidad a lograr en obra para estos materiales y, junto a la bibliografía empleada y de consulta, un gran número de fichas de obras reciclados in situ en todo el territorio español.

La ausencia de necesidad de áridos y el coste de su transporte, junto al deterioro de las carreteras o caminos adyacentes que ese transporte suele provocar son algunas de los principios básicos que hacen que esta técnica tenga una alta proyección. A esto se suma, sin duda, la elevada rapidez de realización y el permitir aplicar dicha técnica sin necesidad de cerrar la carretera al tráfico.



Los autores agradecen, además de los socios incluidos en IECA o ANTER, las valiosas aportaciones recibidas para la redacción de las fichas de obras incluidas en este Manual que esperamos sirvan de base y apoyo a todos aquellos técnicos interesados y relacionados en alguna manera con la solución de reciclado in situ con cemento de una carretera.

Miguel López Bachiller
Presidente de ANTER

Jesús Díaz Minguela
Director IECA Tecnología

1 INTRODUCCIÓN

1.1. DEFINICIÓN

El reciclado es una técnica de rehabilitación cuyo objetivo fundamental es transformar un firme degradado en una estructura homogénea y adaptada al tráfico que debe soportar. Más concretamente, consiste en reutilizar sus materiales para la construcción de una nueva capa mediante la disgregación de estos en una cierta profundidad, la adición de un conglomerante (en la mayor parte de los casos en España se emplea cemento o emulsión bituminosa), agua (para la hidratación, envuelta y compactación), eventualmente áridos (como correctores granulométricos o con otros fines) y algún aditivo, de acuerdo con una proporción obtenida previamente mediante ensayos. La mezcla homogénea de estos materiales se extiende, compacta y cura adecuadamente, constituyendo una base o capa que asume la mayor resistencia estructural del nuevo firme.





Figuras 1.1 y 1.2.- Reciclado de carreteras fisuradas y deterioradas

Así, el reciclado de acuerdo con la clasificación por el lugar donde se realiza, se puede efectuar en central o in situ, y de acuerdo con la clasificación por temperatura, se puede realizar en frio o en caliente, dedicando este manual a la aplicación del reciclado en frio e in situ, que resulta la técnica más empleada, con la idea de que sirva como referencia práctica para los técnicos dedicados a la conservación de carreteras y todo tipo de viales y plataformas con tráfico rodado.

Sobre esta capa, siempre que vaya a circular el tráfico, se aplica un tratamiento superficial de protección durante las obras, y después una rodadura bituminosa, en una o varias capas, para asegurar la funcionalidad del firme (comodidad y seguridad altas velocidades).

El campo de aplicación es muy amplio, abarcando todo tipo de carreteras, desde autovías a calles, viales urbanos o vías secundarias, y de superficies pavimentadas, como por ejemplo las existentes en puertos, aeropuertos o polígonos industriales.

El reciclado es por tanto una técnica de rehabilitación de firmes de gran interés técnico y económico.

1.2. DESARROLLO HISTÓRICO

Siempre se ha concedido una gran importancia al diseño estructural de los firmes de carreteras con objeto de dotarles de una adecuada capacidad para soportar las cargas previstas de tráfico durante un periodo largo, en buen estado y sin incurrir en reparaciones importantes. La composición y la resistencia de la capa de base son tan importantes a este respecto como la calidad de la capa de rodadura. En este sentido, la aparición de las bases tratadas supuso un gran avance, puesto que con su empleo se evitaron muchos de los problemas ocasionados por las bases granulares, además de permitir cierta reducción del espesor de las mezclas bituminosas dispuestas encima y con ello cierta economía. Buscando nuevos procedimientos para mejorar su capacidad estructural y que permitieran al mismo tiempo abaratar costes y reducir el empleo de nuevos materiales, se empezaron a reutilizar y mejorar los del firme ya existente mediante la disgregación de este y la adición de un conglomerante o ligante.

Un primer precedente del empleo de las técnicas de reciclado se dio después de la Segunda Guerra Mundial, cuando para reparar las carreteras secundarias afectadas por la misma se puso en práctica en el Reino Unido un procedimiento llamado "Retread Process" o proceso de recauchutado.

Consistía en escarificar el firme, añadir en caso necesario una pequeña cantidad de árido y mezclar in situ el material escarificado con el aportado con ayuda de una motoniveladora o una grada de discos. A continuación, se regaba con una emulsión bituminosa de bajo contenido de ligante, e inmediatamente se procedía al mezclado con gradas de discos. El primer día sólo se "planchaba" el material mezclado, puesto que tenía mucha agua, y al día siguiente se terminaba la compactación. Era un procedimiento muy simple pero cuando se ejecutaba correctamente daba unos resultados aceptables.

Desde mediados de los años 80, la opción del reciclado in situ con adición de cemento para el acondicionamiento de carreteras ha resurgido con fuerza y se ha desarrollado con un éxito notable, debido principalmente a varios factores:

- Un mejor conocimiento de las características mecánicas de los materiales tratados con cemento y del comportamiento de los firmes semirrígidos.

- El empleo de nuevos equipos de mayor potencia, rendimiento y profundidad de trabajo, y que proporcionan además una mayor calidad del producto final
- La creciente conciencia ecológica, que ha impulsado esta técnica por los beneficios medioambientales que aporta ante el agotamiento de los yacimientos de áridos existentes y la dificultad de abrir nuevas explotaciones.
- La omisión del transporte de áridos reduce o elimina el paso por las carreteras vecinas (se evitan vertidos, emisiones, daños a estos caminos, daños colaterales a la flora y la fauna, etc.).

En la actualidad, el reciclado in situ con cemento es una técnica muy utilizada en países como Estados Unidos, Australia, Alemania, Francia o en el mismo España. En este último país se reciclan anualmente con cemento casi un millón de metros cuadrados.

En Alemania, la preocupación por los temas medioambientales provocó que se hubiera impuesto como técnica obligatoria el reciclado de firmes para poder cumplir las directrices del Gobierno Federal para evitar, reducir y reutilizar escombros y residuos asfálticos.

En lo que respecta a España, el reciclado de firmes in situ comenzó a aplicarse a principios de los años 80 a pavimentos bituminosos deformados. Se empleó la técnica del reciclado en caliente, con varios inconvenientes y con resultados poco satisfactorios, por lo que dicho método se abandonó hasta recientemente con un pequeño salto en 1995 cuando se volvió a utilizar en la autopista vasco-aragonesa.



Figuras 1.3 a 1.5.- Reciclado de diferente tipo de carreteras

Como consecuencia de esos problemas no resueltos en los años 80, a partir de 1991 empezaron a considerarse las técnicas de reciclado en frío, tanto con emulsión como con cemento.

La primera rehabilitación con cemento se realizó en una longitud algo superior a 12 km en la N-431, entre las localidades de Huelva y Cartaya con un equipo francés alquilado. Dicha

obra lleva en servicio desde principios del año 1992, habiendo recibido algún refuerzo por el intenso tráfico pesado que soporta esta carretera y del escaso espesor de mezcla bituminosa (6 cm) dispuesto sobre la capa reciclada. Hasta ese momento, el comportamiento de estos 100.000 m2 se puede considerar como bueno.

El segundo ejemplo se puede encontrar en la obra de Villabrágima - Villagarcía de Campos (C-519 en Valladolid, 1994) como obra exposición de un congreso nacional de firmes.

Otra obra relevante es un conjunto de cuatro tramos con una longitud total de 30 km de la N-630, entre la localidad de Cañaveral, en la provincia de Cáceres, y el límite de dicha provincia con Salamanca. Aunque lleva en servicio desde la primavera de 1995, el tráfico, muy intenso y pesado entonces, se ha visto muy reducido con la apertura en paralelo de la autovía Ruta de la Plata.

En esos años se incrementó el interés y las obras de reciclado de firmes, particularmente en Castilla y León y Andalucía, hasta el punto de que el IV Congreso Nacional de Firmes, celebrado en junio de 1998 en Segovia, se dedicó monográficamente a este tema.

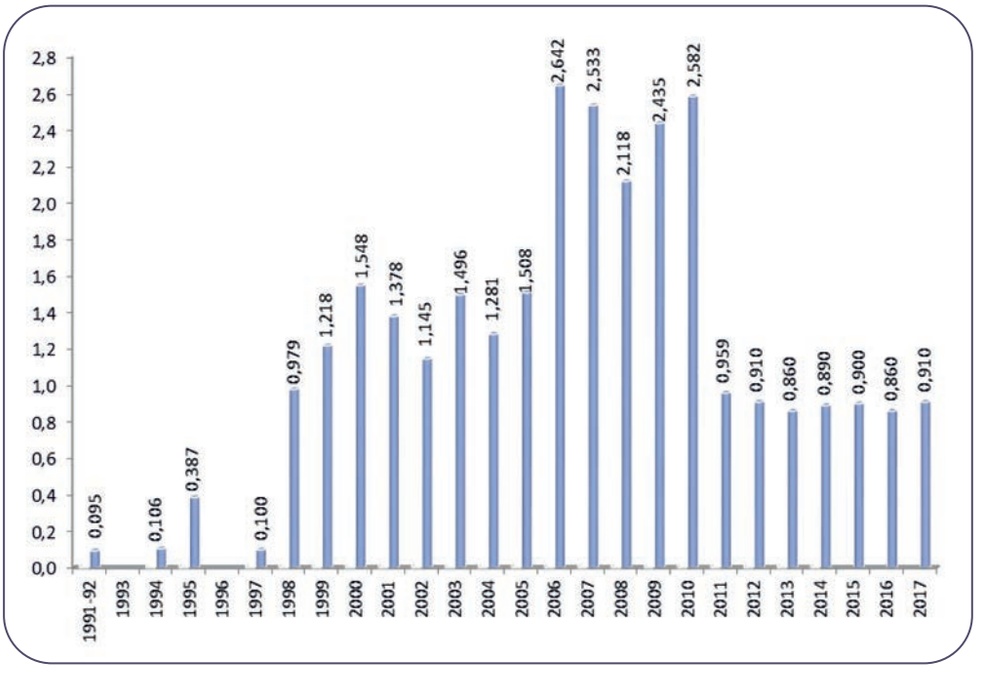


Figura 1.6. Estadística de superficie reciclada en España (en millones de m²)

Tras un pequeño salto en los que se diseñan otras nuevas actuaciones, el número de carreteras rehabilitadas mediante la técnica del reciclado in situ con cemento ha ido creciendo de forma considerable, sobre todo a partir del año 1998 (tras dicho congreso que provocó la sensibilidad medioambiental) y sobre todo hasta el 2010, años en los que se llega a reciclar en España más de 2,5 millones de m2 de carreteras al año como se puede ver en la tabla adjunta estadística.



Figura 1.7.- Reciclado de una superficie en un puerto

Estas actuaciones abarcan todo tipo de aplicaciones desde carreteras, que cubre un amplio abanico que va desde simples caminos, viales urbanos o vías secundarias hasta autopistas, a todo tipo de superficies pavimentadas, como por ejemplo las recicladas recientemente en varios puertos, en los aeropuertos o polígonos industriales (donde el rendimiento se reduce debido a la existencia de tuberías y arquetas).

Esto hace una superficie total de carreteras recicladas in situ con cemento hasta enero de 2018 en toda España de unos 30 millones de metros cuadrados, lo que supone aproximadamente 4.130 km de carreteras recicladas de todo tipo de ancho.

1.3. OBJETIVOS DEL RECICLADO

El objetivo fundamental del reciclado de un firme es mejorar sus características y comportamiento bajo tráfico. Específicamente, se pueden enumerar los siguientes objetivos parciales:

- transformación de un firme degradado y heterogéneo en una estructura resistente y más homogénea
- incremento de la capacidad de soporte, adaptándola a las solicitaciones del tráfico
- incremento de la durabilidad, y con ello, reducción de la susceptibilidad al agua e incremento de la resistencia a la erosión
- protección de la explanada y de las capas inferiores del firme, cuyas características son a veces deficientes.

El procedimiento del reciclado compite con la técnica clásica de rehabilitación mediante el refuerzo del pavimento existente con mezclas bituminosas, gravacemento u hormigón. Ambos métodos tienen los mismos objetivos de incrementar la capacidad estructural del firme, pero el reciclado aprovecha los materiales existentes y evita obtener una sección transversal más estrecha en aquellos casos en los que hubiera que recrecer con varias capas.

No debemos olvidar que el mayor tesoro que un determinado país tiene, como suministro o yacimiento de áridos sin repercusiones medioambientales, es sin duda su red de carreteras.

Una ventaja particular del reciclado en frío in situ es que no requiere transportar los materiales a una central de fabricación, ni el montaje o los permisos para montar esta última. Se puede considerar como una estabilización con un suelo de mayor calidad granulométrica, ya que al material existente se le añade un conglomerante que cambia las características físicas y químicas de la mezcla.





Figuras 1.8 y 1.9.- Compactación del material reciclado

1.4. TIPOS DE RECICLADO

El reciclado de firmes es una técnica íntimamente ligada al concepto de sostenibilidad. A todas las ventajas medioambientales derivadas del aprovechamiento de los áridos existentes, ya que evita la apertura de graveras o la sobreexplotación de las actuales y suprime el empleo de vertederos, se suman importantes beneficios técnicos y económicos. Los distintos tipos se pueden distinguir por las siguientes condiciones:

a) Por el lugar donde se lleva a cabo la mezcla

1. In situ (que resulta ser el objetivo de este manual)

La mezcla del material disgregado con el aglomerante o conglomerante tiene lugar en la propia carretera.

En este método se emplea fundamentalmente el material del firme existente, a veces con incorporación previa de una pequeña proporción de áridos para mejorar la rasante, tapar algunos baches excesivamente profundos o subir la cota para que al reciclar el espesor resultante no se contamine con materiales excesivamente plásticos de la parte inferior. El ligante se incorpora al mezclado directamente en forma líquida o fluida (lechada agua-cemento) o bien se extiende sobre la superficie del firme mediante equipos repartidores adecuados en forma de polvo (la distribución manual solamente es admisible en obras de escasa importancia) y luego se mezcla enérgicamente con él. El agua, si es necesaria, se añade normalmente durante el proceso de mezcla (conectando la cuba al equipo de reciclado), aunque lo aconsejable es la adición simultánea de agua y cemento en forma de lechada (pudiendo variar la cantidad aportada de agua según las necesidades). También es posible utilizar otros conglomerantes como emulsión bituminosa o betún espumado, o combinaciones de éstos con cemento. Finalmente se procede a la nivelación y a la compactación final.

2. En planta

El material escarificado o fresado se transporta a los acopios que suelen estar en la planta, se procesa para obtener una granulometría adecuada y se lleva a fabricación, donde se emplea como árido de una nueva mezcla con cemento o mezcla bituminosa. Las centrales pueden ser continuas o discontinuas aunque requieren cierta adaptación para incorporar el material fresado sin llegar a quemar el betún residual.

A continuación, el material reciclado se transporta al punto de colocación, donde se extiende por métodos mecánicos (igual que cualquier mezcla bituminosa). Finalmente, se compacta y termina de la misma forma que en el método anterior.





Figuras 1.10 y 1.11.- Reciclado in situ y en planta

b) Por la temperatura de la mezcla

1. En frío (que resulta ser el objetivo de este manual)

El reciclado en frío, sin calentar los materiales del firme existente, puede realizarse en una planta, donde se recupera el material fresado añadiendo emulsión, o bien in situ, donde los equipos disponibles van levantando la carretera existente y añadiendo el conglomerante para lograr la capa que tendrá el protagonismo estructural.

2. En caliente

En este caso, el material disgregado se mezcla en caliente con betún asfáltico y una proporción de áridos de aportación para la corrección granulométrica. Se suele realizar en planta (para evitar equipos excesivamente voluminosos difíciles de transportar y de resultado discutible).

Si se realiza in situ, estos equipos especiales de calentamiento elevan la temperatura del pavimento y facilitan su disgregación y mezcla. La aplicación en caliente in situ ha sido aplicado en muy pocas obras, siendo lo más común su aplicación en central.





Figuras 1.12 y 1.13.- Reciclado en frio y en caliente

c) Por las características del material a reciclar

1. Una capa relativamente homogénea (por ejemplo, una capa granular recubierta o no de un tratamiento superficial)
2. Dos o más capas de diferentes materiales (por ejemplo, una capa granular recubierta por un espesor importante de mezclas bituminosas)

Como un caso especial, puede mencionarse algunas capas con falta de finos (por ejemplo, bases de macadam mal recebados o sin recebar) que pueden requerir la incorporación de arena, a fin de obtener un material de granulometría más adecuada para su estabilización con cemento.





Figuras 1.14 y 1.15.- Reciclado de una capa (suelo seleccionado) y 2 capas de materiales (zahorra y riegos)

d) Por el tipo de ligante

1. Cemento (que resulta ser el objetivo de este manual)

El cemento aporta un desarrollo temprano de resistencias que se mantienen a lo largo del tiempo. Además, permite reciclar el firme existente en profundidades importantes, que no pueden ser alcanzadas en un reciclado con otros conglomerantes (20 a 45 cm), logrando una capa de potencia aceptable que asumirá toda la responsabilidad estructural (aunque reparta cierta carga muy reducida con las mezclas bituminosas dispuestas encima o transmita parte de ella a la capa de apoyo). Por otra parte, permite que el material que se recicla no sea absolutamente limpio, ni se encuentre perfectamente graduado, adaptándose adecuadamente a infinidad de casos en los que hay reparaciones o baches a lo largo de toda la traza. Se trata, por tanto, de la técnica más aconsejable cuando se quiere obtener un gran incremento de la capacidad de soporte del firme existente con cierta economía.

Proporciona una cohesión y resistencia que aumenta ligeramente con el tiempo (durabilidad) y produce una disminución de cierta plasticidad en caso de existir (por ejemplo, por contaminación de las zahorras). Todo ello se traduce en una mayor estabilidad volumétrica y se produce cierto incremento de la capacidad de soporte ante condiciones de humedad variables.

El contenido de cemento se establece para obtener como mínimo una resistencia similar a la de un suelocemento, si bien, en función de las características del material a reciclar y del

porcentaje del cemento pueden obtenerse valores mucho más elevados. Así, en el caso de zahorras relativamente limpias o macadams bien recebados, las características y resistencias del material resultante del reciclado que se han obtenido alcanzan resistencia de probetas cilíndricas a 7 días de edad hasta 10 MPa.



Figura 1.16.- Reciclado in situ con cemento

2. Cal y cemento o HRB

Con materiales muy plásticos, como ciertas zahorras muy contaminadas con arcillas, puede ser conveniente un tratamiento previo con cal y posteriormente el reciclado con cemento, o bien el empleo de un conglomerante especial para carreteras adecuadamente



Figura 1.17.- Reciclado in situ con cal y cemento



Figura 1.18.- Reciclado in situ con HRB E4

estudiado y denominado HRB (Hydraulic Road Binder) que se aplica en una sola pasada. En el caso de utilizar cal y cemento, cada conglomerante tiene una misión:

- La cal flocula los finos, con una reacción rápida de intercambio iónico, a la vez que reduce la humedad y la plasticidad del material.
- El cemento incrementa rápidamente la resistencia mecánica.

El material es disgregado previamente y tratado con una reducida dotación de cal (1-2%), hasta adquirir una apariencia granular. Posteriormente se realiza el reciclado con cemento, verificando previamente el contenido de agua.

En el caso de utilizar un conglomerante HRB, este debe haberse estudiado adecuadamente para que su aplicación resulte apropiada. El sistema de aplicación o reciclado será el mismo que se cita para el reciclado in situ con cemento y tiene la ventaja frente al reciclado con cal y cemento de que la aplicación se realiza en una única pasada.

3. Emulsión bituminosa

El material disgregado se mezcla con emulsión y el agua necesaria de envuelta. Una vez extendido y compactado, se puede conseguir un material con unas características semejantes a las de una gravaemulsión o una mezcla bituminosa densa en frío, pero se debe dejar que pierda este agua de exceso (rotura de la emulsión) antes de cubrirlo con otra capa. Los mejores resultados se alcanzan al reciclar espesores en el rango de 8 a 12 cm.

En todos los casos, ante la dificultad práctica de obtener en el laboratorio muestras del pavimento representativas de las granulometrías que se obtendrán en la obra, se debe realizar un tramo de prueba que se debe aprovechar, además de para corroborar los resultados obtenidos en el laboratorio, para determinar el plan de compactación.

4. Betún espumado

Para espumar el betún se calienta el mismo a una temperatura de unos 180ºC y se le inyecta en unas cámaras especiales una cantidad controlada de agua fría (normalmente un 2-3% en peso) y aire. Ello da lugar a que el betún se expanda, aumentando hasta 30 veces su volumen inicial. A causa de este proceso de espumado la viscosidad del betún se reduce sustancialmente, lo que permite su mezcla con el material procedente de la disgregación del firme.

A pesar de la aparente sencillez del proceso, el hecho de necesitar que el betún esté a 180 ºC en la obra hace que esta técnica resulte especialmente complicada.



Figura 1.19.- Reciclado con emulsión bituminosa



Figura 1.20.- Reciclado con betún espumado

5. Cemento y emulsión (también denominado reciclado con emulsión de altas prestaciones)

Este sistema combina los dos ligantes mencionados. Se trata de conseguir con ello una mezcla con una resistencia próxima a la de un material reciclado con cemento, pero a la que la emulsión confiere más flexibilidad y menor retracción, disminuyendo su módulo de elasticidad, pero no su durabilidad. Se denomina también reciclado con emulsión in situ de altas prestaciones. Las dotaciones suelen estar alrededor del 3% de emulsión y el 3% de cemento encontrándose el espesor en un valor medio de los correspondientes a reciclado con cemento y reciclado con emulsión (de 15 a 18 cm).



Figura 1.21.- Reciclado con cemento y emulsión

Asimismo, pueden realizarse reciclados con otras mezclas de ligantes: cemento y betún espumado, cal y emulsión, polímeros o conglomerantes que por cualquier circunstancia pueda interesar a la obra pero que, debido a sus complicaciones, requiere siempre un estudio previo especial que demuestre su idoneidad.

1.5 . VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LAS TÉCNICAS DE RECICLADO

Se analizan a continuación algunas ventajas e inconvenientes de las técnicas de reciclado frente a la técnica convencional de refuerzo en rehabilitaciones de firmes.

a) Comunes

Todos los reciclados in situ de un firme presentan en general las siguientes ventajas:

- Aprovechamiento de los materiales envejecidos, contaminados o de características inadecuadas del firme existente. El mayor yacimiento o suministro de áridos sin repercusiones medioambientales disponible en cualquier país, es su red de carreteras.
- Homogeneización de la resistencia de la capa resultante.
- Regularización geométrica de la superficie.
- Eliminación o reducción de los vertederos y disminución de la extracción de áridos de canteras o yacimientos, con las ventajas medioambientales que ello conlleva.
- Posibilidad de rehabilitar carriles individuales, aspecto muy importante en calzadas de sentido único y dos o más carriles, donde los deteriorados pueden ser sólo los exteriores por soportar el tráfico pesado.
- Volumen más reducido de transporte de nuevos materiales e incluso inexistencia de transporte en algunos casos, lo que se traduce en disminución de molestias por el tráfico de obra y menores posibilidades de causar deterioros a la red de carreteras secundarias adyacente (se evitan vertidos, emisiones, daños a estos caminos, daños colaterales a la flora y la fauna, etc.).
- Menores costes de rehabilitación del firme en antiguas carreteras agotadas.
- Permite mantener la rasante inicial y la anchura de la carretera, reduciendo el recrecimiento de arcenes y bordillos, así como el gálibo en pasos inferiores.
- Puede realizarse simultáneamente la realización de un ensanche, lo que es de gran interés en los casos frecuentes en los que se combina la rehabilitación del

firme existente con el ensanche del mismo. Con los equipos de reciclado y utilizando materiales similares a los del firme a reciclar se puede evitar la construcción de cuñas estrechas de ensanche que suelen acarrear dificultades sin requerir un ancho mínimo de ensanche. Una adecuada elección de materiales para el ensanche permite obtener después de su tratamiento una mezcla con unas características similares a las del firme reciclado, mejorando así la homogeneidad de la sección transversal del conjunto de la carretera ensanchada y evitando la aparición de fisuras longitudinales entre los ensanches y el firme de la parte de la carretera existente que se conserva. Todo ello se traduce en un mayor aprovechamiento del firme existente.

En resumen, el reciclado es un método de construcción respetuoso con el medio ambiente y al mismo tiempo económico, al reutilizar todos los materiales disponibles en el vial y reducir los costes del transporte.

El reciclado de un firme puede presentar algunos inconvenientes o limitaciones que deben considerarse para evitar presentación:

- mayor heterogeneidad, solo en ocasiones, respecto al refuerzo con una mezcla nueva, al reutilizar los áridos disponibles en la carretera (sobre todo si esta resulta muy heterogénea), aunque la capacidad estructural y durabilidad resulte muy superior.



Figura 1.22.- Carga del cemento en la dosificadora de lechada para un reciclado

- realización por bandas, con la posible aparición de grietas longitudinales, si no se adoptan las precauciones pertinentes para garantizar una adecuada unión entre los materiales de bandas adyacentes.

b) Ventajas particulares del reciclado in situ con cemento

El reciclado in situ con cemento es una técnica que ofrece tres tipos de ventajas:

1. Ventajas técnicas

- El reciclado in situ con cemento permite rehabilitar un firme fatigado, deformado e insuficiente para el tráfico que debe soportar transformándolo en una capa tratada más homogénea con unas características mecánicas importantes y una capacidad de soporte mucho mayor. Con frecuencia se trata de firmes con defectos y/o elevadas deflexiones, para cuyo refuerzo la normativa vigente indica la necesidad de un estudio especial.
- A través del reciclado es posible obtener una capa tratada homogénea, estable y de espesor importante, con unas características mecánicas significativas.
- Los espesores que es posible reciclar (entre 20 y 35 o más centímetros) permiten realizar una corrección adecuada de las roderas existentes.
- Se disminuyen las tensiones que llegan a la explanada y las que se producen en las capas bituminosas superiores.
- Se reducen los efectos negativos que sobre el firme tienen los cambios de humedad del soporte.
- Se incrementa la resistencia a la helada.

2. Ventajas medioambientales

- La reutilización de materiales in situ contribuye a no tener que abrir nuevos yacimientos de áridos, ni a reducir las reservas de los existentes. Este ahorro de áridos puede estimarse en 3.000–4.000 t/km (comparando con el árido necesario para un firme nuevo de similar capacidad estructural).
- El reciclado con cemento disminuye la necesidad de vertederos, al aprovecharse los materiales existentes en el firme y no producirse sobrantes.

- Al evitar transportes, se disminuyen las emisiones de CO2 y otros contaminantes, así como los impactos colaterales que provoca sobre los caminos y flora adyacentes (polvo, erosiones, etc.).
- La eliminación de la central de fabricación supone también una importante ventaja medioambiental.
- Es una técnica especialmente adaptada al empleo de cementos con alto contenido de adiciones. Ello se traduce en una reducción de las emisiones durante su fabricación, al reducir la cantidad clinker empleado e incorporar subproductos industriales como escorias o cenizas volantes, lo que favorece el cumplimiento del protocolo de Kioto y de los compromisos de desarrollo sostenible.
- Es una técnica en frío y que, en consecuencia, consume poca energía, disminuyendo notablemente la contaminación y las emisiones de vapores nocivos.

3. Ventajas económicas

- La reutilización de los materiales in situ supone un importante ahorro, al disminuir al mínimo el volumen necesario de nuevos áridos a utilizar en la obra y el costo de su transporte. Conviene recordar, a este respecto, la dificultad cada vez mayor de encontrar suministros de áridos de calidad no demasiado alejados de las obras. Esta gran reducción en el transporte de áridos contribuye a la conservación de la red de caminos y carreteras situada en las proximidades de la obra.
- Como ya se comentó, puede combinarse simultáneamente la realización del ensanche con la rehabilitación del firme existente evitando la construcción de cuñas estrechas de ensanche y un ancho mínimo del mismo con el sobrecoste que conlleva.
- La supresión de la central de fabricación, con la supresión que conlleva de todas las autorizaciones locales, lugar de ubicación, instalación, etc., supone un importante ahorro económico.
- Todas las ventajas citadas anteriormente se traducen en cierta economía.

Por todo ello el reciclado es una técnica económica, pudiendo llegar a un 30% el ahorro respecto a las soluciones clásicas de refuerzo o reconstrucción como puede verse en el último capítulo dedicado a los costes.



Figura 1.23.- Reciclado de una carretera

c) Comparación entre el reciclado con cemento y el reciclado con emulsión o con betún espumado

Las ventajas del reciclado con cemento en comparación con la aportación de emulsión o de betún espumado son:

- mayor aumento de la capacidad del soporte del firme, tanto por el mayor módulo de deformación, como por el espesor que es posible reciclar con cemento.
- mayor estabilidad frente a cambios climáticos, al ser el módulo de deformación independiente de la temperatura.
- no requiere un periodo de maduración para la evaporación del agua y los solventes, en el que la mezcla va adquiriendo sus características finales, y que condiciona la realización del pavimento.
- permite una corrección adecuada de las roderas existentes, por el mayor espesor que es posible tratar.
- resulta menos sensible a los fallos estructurales del firme reciclado por errores de realización o en el diseño de la mezcla (el riesgo de fallo resulta inferior) debido a la mayor potencia de reciclado

- el material se encuentra modelizado y caracterizado sin necesidad de asemejarlo a ningún otro material.
- admite el reciclado de materiales de peor calidad, algo más sucios, plásticos y con más finos.
- El cemento es un producto local, fabricado con materiales locales y con mano de obra nacional frente a la emulsión procedente de un betún importado.
- El coste del cemento es mucho más estable, con una tendencia de crecimiento reducida y lineal, sin sufrir las variaciones imprevisibles que el betún puede llegar a tener.

Un inconveniente puede ser la posibilidad de la aparición de fisuras en superficie si no se cuida este aspecto, sobre todo en zonas térmicas muy agresivas y en tramos con elevada intensidad de tráfico pesado, debido a la retracción del material. La prefisuración a distancias cortas de las capas recicladas con cemento puede minimizar o incluso hacer desaparecer este problema en carreteras con tráfico pesado y/o gran variación climática, que por otra parte pueden requerir pavimentos de gran espesor. En carreteras de baja intensidad de tráfico las fisuras finas, de abertura inferior a 0,5 mm, se ha comprobado que no afectan al buen comportamiento del firme.

d) Comparación entre el reciclado con cemento y el reciclado en caliente

Las ventajas del reciclado en frío con cemento son:

- Un campo más amplio de aplicación: sirve para mejorar pavimentos de mezclas bituminosas en caliente o en frío, y las capas granulares subyacentes
- Las condiciones climatológicas influyen menos en el trabajo
- Un ahorro en el transporte reduciendo los daños en los caminos y carreteras próximas y al medio ambiente anexo.
- Un ahorro en la energía empleada en el proceso al no calentar el material a tratar
- Una contaminación ambiental mínima
- Equipos mucho más sencillos y económicos (que no suelen requerir la colocación de una central de mezcla asfáltica modificada para reciclar el material fresado).
- Menor coste económico debido a la no disposición de dicha central de fabricación y la menor fluctuación en el coste de los conglomerantes empleados en el reciclado con cemento, entre otros.



Figura 1.24.- Compactación tras el reciclado de una carretera local

e) Comparación entre el reciclado con cemento y el refuerzo del firme

La elección entre las dos posibles soluciones (reciclado o refuerzo del firme) debe ser el resultado de un estudio técnico-económico que considere:

- Los costes totales de construcción, mantenimiento y conservación, incluidos ensanches y arcenes, en soluciones funcionalmente equivalentes y durante la vida útil prevista en el firme.
- La calidad final ofrecida por el nuevo firme, en lo que se refiere a su adecuación al tráfico y período de proyecto, a su comportamiento ante los cambios climáticos y a los previsibles costes de mantenimiento.
- La disponibilidad de materiales locales y los costes económicos y ambientales de los áridos a aportar en caso necesario
- Las soluciones a los problemas de gálibo, accesos, etc.
- El mantenimiento de la anchura de la calzada existente, lo que permite actuaciones sin perder anchura efectiva por los derrames de una posible capa superior.
- El Análisis del Ciclo de Vida de ambas soluciones, tanto del reciclado del firme, como del refuerzo a proyectar con las capas correspondientes.

En general, el reciclado con cemento presenta una mayor economía social, ambiental y económica, permite construir los ensanches con mayor corrección y menores riesgos y, por el menor incremento de la rasante del firme, plantea unos problemas mucho menores de recrecimiento de arcenes y accesos o de elevación de las barreras u otras unidades existentes.

En el capítulo 10 se incluyen varios ejemplos de esta economía.





Figuras 1.25 y 1.26- Testigos extraidos en diferentes pavimentos reciclados

1.6. EMPLEO DE ESTE MANUAL. ELECCIÓN DE UN RECICLADO COMO REHABILITACIÓN

Para analizar in situ si la solución más adecuada para la rehabilitación de un tramo de carretera es la realización de un reciclado in situ con cemento, cuyas ventajas se han incluido previamente, se expone a continuación los puntos y aspectos tratados en este Manual.

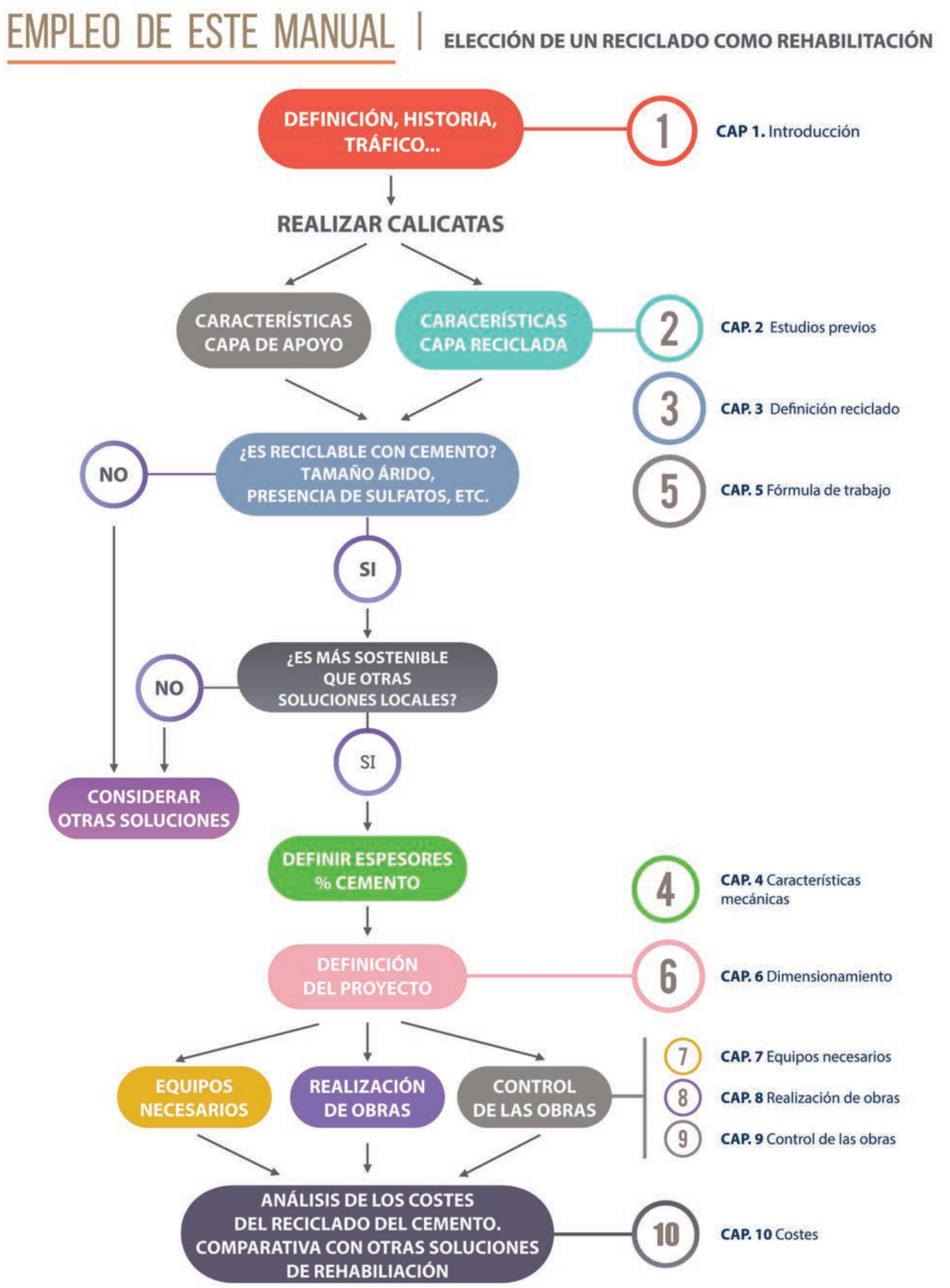


Figura 1.25.- Gráfico de empleo de este Manual y elección de un reciclado

2 ESTUDIOS PREVIOS

2.1. INTRODUCCIÓN

Antes de efectuar un reciclado es preciso realizar una serie de estudios previos con objeto de:

- verificar la viabilidad del reciclado
- definir el tipo de reciclado
- determinar mediante ensayos de laboratorio las características del material reciclado y obtener la fórmula de trabajo.

En este capítulo se verificará la Viabilidad del reciclado, presentando los dos puntos siguientes en los otros capítulos definidos a continuación.

2.2. VIABILIDAD DEL RECICLADO

Considerando que en el reciclado in situ se aprovecha el firme existente como yacimiento de áridos, para verificar la posibilidad de realizar un reciclado hay que conocer previamente las características de los materiales existentes y el espesor de las capas de dicho firme.



Figura 2.1.- Reciclado de la carretera "Camino de Santiago Asturiano"

Casi todos los firmes existentes y los materiales de dichos firmes pueden ser sometidos a un reciclado con cemento. No obstante, algunos como los de granulometría discontinua (tipo macadam sin recebar) requieren la aportación previa de un corrector granulométrico (arena o gravilla) o bien el ajuste de la velocidad del rotor. Este corrector granulométrico permite una curva granulométrica más continua que se traduce en cierto ahorro en la dosificación de cemento. Por otra parte, los materiales con elementos de gran tamaño, superior a 80 ó 100 mm, pueden requerir en algunos casos la utilización de equipos especiales para su disgregación o retirada.

Finalmente, la presencia de ciertas sustancias tales como materia orgánica, sulfuros (piritas), sulfatos (yesos) o cloruros (sal gema) puede perturbar o incluso impedir el fraguado del cemento.

La Viabilidad de un reciclado debe ser establecida mediante el conocimiento de la estructura del firme y de las características de los materiales que lo componen. Para ello se procederá al reconocimiento de la carretera, a la caracterización de los materiales de firme y a la obtención de los datos de tráfico y clima.

2.2.1. Reconocimiento de la carretera

a) Estudio de la historia de la carretera

La recopilación de los proyectos o informes de todas las actuaciones que se hayan realizado en la carretera que se está estudiando es un punto de partida obligado que puede ahorrar muchos trabajos posteriores, reduciendo en gran medida el número de muestras y calicatas. Con esta información ya se puede saber de forma aproximada, el número de capas de que está formada, el espesor de estas, y algunas características de los materiales. Además, servirá para realizar una primera actuación consistente en dividir la vía en tramos relativamente homogéneos (de la mayor longitud posible), según las características de las capas de firme existentes y el tráfico que circula sobre las mismas. No obstante, hay que tener en cuenta que a veces no hay datos suficientes, y que incluso estos pueden ser erróneos.

b) Inspección del firme existente

Con esta etapa de inspección se pretende reunir el mayor número de elementos que permitan identificar el estado estructural del firme, así como la naturaleza y los espesores de las capas que lo constituyen. Además de la información antes mencionada, será necesario realizar:

- una evaluación visual de los deterioros del firme, tomando nota particularmente de:
  - grado y extensión de estos
  - tramos que muestran los mismos tipos y niveles de deterioro

- tramos que necesitan una corrección de rasante
- problemas potenciales con bordillos, arquetas, accesos y barreras de seguridad



Figura 2.2.- Análisis de la naturaleza y espesores de las capas del firme.

- zonas aisladas muy deterioradas que pueden tener que tratarse separadamente
- problemas relacionados con la explanada, terraplenes, y en especial los derivados del drenaje
- limitaciones de gálibo
- composición y estado de los arcenes

- una campaña de auscultación de la carretera (deflexiones, regularidad longitudinal y transversal, extracción de testigos, realización de calicatas, etc.), cuya necesidad y amplitud dependerá del tipo de obra.

En algunos casos se puede conocer la composición del firme que se desea reciclar mediante un estudio realizado con georádar o equipo similar. Este es un equipo montado en un vehículo que puede utilizarse para estimar los espesores de las diversas capas que componen el firme, auscultando el mismo a una velocidad de 60-80 km/h.



Figura 2.3.- Diferentes capas de una carretera

La detección del cambio de capas por el georádar se basa en la emisión de una onda electromagnética y el análisis de la onda reflejada. No obstante, este sistema no permite determinar la naturaleza de las capas, por lo que ha de completarse con la auscultación con la toma discriminada de testigos o haciendo calicatas.

Con la información recogida se puede proceder a la división de la carretera en tramos homogéneos en cuanto a su tráfico, tipo de firme, estado de este y necesidades de refuerzo.

c) Toma de muestras representativas

La tramificación adoptada servirá de base para la programación de una campaña de extracción de testigos y apertura de calicatas para conocer y comprobar los espesores y las características de los materiales del firme y la explanada, tanto en la calzada como en los arcenes.

La toma de muestras en cada tramo ha de ser suficiente para que los resultados concuerden con la realidad. El número de muestras a extraer dependerá del tipo e importancia de la obra. En general. para unos 10 kilómetros de carretera a reciclar suelen ser suficientes uno

o dos testigos y una calicata por kilómetro, aunque esta cifra puede reducirse considerablemente a medida que crece la longitud del tramo. Las calicatas se realizarán transversalmente al menos en medio carril exterior de la calzada, ya que en esta dirección pueden aparecer las mayores diferencias de espesores debido a la canalización de las cargas.

Tanto los testigos como las calicatas no se limitarán a la profundidad que se vaya a verse afectada por el reciclado, sino que deberán incluir también la explanada o capa de apoyo, puesto que es necesario definir las características tanto de esta última como de todas las capas del firme. Además, hay que contar con la posibilidad de que el espesor que se diseñe para el reciclado sea mayor que el del total de las capas del firme y se incluya algo de material de la base.





Figuras 2.4 y 2.5.- Calicatas y testigos de carretera a reciclar

La experiencia obtenida en un gran número de obras de reciclado de firmes confirma que es frecuente que exista una variación importante en los espesores de las capas, en los niveles de deflexión y en las características de la explanada o capa de apoyo, lo que puede obligar a la modificación de los tramos en que se había dividido previamente la carretera. Por otra parte, las longitudes de los mismos han de ser constructivamente razonables, no inferiores en general a los 500 m.

2.2.2. Caracterización de los materiales del firme

Las muestras extraídas se analizan en el laboratorio a fin de identificar:

- la naturaleza y humedad de la explanada
- la naturaleza y humedad de los materiales que componen las distintas capas del firme existente

- la eventual presencia de productos susceptibles de perturbar o impedir el fraguado del cemento.

En consecuencia, hay que proceder a las siguientes operaciones.

a) Identificación de los materiales

En esta fase se realizan las siguientes determinaciones:



Figura 2.6.- Material reciclado con corrector granulométrico añadido

- granulometría: aunque ésta dependerá de la profundidad del reciclado aún sin definir (a mayor profundidad mayor porcentaje de capas granulares sin ligante bituminoso), la curva granulométrica obtenida con un espesor medio permite juzgar la eventual necesidad de un corrector granulométrico. Por otra parte, el tamaño máximo puede condicionar la elección de los equipos para la eliminación o machaqueo de los elementos gruesos
- estudio de los finos: para caracterizar la cantidad y la actividad de las partículas arcillosas del material se obtiene el índice de plasticidad (IP) y sólo en algunos casos muy reducidos el valor del azul de metileno (VAM).

Estos valores darán una primera orientación sobre la necesidad de realizar o no un reciclado solo con cemento o mixto con cal y cemento (o con un conglomerante especial HRB), con el objeto de que la cal anule el efecto de las arcillas. Este caso solamente suele darse con valores de IP superiores a 15 y un elevado porcentaje de finos, y aun así hay que corroborar la necesidad de la cal mediante ensayos de laboratorio posteriores, puesto que son muchos los casos en los que el cemento o HRB por si sólo es suficientemente activo (evitando la doble pasada de los equipos).

b) Determinación de la humedad de los materiales

Un parámetro de gran importancia en un reciclado es la humedad, de la que dependerán la densidad y resistencia obtenida del material. Por tanto, se debe determinar:

- la humedad natural (Wnat) del material a reciclar, teniendo en cuenta que ésta puede variar en función de las condiciones climáticas
- mediante el ensayo Proctor modificado, con el cemento incorporado, la humedad óptima de compactación (Wopt) con la que se obtiene la máxima densidad, la cual servirá como valor de referencia para la compactación a alcanzar en obra.

De la comparación entre ambas humedades, natural y óptima, se deduce la dotación de agua a aportar en obra, o, en algún caso, la necesidad de orear y secar el material escarificado.

c) Identificación de eventuales productos inhibidores del fraguado

Además de los elementos anteriores, el estudio debe detectar la presencia o no de sustancias susceptibles de perjudicar la acción del cemento. Para ello debe realizarse un ensayo de aptitud para el fraguado. Los materiales que más pueden afectar al mismo, llegando incluso a impedirlo, son los sulfatos (yesos), cloruros (sal gema), sulfuros (piritas) y las materias orgánicas (vegetación y raíces principalmente).

Una vez completada esta etapa, se tienen ya datos suficientes para poder juzgar si se puede realizar o no el reciclado con cemento y, en caso afirmativo, definirlo con precisión.

2.2.3. Drenaje y clima

Como en toda obra de rehabilitación, es necesario detectar y corregir los problemas de drenaje que pueda presentar la plataforma de la carretera: cunetas, obras de desagüe superficial, drenes subterráneos, etc.

En algún punto es incluso conveniente el saneo de blandones localizados. En diferentes tramos, este saneo se ha resuelto con acierto mediante el reciclado del firme a mayor profundidad (los equipos pueden llegar a los 50 cm aunque resulte muy difícil su compactación) e incluso con una mayor dotación de cemento en esas zonas.



Figura 2.7.- Superficie una vez reciclada

En lo que respecta a la climatología durante las obras, el reciclado in situ con cemento es menos sensible a la misma que el reciclado con emulsión, pues puede ejecutarse con temperaturas superiores a 2ºC, protegiendo en todo caso con una lámina de polietileno la capa terminada si durante la noche se espera una helada fuerte.

Sólo se suspenden los trabajos con lluvias de cierta intensidad, que puedan modificar sensiblemente la humedad de compactación.

2.2.4. Tráfico de proyecto

Para el dimensionamiento del firme es necesario conocer la intensidad media diaria por sentido de circulación de los vehículos pesados durante el primer año después de la rehabilitación. Al tratarse de carreteras en servicio, la estimación de la misma es más fácil y, si no se tienen datos, pueden realizarse los aforos pertinentes. Especial atención requieren las vías de baja intensidad de tráfico con un uso intensivo estacional (caminos agrícolas, forestales, etc.).

2.2.5. Ensanches y arcenes

El reconocimiento de la carretera debe comprender los arcenes y bermas existentes, por lo que las calicatas en la calzada se continuarán a través de estos o se realizan calicatas en los mismos con medidas de espesores y toma de muestras para su ensayo. Con frecuencia, la rehabilitación de un firme mediante reciclado in situ se aprovecha para ensanchar la calzada y disponer unos arcenes con mayor capacidad de soporte. Para el ensanche se debe emplear un material de características como mínimo similares a las del material de la carretera a reciclar.

Si no se dispone del mismo de forma económica, el ensanche deberá realizarse con un suelocemento. El objetivo final es obtener un firme cuyas características después del ensanche y reciclado sean lo más homogéneas posible en una misma sección transversal.



Figura 2.8.- En la caja del ensanche se dispone un material de características similares al del firme para reciclar todo junto (en la foto una zahorra artificial).



Figura 2.9.- Gráfico de las muestras a tomar en un reciclado con cemento y de los ensayos a realizar

3 DEFINICIÓN DEL RECICLADO

A partir de los resultados del estudio de viabilidad se determinan los distintos parámetros del proceso de reciclado. En concreto hay que precisar:

1. El espesor de firme existente que debe ser tratado
2. La eventual necesidad de una corrección de su granulometría o un árido para incremento del espesor (incluidos peraltes y rasante, que habrá que disponer antes de realizar el reciclado):
   - mediante machaqueo (ocasionalmente si no lo efectúa la recicladora)
   - mediante eliminación de los bolos o elementos muy gruesos
   - mediante aporte de materiales (normalmente árido fino)
   - utilizando de forma combinada los métodos anteriores

Una vez analizada a necesidad de este corrector granulométrico se debe definir, en su caso, la dotación de este.



Figura 3.1.- Perspectiva de un reciclado en una zona medioambientalmente protegida

3. Elección del tipo de reciclado
   - con cemento
   - mixto con cal y cemento; y en este caso, tipo de cal
   - con un conglomerante hidráulico especialmente estudiado para esa carretera (hydraulic road binder, HRB)
   - otros (según el apartado 1.4. del capítulo 1)

4. Dotación de conglomerante
   - cemento o HRB: entre 3 y 6%
   - cal (en caso necesario): entre 0,5 y 2%

5. Dotación de agua

6. Elección de los equipos más adecuados para efectuar el reciclado in situ

Además, hay que establecer y organizar si por el material tiene que circular el tráfico mientras se recicla o si dicho tráfico puede ser desviado por otras rutas alternativas, lo que habrá que anunciar con tiempo.

4 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS MATERIALES RECICLADOS CON CEMENTO

El conocimiento de las características mecánicas de los materiales reciclados es indispensable para establecer la fórmula de trabajo y efectuar el dimensionamiento de la nueva estructura de firme, es decir, para determinar el espesor a reciclar necesario, así como el de la capa o capas de mezcla bituminosa a disponer encima del mismo.

Por ello es necesario estimar, previamente a la realización del reciclado, las características mecánicas del material una vez tratado. Esta es una de las mayores dificultades de la técnica del reciclado, ya que se parte de materiales relativamente heterogéneos y no es posible conocer bien a priori la composición real que se obtendrá en obra.

Por otra parte, en obra no es posible ir modificando continuamente las fórmulas de trabajo para acomodarlas a las variaciones en la granulometría y otras características de los materiales in situ que por otro lado generaría una enorme confusión.

Es preciso elegir, por tanto, una composición media de la mezcla, y determinar en el estudio las variaciones en las características mecánicas resultantes de las desviaciones de las materiales in situ con respecto a dicha composición media.

Sin embargo, si la heterogeneidad de los materiales es muy grande, es difícil determinar en laboratorio las características mecánicas del material tratado, por la dispersión de los resultados. Éstos dependen fundamentalmente de las características del firme que se recicla. Hay que tener ciertas precauciones con la dosificación de cemento, que por motivos económicos no debería ser superior al 6 %, salvo con materiales muy contaminados o de granulometría complicada, en los que pueda ser necesario superar este valor.

En consecuencia, a la hora de abordar un reciclado, pueden distinguirse dos casos atendiendo a la heterogeneidad de los materiales existentes:

- si el firme a tratar es homogéneo, es posible estimar mediante un estudio de laboratorio las características del material después de ser reciclado, con las naturales dispersiones introducidas por el proceso de puesta en obra
- si el firme a tratar es heterogéneo y la obra tiene suficiente longitud, pueden construirse pequeños tramos de ensayo de los cuales se extraigan muestras para la confección de probetas, una vez realizada por el equipo de reciclado la disgregación y homogeneización de los materiales existentes. Cuando esto no sea factible, puede iniciarse el reciclado con una dotación algo más elevada de ce-

mento (del orden de un 1%) y ajustar después con los resultados de los ensayos mecánicos que se vayan obteniendo.

Es decir, en el caso de que se disponga de materiales muy diferentes y haya cierta heterogeneidad el objetivo debe ser que el material conseguido una vez reciclada la carretera tenga como mínimo unas características determinadas que se pueden modificar variando la cantidad de cemento en el reciclado.



Figura 4.1.- Firme existente en el ensanche

En principio pueden considerarse dos calidades de materiales reciclados con cemento:

Tabla 4.1. Tipos de reciclados

Características	***Tipo A***	***Tipo B***
Resistencia a compresión (RC) mínima a 7 días	2,5 MPa	3,5 MPa
Módulo de elasticidad (E) de cálculo a los 90 días	5.000 MPa	8.000 MPa
Contenido mínimo de cemento	3%	3,5%

Las resistencias a compresión (obtenidas mediante Norma UNE-EN 13286-41) deben determinarse sobre probetas compactadas al porcentaje mínimo exigido en obra de la densidad máxima Proctor modificado (en general, 97% PM), de acuerdo con la Norma UNE-EN 13286-2, o bien con martillo vibrante, según la Norma UNE-EN 13286-51, ajustando la energía de compactación de forma que se obtenga dicha densidad.

Los valores del módulo de elasticidad indicados en la tabla anterior lo son sólo a título orientativo. Factores tales como la mayor o menor proporción de mezcla bituminosa en el espesor reciclado tienen una gran influencia en los mismos. En general, cuanto más elevado es el contenido de betún, más reducido es el módulo de elasticidad en relación con el de un material granular como la gravacemento con la misma resistencia, lo cual es favorable para el comportamiento a fatiga del firme reciclado.

Los contenidos de cemento incluidos en la tabla 4.1 son valores mínimos y para garantizar que estos valores sean al menos el contenido en toda la superficie, se debe incrementar el valor dispuesto en la obra en un 0,5% de tal forma que el contenido de cemento sea al menos de 3,5 y 4% respectivamente para los tipos A y B (resistencia mínima a compresión a 7 días de 2,5 MPa y 3,5 MPa).

5 DETERMINACIÓN DE LA FÓRMULA DE TRABAJO

El reciclado del firme no se debe iniciar hasta que no se haya estudiado y aprobado la correspondiente fórmula de trabajo. Esta debe señalar:

1. La **granulometría** (obtenida mediante la norma UNE-EN 933-1) y tolerancia en el huso de los productos resultantes del escarificado y, en su caso, las medidas correctoras necesarias para lograr una aceptable granulometría de los materiales a tratar.



Figura 5.1.- Rotor con picas de un reciclado in situ en las pruebas de granulometría

La obtención de la curva granulométrica tiene como objetivo el determinar si ésta es aceptable, o por si el contrario es necesario la adición de un corrector granulométrico. No hay que olvidar que el material con el que se realizará el reciclado será el obtenido del escarificado, y según se lleve a cabo éste o su velocidad, se obtendrán unas granulometrías u otras.

Si la curva obtenida necesita una corrección, el aporte de una cantidad de materiales de una fracción determinada no es la única solución, aunque suele ser la más sencilla. También pueden eliminarse elementos gruesos o proceder a una trituración de éstos. Algunas recicladoras permiten reducir el tamaño máximo obtenido ajustando su placa de impactos o barra rompedora.

Aunque no se consiga una curva granulométrica perfectamente continua con el paso de los equipos, la necesidad de un corrector granulométrico no suele ser muy común. Valores como el pase por el tamiz de 4 mm inferiores al 30% o por el tamiz de 63 µm inferiores al 3% suelen ser un indicador de la necesidad de dicho corrector.

Cuando se recicla un macadam discontinuo o poco recebado también es necesario incorporar un árido de tamaño intermedio como corrector. De no ser así, al reciclar el material los gruesos quedan flotando y agrupados sin envuelta, formando zonas sueltas y débiles. Por otro lado, en el caso de un elevado número de elementos gruesos superiores a 100 mm se deberá prever su retirada o proceder a un machaqueo previo de los mismos.

Otro punto a tener en cuenta es la profundidad hasta la que se va a reciclar, que puede también influir notablemente en la curva granulométrica. Esto es debido a que al ir aumentando la profundidad de fresado se alcanzará un porcentaje cada vez mayor de capas granulares sin conglomerante asfáltico, frente a las capas superiores que pueden ser de mezclas bituminosas, con granulometrías diferentes. Dado que previamente no se sabe con exactitud la profundidad que se va a tratar, es recomendable determinar las curvas granulométricas que se obtendrían con diversos espesores de reciclado. Por ello se debe definir o estimar previamente la profundidad de reciclado en función del tráfico pesado de la carretera y las características de la explanada.

Como referencia de granulometrías deseables, pueden utilizarse las incluidas en el artículo 513 (materiales tratados con cemento: suelocemento y gravacemento) del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3 del Ministerio de Fomento español, aunque como se indica en el capítulo 21 (Reciclado in situ con cemento de capas de firme) del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras PG-4 de la citada administración (O.C.40/2017) bastará con que se limite el tamaño máximo del árido a 80 mm y el pase por el tamiz de 4 mm (norma UNE-EN 933-2) no sea inferior al 30% en masa.

2. La **humedad** óptima de compactación obtenida en el ensayo Proctor modificado según norma UNE-EN 13286-2, que deberá ser el contenido óptimo de agua del material en el momento del mezclado.

3. La **densidad** a obtener. En principio, el valor medio de la misma no debería ser inferior al 97% de la densidad máxima obtenida en el ensayo Proctor modificado.

4. El **tipo y contenido de cemento** a utilizar, así como de los eventuales aditivos (por ejemplo, retardadores de fraguado). Es recomendable el empleo de cementos con alto contenido en adiciones y clase resistente media.

Para determinar la dosificación óptima de cemento (la cual debe ser la mínima compatible con las resistencias exigidas, no sólo por economía, sino para conseguir una fisuración fina) se han de realizar dos o tres series de probetas. Éstas se fabricarán con los materiales que se espera obtener del fresado del firme, con la incorporación de un corrector granulométrico si se ha estimado necesario, y distintas dotaciones de cemento. Dichas probetas, compactadas a la densidad mínima exigida en obra y con la humedad óptima según el ensayo Proctor Modificado, se romperán a compresión simple a la edad de 7 días. Una vez hecha

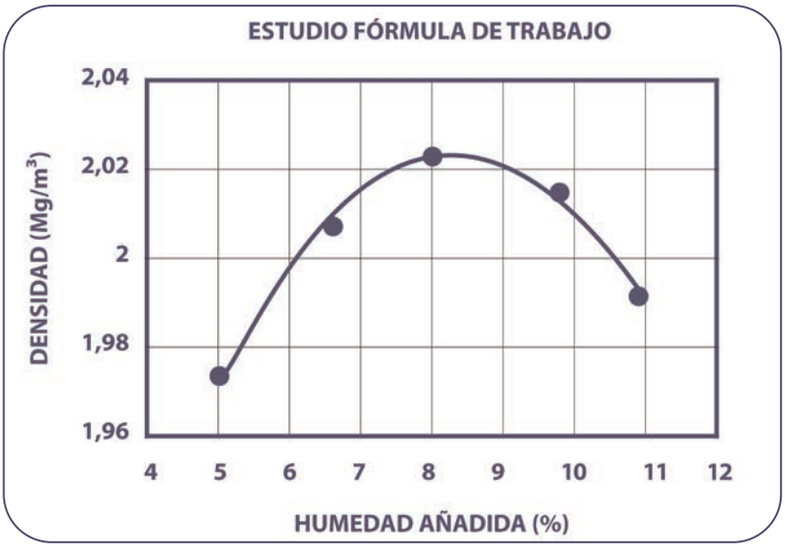


Figura 5.2.- Proctor modificado

una primera selección del contenido de cemento se realizará un análisis de sensibilidad sobre probetas compactadas a densidades que difieran en ±2 puntos de la antes usada. De esta forma se puede determinar el contenido mínimo de cemento a añadir al material que garantice suficientemente la obtención de la resistencia a compresión exigida con las dispersiones estimadas en obra. Si la obra es importante, deben realizarse también roturas a diferentes edades (3, 28 y 90 días) para controlar las resistencias a edades tempranas y conocer su evolución, así como a tracción indirecta (UNE-EN 13286-42). Asimismo, puede tener interés conocer el módulo de elasticidad a compresión simple.

En las obras de reciclado la elección del tipo de cemento tiene una importancia menor en comparación con la dosificación de conglomerante o el grado de compactación alcanzado. Es posible utilizar la gran mayoría de los cementos comercializados en España, por lo que en muchos casos su elección dependerá de la disponibilidad y precio de estos. No obstante, algunas recomendaciones de índole práctico pueden mejorar algunos aspectos.

En general debe procurarse emplear los cementos de clase de resistencia media o baja, es decir los 32,5 ó 22,5, a fin de disponer de un mayor plazo de trabajabilidad, controlar la generación de calor de hidratación y limitar los efectos de la fisuración por retracción. Los cementos de clase resistente superior, como los 42,5, deben reservarse para situaciones especiales como puede ser el caso de un reciclado en tiempo frío o aquellos en los que se persiga una resistencia relativamente alta en poco tiempo por la necesidad de abrir al tráfico pesado o cualquier otra circunstancia similar.

Por otro lado, la utilización de cementos de clase resistente alta puede dar lugar a contenidos de conglomerante excesivamente bajos, con los que efectivamente pueden alcanzarse las resistencias especificadas en ciertas zonas, pero con los que no es posible garantizar

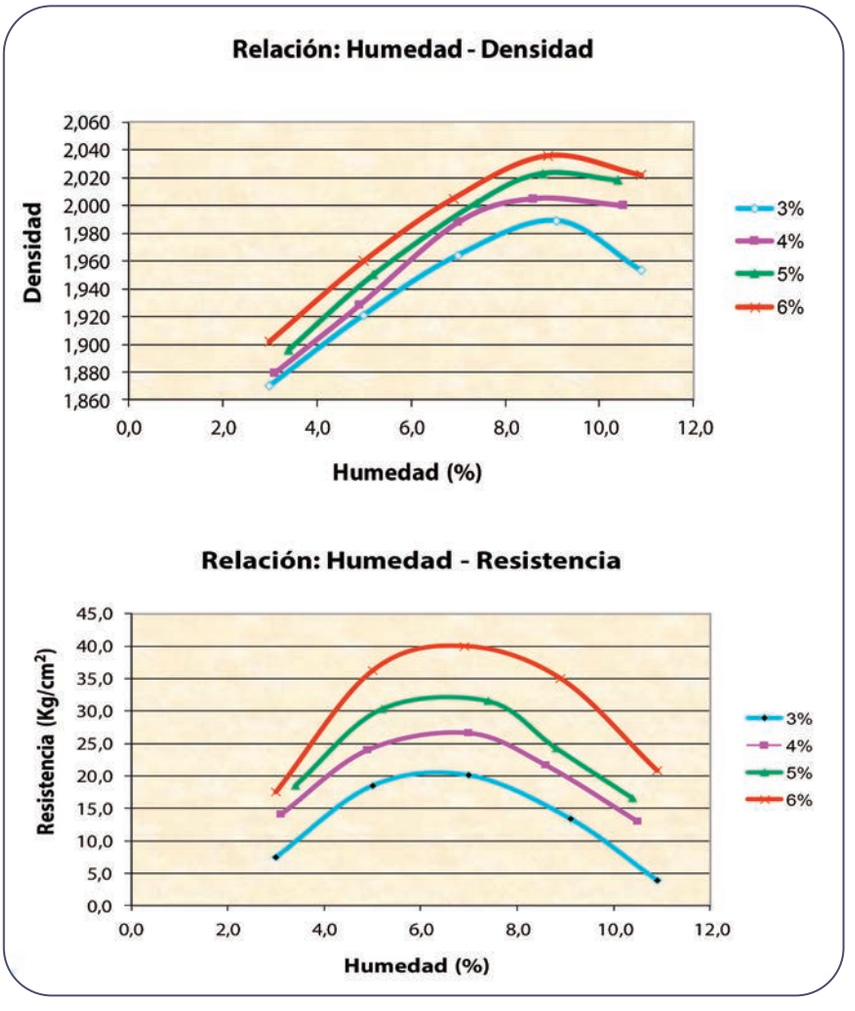


Figura 5.3.- Relación humedad -densidad – resistencia de un material muy fino tipo jabre

una distribución homogénea en toda la masa de material reciclado y por tanto, no se puede garantizar esa resistencia mínima en todo el volumen reciclado.

Con las clases resistentes 32,5 ó 22,5 la cantidad de conglomerante necesaria para obtener la resistencia especificada es superior, con lo que se minimizan los problemas de dosificación y homogeneización en la masa.

Además, se puede observar una disminución en el plazo de trabajabilidad de la mezcla (ver apartado 5 de este capítulo) que va siendo menor a medida que aumenta la clase de resistencia del cemento, por ser este más fino y aumentar la velocidad de las reacciones químicas de hidratación.

En consecuencia, los cementos más recomendables para el reciclado (y, en general, para todas las mezclas con cemento que vayan a ser compactadas con rodillo) son aquéllos con un elevado contenido de adiciones activas como las puzolanas naturales o artificiales (cenizas volantes), o las escorias siderúrgicas. Entre los mismos, están los cementos puzolánicos

(CEM IV), los portland con adiciones (CEM II), los de horno alto (CEM III) y los compuestos (CEM V) de la Norma UNE-EN 197-1, así como los cementos para usos especiales ESP VI-1 de la Norma UNE 80307. Estos últimos tienen un contenido de adición que puede variar entre el 45 y el 75% en masa (evidentemente una vez declarada la composición el fabricante sólo puede variar el contenido de adición en ±5%) aunque su clase resistente está referida a los 90 días de edad, dado su elevado contenido de adiciones. No obstante, se han establecido unos límites inferior y superior a la resistencia que deben tener a 28 días, lo que permite agilizar los controles sobre los mismos.

Además de las ventajas ya mencionadas en cuanto al plazo de trabajabilidad más elevado y la mayor facilidad de dosificación, la presencia de puzolanas o escorias mejora el comportamiento del material reciclado ante agentes externos de agresividad débil o media. En el caso de los cementos siderúrgicos esta característica se extiende también a la existencia de sulfatos.

Las únicas precauciones que adoptar con estos cementos son las que se derivan de su mayor sensibilidad a la desecación, especialmente en el aspecto de las resistencias mecánicas. Ello no supone un problema en las obras de reciclado, en las que se suele extender un riego de curado con emulsión bituminosa una vez finalizada la compactación que funciona como una película aislante que impide la perdida de humedad. No obstante, hay que mantener húmedo el material antes de aplicar dicho riego, y evitar que se produzcan deterioros en el mismo, protegiéndolo en caso necesario con gravilla o arena.

También se dispone de otro tipo de conglomerantes especiales para carreteras, recogidos en la norma UNE-EN 14227-1 y denominados hydraulic road binder (HRB) que se están empleando en el reciclado de firmes con buenos resultados, aunque están más pensados para estabilizaciones de suelos por la modificación de estos que pueden lograr.

Finalmente, los cementos comunes tipo CEM II se pueden utilizar sin problemas especiales en las obras de reciclado, con tal de que se respeten las precauciones indicadas en cuanto al plazo de trabajabilidad. En algunas ocasiones pueden incluso presentar alguna ventaja adicional con respecto a los cementos anteriormente citados, como en el caso de la existencia de materia orgánica o de materiales arcillosos que hayan contaminado las capas a reciclar. En esta situación es beneficioso aumentar la cantidad de portlandita en la mezcla, lo que se consigue con contenidos más bajos de adición y más elevados de clinker.

5. El **plazo de trabajabilidad** del material reciclado de acuerdo con la norma UNE-EN 13286-45 en función de las condiciones climáticas, al objeto de ajustar los tiempos de realización de la mezcla y su compactación.

En general, se define como plazo de trabajabilidad de un material tratado con cemento el tiempo transcurrido desde el final de la mezcla del material con el cemento y el agua durante el cual, por no haber comenzado todavía el fraguado del conglomerante o bien estarse iniciando, es posible compactar el material sin que se produzca ningún deterioro apreciable de sus propiedades mecánicas.



Figura 5.4.- Plazo de trabajabilidad del material

A medida que se va desarrollando el proceso de hidratación del cemento, empiezan a formarse enlaces entre los áridos o las partículas procedentes de la escarificación del firme. Dichos enlaces pueden ser destruidos, sin posibilidad de regenerarse, por los esfuerzos provocados por los rodillos. Por otra parte, a medida que se va rigidizando el material, más difícil resulta su compactación. En consecuencia, ésta debe completarse antes de que se haya formado un número demasiado elevado de enlaces cuya rotura podría perjudicar de forma importante el comportamiento posterior del material. El intervalo máximo dentro del cual pueden efectuarse las operaciones de compactación con la máxima temperatura esperada en obra es lo que se denomina plazo de trabajabilidad.

No hay que confundir el plazo de trabajabilidad con el tiempo de fraguado del conglomerante, que lógicamente es uno de los parámetros que lo afectan, aunque no el único. La naturaleza de los materiales escarificados, el contenido de agua o las condiciones climáticas de la obra son otros factores a tener en cuenta: por ejemplo, a igualdad del resto de condiciones, un aumento de la temperatura ambiente de 20ºC a 30ºC puede reducir a la mitad el plazo de trabajabilidad.

Entre los distintos métodos que existen para la determinación del plazo de trabajabilidad, se ha generalizado el incluido en la norma UNE-EN 13286-45, basado en el descenso de la densidad que se observa al ir compactando a intervalos. Se considera que se ha alcanzado

el plazo de trabajabilidad cuando la densidad alcanzada es un 98% de la obtenida en las probetas fabricadas inmediatamente después de mezclar el material. Los ensayos para su determinación deben realizarse a la temperatura media prevista entre las once y las catorce horas durante la realización del reciclado. Las probetas pueden compactarse con la maza Proctor según la norma UNE-EN 13286-50 o con el martillo vibratorio según la norma UNE-EN 13286-51*.

En el reciclado de un firme es también importante que la compactación de una banda se complete antes de que haya transcurrido el plazo de trabajabilidad de la banda adyacente ejecutada previamente. Con ello se consigue que no se forme una junta fría entre las mismas; y que los rodillos, cuando solapen las dos bandas, no produzcan roturas de enlaces en la reciclada en primer lugar.

Igualmente, si se realiza un refino del material reciclado antes de concluir la compactación del mismo, es también importante que las pasadas finales de los rodillos se produzcan antes de que se haya agotado el plazo de trabajabilidad.





Figura 5.5 y 5. 6.- Reciclado de dos carreteras

6. Aunque no forma parte de la fórmula de trabajo, hay que definir si es necesaria la **apertura inmediata al tráfico** o si por el contrario se puede desviar el tráfico por rutas alternativas. En este último caso se deberán anunciar los desvíos con tiempo suficiente, pero en el caso de circular de forma inmediata el tráfico, se deberá cumplir que el índice de carga inmediato (IBI = Immediate Bearing Index, IPI en determinados países) del material es superior a 50 (obtenido según la norma UNE-EN 13286-47).

**Nota: aunque se han empleado las normas españolas (la mayoría europeas) tipo norma UNE-EN XXX, la equiparación con las normas equivalentes, tipo ASTM o AASHTO, es sencilla".*

6 DIMENSIONAMIENTO DE LA REHABILITACIÓN DE UN FIRME EXISTENTE MEDIANTE RECICLADO IN SITU CON CEMENTO

El dimensionamiento consiste en la determinación del espesor de reciclado y del espesor de las capas superiores de la calidad que se determine, que pueden ser tanto de mezclas bituminosas en caliente como en frío o tratamientos superficiales.

En la normativa internacional no suele contemplarse el dimensionamiento de los firmes con capas recicladas in situ con cemento y en la normativa española, las prescripciones no son válidas para el tráfico de mayor intensidad pesada (norma 6.3 IC de Refuerzo de Firmes y Orden Circular 40/2017 del Ministerio de Fomento), aunque ello no exime al proyectista de su consideración, en particular cuando el firme a rehabilitar está muy degradado (estudio especial) o haya ventajas técnicas o económicas que lo justifiquen.

La técnica de reciclado in situ con cemento es particularmente útil cuando el firme a rehabilitar está muy degradado, por lo que la inspección visual se considera que resulta de mayor importancia. Pero en cualquier firme puede haber muchos motivos que aconsejen la solución de reciclado con cemento de la carretera y no solo el agotamiento del firme y sus carencias estructurales (blandones, fisuración, pavimento en mal estado, etc.) por ello se hace especial hincapié en la inspección visual y experiencia del técnico.



Figura 6.1.- Deflectometro de impacto

Una solución objetiva puede resultar la medida de las deflexiones. Cuando en estas se adquieren valores importantes, se requiere un estudio especial que incluya la alternativa reciclado in situ con cemento de la carretera como solución para rehabilitar la misma. Pueden considerarse de partida, que resulta necesario reciclar el firme y recuperar la capacidad de soporte cuando los valores están normalmente por encima de 100 x 10^{-2} mm para tráficos superiores a los 4.000 camiones/carril/día con firme flexible, por encima de 125 x 10^{-2} mm para tráficos superiores a los 2.000 camiones/carril/día, valores superiores a 150 x 10^{-2} mm para tráfico superior a los 800 camiones/carril/día y valores de deflexión superiores a 200 x 10^{-2} mm para categorías de tráfico inferior siempre que estemos hablando de reciclar un firme con base granular, es decir, un firme flexible. En el caso de disponer de un firme semirrígido formado por una base de un material tratado hace años con cemento valdría con obtener valores superiores a 80 x 10^{-2} mm.

Es importante indicar que el reciclado con cemento es una técnica de rehabilitación total, es decir el cálculo o diseño del firme reciclado es independiente de las deflexiones en la carretera existente. Una campaña de auscultación puede ser útil para decidir si se considera apropiado reciclar el firme existente, para tramificar el mismo y para la detección de posibles zonas a sanear, pero una vez adoptada tal decisión, los espesores de la capa reciclada con cemento y del refuerzo de mezcla bituminosa no tienen por qué estar ligados a las deflexiones medidas inicialmente, ni al mal estado de la carretera original.

La gran capacidad de reparto de cargas como consecuencia del paso del tráfico de una capa reciclada con cemento hace que asuma las tensiones que se originan en la misma con menor influencia de la mayor o menor rigidez del soporte en que se apoyan, dentro de los valores usuales para una explanada coronada por cierto espesor de capas granulares sin tratar.

No hay que olvidar a este respecto que, en general, la carretera existente suele haber sufrido una fuerte compactación por el tráfico a lo largo de los años, por lo que normalmente puede considerarse que la capa reciclada se apoya sobre una explanada de buena categoría. No obstante, esto no siempre es cierto y si se tienen dudas sobre ello, puede determinarse la capacidad de soporte de la explanada mediante sondeos o calicatas o bien por medio de ensayos deflectométricos (con el deflectómetro de impacto, la deflexión bajo el geófono más alejado del punto de aplicación de la carga suele depender casi exclusivamente de las características de esta capa). La experiencia del proyectista indicará si conviene o no tocar esta capa compactada por el tráfico (no suele convenir tocar esta capa de apoyo si resulta muy plástica o de reducida capacidad pues contamina la losa reciclada), bien aumentando el espesor diseñado para el reciclado (para lo que se debe aportar material sobre la carretera para disponer del espesor necesario), o bien si se reducirá el espesor reciclado previsto incrementando la resistencia de la losa (para no tocar dicha capa de apoyo).

En consecuencia, el dimensionamiento de un firme reciclado con cemento dependerá básicamente de la categoría de tráfico pesado de la carretera y del tipo de material obtenido tras el reciclado (y en menor medida, de las características de apoyo de la capa inferior). Aunque las características del reciclado son función del espesor y contenido de betún de las capas de mezcla bituminosa existentes y del espesor y características de la capa granular de base, se proponen a continuación unas secciones de firme rehabilitado orientativas, según las calidades del reciclado definida en el capítulo 4. Se recuerda que con esta técnica no es difícil obtener elevadas resistencias. En principio, se recomienda una profundidad de tratamiento entre 25-35 cm, en correspondencia con la categoría de tráfico pesado, aunque podría aplicarse un espesor inferior en el caso de carreteras de tráfico pesado muy bajo.

Se han considerado las categorías de tráfico pesado establecidas por la Dirección General de Carreteras (Ministerio de Fomento), con las subdivisiones adoptadas por diversas Comunidades Autónomas españolas en sus normativas correspondientes según se muestra en la tabla 6.1.

Tabla 6.1. Categorías de tráfico

CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO		
Categoría	***Subcategoría***	***IMD Pesados (*)***
T00	T00	≥4.000
T0	T0	2.000 - 3.999
T1	T1	800 - 1.999
T2	T21	400 - 799
	T22	200 - 399
T3	T31	100 - 199
	T32	50 - 99
T4	T41	25 - 49
	T42	< 25

(*) en carril de proyecto y año de puesta en servicio

Desde el punto de vista el cálculo del firme sólo tiene interés los vehículos pesados (camiones, autobuses, etc.), considerando, de forma general, como tales aquellos con carga superior a las 5 toneladas. Este tipo de vehículos suele coincidir sensiblemente con los de 6 o más ruedas. El resto de los vehículos que puedan circular con peso inferior (vehículos ligeros, camionetas o tractores sin carga) provocan un efecto reducido sobre el pavimento, por lo que no se tienen en cuenta en el cálculo. Los niveles de tráfico se clasifican de acuerdo con la tabla 6.1., de acuerdo con el número medio diario de vehículos pesados que circulan o se prevea que vayan a circular por el vial a lo largo del año de puesta en servicio.

Otro factor a tener en cuenta, si bien en vías secundarias puede no ser importante, es el hecho de que la mejora de una determinada vía puede atraer y generar tráfico. Si entre dos puntos existen dos caminos alternativos y uno de ellos mejora su calidad, los vehículos tenderán a ir más por él; es decir, el camino de mejores condiciones atraerá tráfico del otro. Por otra parte, al mejorar las comunicaciones con una determinada zona se produce una mayor facilidad de crecimiento en ella (instalación de industrias o de zonas residenciales) al ser cómodo el acceso y salida, lo que se traduce en una generación de tráfico.

Si la calzada no supera los 5 m de anchura se considera, a efectos del cálculo del firme, el tráfico total entre los dos sentidos pues, salvo en los cruces, los vehículos circularán centrados y afectarán a ambos carriles de la calzada; si la calzada tiene una anchura superior a 6 m se considera la mitad del total, y si su ancho está comprendido entre 5 y 6 mm se toman tres cuartos del total:

Tabla 6.2. Determinación de los tráficos de proyecto en función del ancho de la calzada

Ancho de calzada	***Tráfico de proyecto***
≤ 5 m	Total entre los dos sentidos
5 – 6 m	3/4 del total
≥ 6 m	1/2 del total

Las secciones propuestas se han analizado tensionalmente, obteniéndose una resistencia a la fatiga aceptable que permite recuperar la capacidad de soporte del firme, además de las otras ventajas comentadas con el reciclado.

Los tipos de mezcla bituminosa a emplear en las distintas capas por encima de la capa reciclada (especialmente la mezcla bituminosa de rodadura que suele ser discontinua en los tráficos pesados más intensos), se fijan según la normativa vigente en cada país. Aunque no se ha previsto en este Manual, también es posible disponer una capa de hormigón encima de la capa reciclada aumentando así de manera considerable la capacidad estructural

y durabilidad del nuevo firme. Este hormigón puede ser colocado mediante vibración (pavimento continuo o con juntas) o por compactación (HCR ó RCC en la nomenclatura internacional).

Si el proyectista desea hacer un estudio analítico de la estructura del firme reciclado, puede seguir las líneas esbozadas en el análisis tensional de los firmes reciclados in situ con cemento incluido en el Anejo 2.

En el caso de que las características del firme existente no permitan efectuar un reciclado del mismo en todo el espesor requerido, puede adoptarse una de las medidas siguientes:

- aporte de nuevos materiales granulares hasta completar el espesor de reciclado previsto
- incremento de la resistencia del material obtenido en el reciclado.
- incremento del espesor de las mezclas bituminosas
- una combinación de las anteriores.

Las secciones de firme reciclado propuestas en el presente Manual son las siguientes:

Tabla 6.3. Reciclado tipo A
(RESISTENCIA A COMPRESIÓN A 7 DÍAS = 2,5 MPa)

	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO								
	T00	T0	T1	T21	T22	T31	T32	T41	T42
IMD	< 4.000	2000 a 3999	800 a 1999	400 a 799	200 a 399	100 a 199	50 a 99	25 a 50	< 25
Explanada de calidad contrastada CBR>10	20 / 35	18 / 35	16 / 35	12 / 35	12 / 30	10 / 30	10 / 25	8 / 25	5 / 25
Explanada de baja o dudosa calidad CBR>5			20 / 35	15 / 35	12 / 35	10 / 35	10 / 30	8 / 30	5 / 30

Mezcla bituminosa *Reciclado in situ con cemento*

Para los tráficos más bajos, como el T42 de menos de 25 vehículos pesados/carril el día previsto de apertura de la carretera o finalización de las obras, se puede disponer una capa de 5 cm de mezcla bituminosa en frio o bien un simple o doble tratamiento superficial que sirva como rodadura.

En ambos cuadros se ha dispuesto un espesor de mezcla bituminosa acorde con la categoría de tráfico pesado que en cualquier caso se puede reducir.

Tabla 6.4. Reciclado tipo B
(RESISTENCIA A COMPRESIÓN A 7 DÍAS = 3,5 MPa)

	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO								
	T00	T0	T1	T21	T22	T31	T32	T41	T42
IMD	< 4.000	2000 a 3999	800 a 1999	400 a 799	200 a 399	100 a 199	50 a 99	25 a 50	< 25
Explanada de calidad contrastada CBR>10	18 / 35	16 / 35	14 / 35	12 / 30	10 / 30	10 / 25	8 / 25	8 / 20	5 / 20
Explanada de baja o dudosa calidad CBR>5			16 / 35	12 / 35	10 / 35	10 / 30	8 / 30	8 / 25	5 / 25

Mezcla bituminosa *Reciclado in situ con cemento*

Por sus características resistentes, más fáciles de obtener, la práctica española ha ido encaminada hacia el empleo de las secciones de rehabilitación incluidas en el primer cuadro Reciclado tipo A (min. 2,5 MPa a 7 días), y aunque puede resultar menos económicas en algunos casos, disponen de mayor seguridad frente a posibles variaciones del espesor final de la sección.

Cuando se realiza el reciclado de una carretera deteriorada apoyada sobre terrenos plásticos o de reducida calidad que no permite asegurar la categoría de la explanada de calidad contrastada (con CBR ≥ 12), se puede incrementar el espesor de las capas de la sección diseñada para reciclar (comprobando previamente que existe espesor de firme para reciclar o añadiendo el espesor de material granular necesario), el espesor de las mezclas bituminosas de cobertura o bien la capacidad resistente exigida a esta capa reciclada.

7 EQUIPOS PARA LA REALIZACIÓN DE OBRAS DE RECICLADO

7.1. INTRODUCCIÓN

En las obras de reciclado in situ con cemento de un firme existente hay que distinguir dos etapas:

- una primera, que comprende el conjunto de operaciones hasta lograr la disgregación del firme en la profundidad requerida y la mezcla del material resultante con el cemento, el agua y, en caso necesario, con los áridos de aportación;
- una segunda, en la que se realiza la nivelación y compactación de la mezcla así obtenida, y la protección final de la misma mediante un riego de curado.

En la primera etapa debe utilizarse maquinaria específica para este trabajo. Habitualmente la maquinaria agrícola no tiene la potencia necesaria para hacer este trabajo en condiciones de seguridad en cuanto al espesor tratado y a la calidad de la mezcla obtenida

En la segunda etapa del reciclado, es decir, una vez efectuada la mezcla de los materiales, las operaciones a realizar son las mismas que en el caso de una gravacemento o suelocemento, y las diferencias entre los equipos que se emplean para ello en obras importantes o secundarias son también pequeñas, pudiendo señalarse únicamente el peso y la capacidad de compactación de los rodillos.





Figuras 7.1 y 7.2.- Diferentes etapas del reciclado

En la tabla 7.1 se han resumido las distintas operaciones y equipos a utilizar tanto en el reciclado con cemento de un camino de baja intensidad de tráfico, como en el de una carretera principal de cualquier tipología de tráfico (el orden de las operaciones no es indicativo pues depende del proceso).

Tabla 7.1. Equipos para la realización de las distintas operaciones del reciclado de una carretera

Operaciones	Objetivos	Equipos usuales
Disgregación (1)	Disgregar el firme existente	Motoniveladora con ripper Bulldozer con ripper Recicladora
Eliminación de elementos gruesos	Supresión de elementos de tamaño superior a 80 mm.:	
	- mediante machaqueo	Machacadora in situ o móvil
	- mediante retirada de estos	Equipos agrícolas
Nivelación	Reparto de los materiales procedentes de la disgregación del firme.	Motoniveladora
Aporte de áridos	Mejora de la granulometría Corrección de peraltes Aumento del espesor a tratar	Distribuidor Extendedora de mezcla Motoniveladora
Humectación (2)	Obtención de la humedad óptima. Proctor modificado	Barra regadora Camión cisterna acoplado a recicladora Distribuidor de lechada
Distribución del conglomerante	Aporte de conglomerante en la dotación requerida de acuerdo con la fórmula de trabajo y el espesor a tratar	Manual (cuadrícula de sacos solo en obras muy pequeñas) Distribuidor de conglomerante (en polvo o en lechada)
Mezclado	Mezcla homogénea del firme disgregado con el conglomerante, el agua y los eventuales áridos de aportación.	Estabilizador de suelos Recicladora
Refino	Eliminación de material sobrante para obtención de cota definitiva y rasanteo. Mejora de la regularidad superficial	Motoniveladora
Realización de juntas transversales	Control de la fisuración	Equipos manuales Equipos mecanizados

Operaciones	Objetivos	Equipos usuales
Compactación	Obtención de la densidad requerida	Rodillo vibratorio delantero Rodillo mixto Rodillo neumáticos
Riego de curado y protección (3)	Curado de la capa reciclada Protección del riego de curado	Extendedora de emulsión Extendedora de gravilla Rodillo neumáticos a veces

(1) En caso de que el firme contenga un porcentaje elevado de elementos de tamaño superior a 80 mm para evitar daños en la recicladora, debe procederse a una disgregación de este y eliminación de dichos elementos mediante retirada o machaqueo, seguida de una nivelación antes de realizar la extensión del conglomerante y de los eventuales áridos de aportación. Esta operación solo debe realizarla la recicladora si no es preciso eliminar elementos gruesos.

(2) Si el firme existente tiene una humedad excesiva, debe procederse a la disgregación y oreo de este antes de la extensión del conglomerante y de los eventuales áridos de aportación. Si la humedad es muy elevada, se podrá emplear previamente cal viva para secar el material.

(3) En épocas calurosas o en condiciones favoreciendo la desecación debe disponerse de un equipo de pulverización de agua para mantener la humedad de la superficie antes de la extensión del riego de curado.

7.2. DESCRIPCIÓN DE ALGUNOS EQUIPOS

7.2.1. Introducción

Como se ha visto en las tablas anteriores, en la realización de las obras de reciclado se utilizan distintos equipos, cada uno de los cuales tienen una influencia mayor o menor en la calidad final del reciclado. Dentro de los mismos, puede asignarse una especial importancia a los siguientes:

- distribuidores de conglomerante
- recicladoras
- equipos para la realización de juntas en fresco
- rodillos

Por ello, en los apartados que siguen se va a hacer una breve descripción de los mismos, insistiendo sobre todo en aquellas características que más incidencia tienen en una obra de reciclado.

7.2.2. Distribuidores de conglomerante

La distribución manual del conglomerante, formando previamente una cuadrícula de sacos a la distancia requerida, solamente es admisible en obras muy pequeñas. La distribución en sacos puede ser muy precisa, pero la forma en la que se hace implica un rendimiento muy pequeño que encarece éste y el resto de los trabajos: mezclado, nivelado y compactación final de la mezcla, por lo que habitualmente no se recomienda este sistema.





Figuras 7.3. y 7.4.- Diferentes distribuidores del cemento en polvo

En los restantes casos debe procederse a una extensión mecanizada del mismo, para lo cual existen dos tipos diferentes de equipos:

- los que distribuyen el conglomerante en forma pulverulenta (sistema denominado vía seca)
- los que lo hacen en forma de lechada (sistema denominado vía húmeda)

Los equipos que efectúan la dosificación en polvo están formados por remolques-silo o tanques remolcados con tolvas acopladas en la parte posterior con compuerta regulable y tornillo distribuidor que puede estar ligado o no a la velocidad de avance del vehículo tractor. Los dispositivos de dosificación pueden ser de tipo ponderal o volumétrico. Como regla general deben protegerse con faldones para limitar la emisión de polvo.

Algunas empresas denominan vía semi-húmeda a la via seca y lo justifican indicando que el agua se incorpora directamente al equipo de reciclado pero no se puede admitir otra solución en la vía seca si se quiere obtener un mínimo de calidad en la carretera reciclada, siendo este sistema simplemente una mejora imprescindible de la vía seca.



Figuras 7.5.- Distribuidor de cemento en lechada







Figuras 7.6, 7.7 y 7.8.- Diferentes partes del distribuidor de cemento en lechada (sinfín de suministro ponderal, rueda que mide la velocidad de avance y ordenador de gobierno)



Figura 7.9.- Carga de cemento en la dosificadora de lechada

Los equipos que dosifican el cemento en forma de lechada (vía húmeda) están constituidos fundamentalmente por un silo de cemento, un depósito de agua, un mezclador de suspensión, una bomba que impulsa la suspensión hasta el rotor de fresado de la recicladora y los equipos electrónicos adecuados capaces de dosificar ponderalmente el porcentaje indicado de lechada respecto al peso del material tratado (de acuerdo con la velocidad de avance, densidad del material, dosificación de cemento y profundidad de trabajo). Evidentemente, esta segunda opción tiene la ventaja de evitar pérdidas de conglomerante por el viento y ser una solución mucho más respetuosa con el medio ambiente. Además, proporciona una dosificación más exacta y reduce el tiempo de espera de las cubas de cemento, por tener el equipo capacidad para una cuba completa. No obstante, si la humedad del firme está próxima a la de compactación, la aportada por la lechada puede ser perjudicial, requiriéndose entonces un oreo previo del material a reciclar. En obras de pequeño volumen y superficie irregular, la vía húmeda o distribución del conglomerante en forma de lechada puede suponer un mayor coste por la repercusión del equipo (este equipo suele ser empujado por la recicladora).



Figura 7.10.- Equipo de reciclado por vía húmeda

El efecto principal de un distribuidor de lechada es que al formarse ésta, cada partícula de cemento está en contacto con el agua y por lo tanto se va a hidratar para hacer luego su función de conglomerante. Por otra parte, siempre es más fácil la mezcla efectuada entre un líquido (la lechada) con un sólido (el suelo) que entre dos sólidos entre sí (suelo más cemento en polvo), especialmente cuando la proporción del conglomerante es muy baja, y por eso se recomienda el empleo de este sistema en el reciclado in situ con cemento de carreteras. Por ello, en los casos en los que el reparto del cemento tenga que realizarse por vía seca, se recomienda el empleo de algo más de dotación (entorno al 0,5 %) que cuando se emplea la vía húmeda.

En cualquier caso, siempre conviene asegurarse que la distribución del cemento resulta homogénea sobre toda la masa a reciclar. No obstante, y aunque se recomiende la dosificación por vía húmeda del cemento en forma de lechada en el reciclado de firmes in situ, debe asegurarse una buena calidad en el reciclado tanto por vía húmeda como por vía seca mediante el control de los parámetros adecuados, tales como el contenido y distribución homogénea de cemento, el espesor de reciclado, la humedad y compactación adecuada del material, la granulometría de la mezcla, el tiempo de trabajabilidad u otros incluidos en este Manual. En todos los casos en los que la proyección de cemento al suelo pueda suponer un inconveniente, como con tráfico rodado adyacente, con viento o en zonas de especial afección medioambiental, siempre será recomendable la vía húmeda.

7.2.3. Recicladoras

Dentro de las mismas se pueden distinguir los siguientes tipos:

1. Equipos para reciclado in situ que son desarrollo de otros concebidos inicialmente para la estabilización de suelos (Wirtgen, Caterpillar, CMI, Bomag, etc.). Un rotor alojado dentro de una carcasa protectora, situada en la parte central del equipo, es el encargado de fresar el firme existente y de mezclar el material resultante con el agua y el cemento. La mezcla así obtenida sale por una compuerta regulable situada en la parte trasera de la carcasa. Esta última va provista de una barra regadora con una serie de dispositivos para la inyección de agua o de lechada de cemento y agua. Actualmente, el rotor de fresado lleva montadas picas con punta de widia, por lo que no suele haber cambios respecto al rotor empleado en una estabilización. El giro de este se realiza de forma que los materiales arrancados son lanzados hacia la parte delantera de la carcasa. Las picas van montadas en el rotor siguiendo una disposición helicoidal, a fin de facilitar el mezclado de los materiales.

Se dispone de una amplia gama de equipos, con potencias que van desde 300 HP hasta 1200 HP, anchos de trabajo oscilando entre 2 m y 2,5 m y profundidades de reciclado que llegan hasta los 50 cm (el espesor viene condicionado por la capacidad de compactación). Algunas características adicionales que pueden tener estos equipos son las siguientes:

- barra rompedora de elementos fresados incorporada a la carcasa, cuya distancia al rotor puede regularse para limitar el tamaño máximo de los elementos amasados por este último
- carcasa de altura regulable, dejando más o menos espacio entre la parte superior de la misma y el rotor para así variar el volumen de la "cámara de mezclado" en función de la profundidad de fresado



Figuras 7.11 a 7.14.- Máquinas recicladoras de diferentes marcas

- regulación electrónica de la profundidad de fresado
- posibilidad de inclinar el rotor con respecto a la horizontal para adaptarse a la pendiente transversal requerida
- control mediante microprocesador del caudal de agua o lechada añadida
- control de potencia consumida para ajustar la velocidad de avance de forma que el motor trabaje siempre en las proximidades de su par óptimo.
- giro independiente de las ruedas delanteras y traseras que permite un desplazamiento muy ágil en cualquier dirección.

Algunos modelos incluyen dentro del equipo reciclador una tolva de dosificación del cemento para obtener un equipo más operativo que el formado por la recicladora y la dosificadora de lechada, pero la escasa capacidad de estas tolvas con el fin de que resulte manejable hace que no se hayan comercializado en España.



Figura 7.15.- Máquina recicladora con cemento y regla de extendido incorporada

Dichos equipos pueden ser utilizados en general en carreteras de todo tipo de tráfico, incluso si el firme contiene capas de mezcla bituminosa u otros materiales tratados.

2. Equipos de reciclado derivados de las fresadoras de pavimentos, pero que, a diferencia de estas últimas, además de levantar el material del firme realizan un mezclado del mismo con cemento y con agua. El rotor se encuentra dentro de una cámara de mezclado situada igualmente en la parte central del equipo. Unas cuñas deslizantes provistas de rejillas, situadas delante de la cámara, evitan que penetren en la misma las placas que se forman al fresar el firme, sobre todo cuando el ligante se encuentra ya envejecido o el pavimento está muy agrietado. La cámara va provista de un sistema doble de inyectores para entrada de líquidos (por ejemplo, agua y emulsión, si se realiza un reciclado mixto lechada de cemento - emulsión). El material mezclado sale de la cámara en forma de cordón. En la parte trasera de la máquina, un sinfín ajustable en altura lo distribuye delante de una regla vibrante extensible que realiza una precompactación del material. Para el reciclado con cemento se dispone de equipos con potencias del orden de 600 HP, anchos de fresado de 2 m y profundidades máximas de reciclado de 40 cm.

Estos equipos están dotados igualmente de una serie de controles similares a los ya mencionados para las máquinas derivadas de estabilizadoras de suelos:

- regulación electrónica de la profundidad de fresado
- control mediante microprocesador del caudal de agua o lechada incorporado

- regulación de la velocidad de avance en función de la resistencia al mismo encontrada por el equipo (la cual, como es lógico, aumenta con la profundidad)
- posibilidad de inclinar tanto el rotor como la regla vibrante de precompactación.

En todos estos equipos, las picas son elementos sometidos a un gran desgaste, por lo que suele ser necesario reponer una proporción importante de las mismas o incluso su totalidad a lo largo de una jornada de trabajo. Como es lógico, dependiendo del material a fresar, dicho desgaste será mayor o menor:



Figura 7.16.- Rotor de reciclado con sus picas

- en firmes de áridos calizos o sílico - calcáreos, con más del 60% de caliza, suele ser frecuente reponer diariamente todas las picas del rotor;
- con materiales más duros y más abrasivos, como son los áridos silíceos, puede ser necesario sustituir picas dos veces en una misma jornada, a mediodía y por la noche, e incluso en algunas ocasiones cada dos horas.
- en casos de abrasividad muy elevada se suelen cambiar todas las picas en cada reposición de las mismas. Si se trata de rotores de 150-200 picas, ello implica tener cambiar del orden de 300, 400 o incluso 500 unidades cada jornada.

Por este motivo, las picas se alojan en los portapicas mediante sistemas a presión que las hacen fácilmente recambiables sin necesidad de cortar o soldar.



Figuras 7.17 a 7.19.- Rotor, cambio de picas y detalle de estas

7.2.4. Rodillos

Aunque se trata de máquinas utilizadas en un gran número de unidades de obra, la importancia que tiene en un reciclado (como en todas las capas tratadas con cemento) la obtención de una densidad elevada, sobre todo en el fondo de la capa, hace conveniente insistir en las características que deben reunir los equipos de compactación. Una compacidad adecuada es un factor fundamental de cara a obtener una buena resistencia a fatiga de la capa tratada.

Es sobradamente conocida la relación directa densidad – resistencia de la mezcla y por lo tanto, durabilidad, de manera que se da gran importancia a la compactación.



Figuras 7.20 a 7.22.- Rodillo vibratorio, de neumáticos y el rodillo más común en España en el reciclado

Los rodillos vibratorios con un rulo neumático liso delantero son los más utilizados por su versatilidad y eficacia. Habitualmente tienen un eje tractor de dos neumáticos unido por articulación a un rodillo vibratorio liso. La vibración se obtiene por el giro de masas excén-

tricas. En función del peso y de la excentricidad se obtienen distintas frecuencia (600-4 500 r.p.m) y amplitudes de vibración. Al aumentar ésta, mayor es también el esfuerzo de compactación.

Eventualmente pueden emplearse también compactadores de neumáticos y rodillos mixtos.

Un parámetro fundamental en la eficacia de la compactación es la carga estática por unidad de longitud de generatriz, el cual está muy ligado al espesor reciclado. Atendiendo al mismo, se pueden distinguir los tipos de rodillos que se indican en la Tabla 7.3.

Tabla 7.3. Clasificación de los rodillos lisos vibratorios

Tipo de rodillo vibratorio	***Carga estática por unidad de longitud generatriz***	***Espesor de capa más adecuado***
Rodillos ligeros	100 - 250 N/cm	10 - 15 cm
Rodillos medios	250 - 350 N/cm	15 - 25 cm
Rodillos pesados	350 - 550 N/cm	25 - 40 cm

Cuanto más limpio y exento de finos plásticos se encuentre el material a compactar más eficaz es la vibración y el espesor puede ser el mayor del intervalo indicado.



Figura 7.23.- Rodillo empleado en algunos países para compactar (nunca debe usarse para amasar)



Figura 7.24.- Rodillo de neumáticos utilizado para cerrar la superficie en la reparación de una autovía

Dada la dificultad de compactación que suelen presentar los materiales reciclados no deben en general utilizarse en los mismos rodillos con una carga estática inferior a 300 N/cm.

El empleo de compactadores de neumáticos sólo se recomienda en suelos monogranulométricos (arena de playa, por ejemplo) en los que puedan quedar muchas fisuras transversales después de la compactación. Su influencia en la compactación del suelo es pequeña en cuanto se baja de los primeros centímetros y muy especialmente con contenidos altos de cemento.

En cualquier caso, hay que reiterar la conveniencia de realizar tramos de ensayo en todas las obras para definir lo mejor posible la forma de compactación: equipo y número mínimo de pasadas. Los tramos de ensayo permiten además poner de manifiesto la influencia del contenido de agua, analizar la conveniencia de emplear un retardador de fraguado u otros aspectos.

7.2.5. Equipos para la realización de juntas en fresco

Como se analiza más adelante, al igual que en el resto de los firmes semirrígidos sometidos a una circulación intensa, hay que tratar de evitar la aparición de las fisuras de retracción en la superficie de rodadura. El método más eficaz para ello es la creación en fresco de entallas a distancias cortas.

Se han desarrollado equipos con potencia y peso suficientes para poder realizar un corte que afecta a una gran parte del espesor de la capa (más del 50%) o a su totalidad, aún en

el caso de que ésta tenga una cierta precompactación, y que al mismo tiempo efectúan algún tipo de tratamiento, para evitar que se vuelvan a adherir las caras de la junta.

Entre los equipos para realizar juntas se pueden mencionar los siguientes:

a) Prefisuración en estado fresco

- Con incorporación de emulsión asfáltica, como el equipo francés CRAFT, la viga o celosía empleada por algunas constructoras españolas o la cuchilla y equipo montado sobre quad, mini-retroexcavadora o rodillo.
- Con inserción de film de plástico, como el equipo OLIVIA.
- Con inserción de perfil plástico rígido, como el equipo denominado de juntas activas.
- Otros, como el serrado en fresco.

b) Prefisuración en estado endurecido

- Serrado de juntas (muy empleado en pavimentos de hormigón vistos sin cobertura bituminosa).
- Fisuración por aplicación de cargas pesadas (muy utilizado en diferentes estados americanos como Estados Unidos, Chile o Uruguay).

En algunos equipos, el desplazamiento suele realizarse manualmente, y por lo tanto, resultan poco adecuados en cuanto el rendimiento supera los 1.000 m^2/jornada, aunque en algunas obras se ha utilizado. En estos casos se debe utilizar los equipos autopropulsados.

Todos estos equipos se describen con detalle en el Anejo 3.





Figuras 7.25. y 7.26.- Diferentes operaciones de reciclado

8 REALIZACIÓN DE LAS OBRAS

8.1. PROCESO DE REALIZACIÓN

Como ya se ha mencionado, la realización de una obra de reciclado in situ con cemento se desarrolla, en general, de acuerdo con el siguiente proceso:

- preparación de la superficie existente (barrido para eliminar los materiales perjudiciales como trozos de arcilla o materia orgánica, colocación de material para alcanzar la cota deseada en el caso de que se quisiera rectificar la existente, realización de los ensanches proyectados, etc.)





Figuras 8.1. y 8.2.- Preparación de la superficie existente antes del reciclado

- en caso necesario, machaqueo o cribado y aporte de material como corrección granulométrica, para obtener el espesor necesario a reciclar o para lograr la rasante y los peraltes adecuados
- extensión del cemento
- escarificado del firme existente en la profundidad requerida
- humectación
- mezclado
- realización de juntas (prefisuración).
- compactación inicial
- refino

- compactación final
- extensión del riego de curado o de protección y de las capas superiores de mezcla bituminosa



Figura 8.3.- Recicladora en una obra

Ahora bien, dependiendo de los equipos empleados, las distintas operaciones anteriores pueden agruparse o solaparse, y variar el orden con relación al que se ha expuesto.

Si además del reciclado es necesario efectuar un ensanche de la calzada, previamente habrá que realizar un cajeo con la profundidad adecuada a uno o ambos lados de la misma. El corte efectuado en la calzada deberá ser vertical y alcanzar, a ser posible, zonas sin contaminar. El fondo de la caja así formada deberá ser compactado cuidadosamente. A continuación se rellenará la misma con un material granular con un espesor igual al de reciclado y con unas características tales que permitan obtener después del reciclado una capa lo más homogénea posible en sentido transversal, sin variar la dotación de cemento en las distintas bandas de tratamiento, incluyendo las que afecten a los ensanches. En caso de no poder realizarse esto de forma económica con material de la zona, debe contemplarse la opción de realizar los ensanches con suelocemento fabricado en central.

Cuando sea necesario un tratamiento previo con cal para conseguir reducir la humedad o la plasticidad aglutinando los finos del suelo, se deberá realizar primero un reciclado con cal, compactando y nivelando el material y con un desfase mínimo de varias horas proceder al reciclado con cemento, comprobando previamente la humedad del material.



Figura 8.4.- Equipos para el reciclado con cemento de la carretera

8.2. REALIZACIÓN DE LAS OBRAS

8.2.1. Introducción

Al igual que en otras unidades de obra, es muy importante efectuar una adecuada planificación de los trabajos de reciclado. Así, de acuerdo con el equipo disponible, el conglomerante a emplear y las condiciones climáticas de la obra habrá que definir el número de pasadas o bandas de trabajo para terminar la sección completa y la longitud de las mismas con el fin de evitar juntas frías entre las diferentes bandas. Por esta razón, no se suele ir a bandas de trabajo con una longitud superior a los 500 m, buscando la longitud adecuada que permita finalizar la sección en todo el ancho coincidiendo con el vaciado del distribuidor de conglomerante. Siempre que se disponga de doble equipo, se debe trabajar con dos recicladoras en paralelo para evitar la formación de juntas frías e incrementar el rendimiento.

Además, hay que prever todas las operaciones auxiliares que obligan a detener el proceso de reciclado como son la carga de cemento en los equipos dosificadores, la sustitución de picas u otros, que deben realizarse siempre coincidiendo con la finalización de un tramo con la sección reciclada en todo el ancho.

Otro factor que tiene una gran influencia en la organización de los trabajos es el tráfico. Normalmente el reciclado se realiza en carreteras en las que hay que dar paso alternativo a los vehículos, por lo que hay que prever desvíos o bandas de paso alternadas con la que se recicle en cada momento.

Respecto al material en sí se deben seguir las mismas precauciones y cuidados habituales que en cualquier otra capa de material tratado con cemento: adoptar medidas en conse-



Figura 8.5.- Doble equipo de reciclado en una obra

cuencia para evitar una reducción excesiva del plazo de trabajabilidad con temperaturas muy altas (por ejemplo, mediante el empleo de un retardador de fraguado); no reciclar con temperaturas muy bajas (menos de 5ºC si se prevén heladas), ni con fuertes precipitaciones; curar adecuadamente, etc.

Algunas de las fases de realización indicadas en el apartado 8.1 de una forma simplificada, se suelen agrupar, con la maquinaria actual de reciclado, de la forma que se describe a continuación.

8.2.2. Extensión del conglomerante

La vía más adecuada por la que se realizará el reciclado, seca o húmeda, será determinada en función de las características de cada obra en concreto, siendo necesaria la vía húmeda siempre que la presencia del cemento en polvo en el suelo pueda significar un inconveniente, tales como carreteras con tráfico abierto, presencia de fuerte viento o zonas de especial afección medioambiental.

Esta vía húmeda es siempre recomendable por lo ya indicado pero, salvo casos específicos, se pueden conseguir buenos resultados por ambas vías siempre que se controlen adecuadamente los parámetros de calidad indicados, tales como el contenido y distribución homogénea de cemento, el espesor de reciclado, la humedad y compactación adecuada del material, la granulometría de la mezcla, el tiempo de trabajabilidad u otros incluidos en este Manual.

Dependiendo del sistema de realización, el cemento se extenderá antes o después de escarificar y disgregar el firme. Si la máquina como es deseable realiza conjuntamente las



Figura 8.6.- Extendido del cemento en polvo

operaciones de escarificado y mezclado, el cemento podrá extenderse previamente o como lechada en el mismo proceso en la proporción correspondiente.

La extensión manual del cemento, por ejemplo, formando previamente una cuadrícula de sacos con la separación requerida, únicamente es admisible en obras muy pequeñas y de tráfico reducido. Aunque de esta manera puede controlarse bastante bien la dotación del conglomerante por unidad de superficie, el rendimiento que es posible alcanzar imposibilita este método en cuanto la superficie a reciclar alcanza unos pocos de miles de metros cuadrados.

En caso de utilizarse dosificadores en polvo (vía seca), es preferible emplear equipos de tipo ponderal, con vertido regulado por la velocidad de avance. La dosificación prevista de cemento debe extenderse lo más uniformemente posible sobre la superficie a reciclar. Para reducir al mínimo las pérdidas de cemento provocadas por el viento, y sobre todo evitar las molestias que ello origina en la puesta en obra, es conveniente que haya una buena sincronización entre los equipos de extensión del conglomerante y de fresado del firme, de forma que la longitud de cemento por delante de este último sea lo más reducida posible.

Como ya se ha comentado, este problema queda resuelto con los dosificadores de lechada (vía húmeda). Actualmente se dispone de equipos de gran capacidad y potencia, con los que se puede llegar a dosificaciones de lechada de 1000 kg/minuto, lográndose grandes rendimientos en obras de gran volumen o en las que la dosificación de cemento necesaria es elevada.

Estos equipos permiten reducir considerablemente el problema de pérdida de tiempo efectivo de reciclado por paradas para abastecimiento de conglomerante: la descarga de una

cuba de cemento puede durar casi media hora, lo que supone en algunos casos de 2 a 3 horas sin reciclar (6 cubas de 25-27 t de cemento) a lo largo de una jornada de trabajo.



Figura 8.7.- Extendido del cemento en lechada

Dicho problema puede resolverse con la presencia en la obra de una cuba nodriza o con cisternas de cemento de dos motores que permitan moverse al vehículo mientras se efectúa la descarga (solución muy rara de encontrar en obra).

Siempre se debe dosificar de manera generosa para evitar problemas y no aplicar estrictamente el porcentaje teórico obtenido en los ensayos previos. Cualquier descenso de la cantidad de conglomerante dosificado o pérdida de calidad del material del firme, puede traducirse en una reducción de las resistencias obtenidas y en un fallo del mismo.

8.2.3. Escarificado y Mezclado

A fin de asegurar una buena homogeneidad del material reciclado y una profundidad uniforme de mezclado, debe utilizarse una recicladora con la potencia requerida para ello (equipos de más de 500cv). Por otra parte el equipo debe avanzar a una velocidad uniforme y suficientemente lenta para que, sin perjudicar el rendimiento, se obtenga dicha homogeneidad.

Si, como es habitual, el reciclado se realiza por bandas, éstas deben solaparse suficientemente (del orden de unos 20 cm) para no dejar materiales sin mezclar en los bordes de las mismas. En caso contrario se crearán unas fisuras longitudinales en el pavimento, cuyo fallo prematuro agotará la capacidad estructural del firme. En líneas generales no se recomienda el empleo de maquinaria agrícola para este menester.

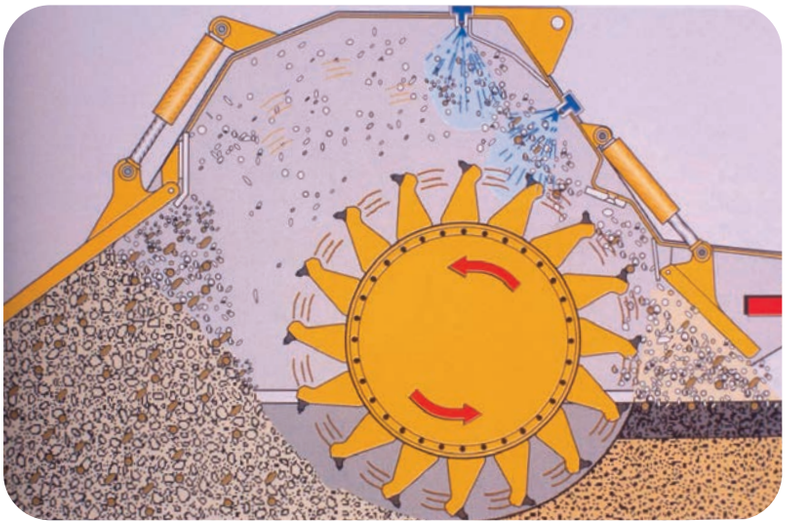


Figura 8.8.- Esquema del avance del rotor de la recicladora

Una de las variables que requieren más atención y control durante todo el proceso de reciclado es la humedad. Para el mezclado habrá que añadir el agua necesaria para que, descontando la humedad natural del material, se obtenga la óptima del ensayo Proctor Modificado. En los casos en los que dicha humedad natural sea superior a la requerida será necesario orear previamente el material, realizando una pasada de la recicladora sin añadir el conglomerante.

Lo más habitual es que el escarificado del firme y la mezcla del material resultante con el cemento y el agua sean llevados a cabo simultáneamente por la recicladora. No obstante, ya se ha mencionado que existen equipos que son más bien cámaras de mezclado, precisando la escarificación previa firme, y con los que pueden alcanzar hasta 5.75 m de ancho de extendido. Con ello disminuyen los riesgos de juntas frías longitudinales.



Figura 8.9.- Recicladora en un tramo en variante

Otra de las variables fundamentales suele ser el espesor de reciclado, que requiere cierto control permanente. Las capas excesivamente delgadas de reciclado funcionan de manera semejante a un cristal: son muy resistentes, pero bastante frágiles por lo que pueden romper produciendo fisuras, baches y deformaciones no deseadas.

El control del espesor puede realizarse de manera muy sencilla abriendo calicatas detrás de la recicladora y antes de la primera compactación o planchado (para facilitar su apertura) y comprobando que el material tiene el espesor requerido, teniendo en cuenta el esponjamiento de este. En algunas obras en las que se realice la obra con nivelación con sistemas 3D o cualquier ayuda topográfica, basta con tomar cota del fondo del reciclado en algunos puntos de manera sistemática.

8.2.4. Realización de juntas

Los firmes reciclados con cemento se comportan de manera similar a los semirrígidos convencionales o con una base de material tratado. Como ya se ha mencionado, el contenido de cemento de una capa reciclada se ajusta para obtener unas características resistentes similares exigidas. Un material de este tipo suele presentar una fisuración espontánea fina y a distancias cortas. Sin embargo, las heterogeneidades del firme existente pueden dar lugar a unas dispersiones importantes en las resistencias in situ, que con frecuencia alcanzan valores bastante más elevados. Este hecho, unido a los espesores importantes de reciclado y al relativamente pequeño espesor del pavimento bituminoso, puede traducirse en la aparición de fisuras de retracción con separaciones relativamente largas (superiores a 6 m) y en la reflexión de las mismas en la superficie. Dichas fisuras, que en obras secundarias no suelen tener importancia, en carreteras para tráficos más elevados puede dar lugar a problemas: fatiga acelerada del firme por pérdida de continuidad del mismo en las fisuras, deterioro de éstas como consecuencia del paso repetido de los vehículos, penetración de agua que llega a la explanada, etc. Por ello, en estos casos hay que tratar de evitar la aparición de dichas fisuras en la superficie de rodadura, al igual que en cualquier firme semirrígido sometidos a una circulación intensa.

Para alcanzar dicho objetivo se ha recurrido a varios métodos. No obstante, la larga experiencia acumulada indica que el más eficaz consiste en disminuir al mínimo los movimientos de las losas contiguas y con ello la apertura de las fisuras, mediante la reducción de las separaciones entre las mismas. Las tendencias actuales en este sentido se orientan hacia una prefisuración ordenada, con una localización precisa de las fisuras mediante la creación en fresco de entallas a distancias cortas, antes de iniciar la compactación del material, lo que se traduce además en una solución económica.

Como ya se mencionó en el apartado 7.2.4, existen actualmente varias posibilidades para la formación de juntas en fresco. Estos métodos han ido desbancando a la creación de juntas por serrado en el material endurecido, la cual presenta varios inconvenientes. El primero,

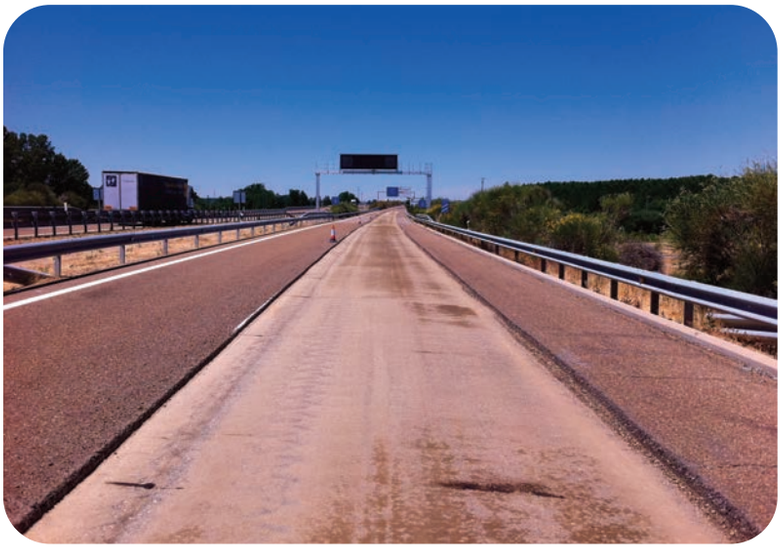


Figura 8.10.- Marcas dejadas por la emulsión de la prefisuración de juntas tras terminar el reciclado

evidentemente, es de tipo económico, pues al coste de las juntas en sí, hay que añadir el que deben disponerse a distancias cortas, para poder evitar de forma eficaz su reflexión en la capa de rodadura. Por otra parte, la baja resistencia de los materiales reciclados obliga a tener que esperar un plazo dilatado antes de poder proceder al serrado sin que se provoquen deterioros en los labios de las juntas. Durante este intervalo, puede producirse una fisuración incontrolada.

Por su menor coste, su mayor sencillez y su eficacia, es más recomendable la realización de juntas en fresco cada 2,5 - 4 m.

El sistema de prefisuración en fresco a espesor parcial, sin inclusión de ningún elemento, ha proporcionado en general resultados satisfactorios en capas de gravacemento o de hormigón compactado. Sin embargo, siempre se plantea la duda de si las entallas no volverán a cerrarse tras el paso de los rodillos y de si, aun sin cerrarse, el debilitamiento que provoquen será suficiente para que se forme una junta en todas ellas. Para evitar estos problemas se han desarrollado algunos equipos que, como ya se ha mencionado, realizan un corte en todo el espesor de la capa tratada y efectúan además algún tratamiento en el surco así formado para que no vuelvan a adherirse los labios del mismo (vertido de emulsión, inclusión de una lámina de plástico flexible o de un perfil ondulado de plástico rígido), los cuales se detallan en el Anejo 3. Por otra parte, estos equipos, por su potencia, permiten la prefisuración en fresco de capas tratadas con recicladoras provistas de regla compactadora, en las cuales, por el contrario, es muy difícil hacer entallas empleando placas vibrantes guiadas manualmente.

Muchos de estos equipos introducen en el surco creado una emulsión catiónica y de rotura rápida con un efecto doble. Por un lado, el agua de la misma retrasa el fraguado, aumenta la relación agua/cemento y debilita la sección favoreciendo la aparición de la fisura. Por

otro, el betún crea una discontinuidad en la capa que permite también la localización precisa de la fisura, al tiempo que forma una película protectora que disminuye la sensibilidad al agua del material tratado y su erosionabilidad.

Además de las juntas de retracción hay que considerar las juntas de trabajo que se forman cada vez que el reciclado se detiene durante un tiempo superior al plazo de trabajabilidad del material (en general unas 2 horas), situación que se produce a veces al final de cada sección transversal reciclada en 3 o 4 bandas, o cada vez al acabar la jornada de trabajo. En estos casos conviene reiniciar el reciclado sobre el material ya tratado, aproximadamente un metro por detrás de la junta.

En cualquier caso, tanto las juntas transversales de trabajo como los solapes longitudinales entre bandas son puntos delicados que requieren un control más exhaustivo del contenido de cemento para evitar que se produzcan sobredosificaciones en los mismos.

8.2.5. Compactación

La composición del equipo de compactación, así como el número de pasadas necesario, deberán definirse mediante un tramo de ensayo.

En el anejo 4 se describe el procedimiento específico para medir la densidad a lograr en obra para materiales reciclados in situ mediante el cual se fija en el tramo de trabajo el número de pasadas de rodillo y la densidad de referencia, que es conveniente efectuar en cada obra o cada vez que cambien las características del suelo a reciclar.



Figura 8.11.- Compactación

En general, es conveniente que el equipo de compactación esté compuesto, como mínimo, por un rodillo vibratorio o uno mixto (que en ocasiones se complementa con otro de neumáticos). En algunas obras se emplean con buenos resultados dos rodillos vibratorios típicos del movimiento de tierras con los que pueda asegurarse que se consigue la compactación deseada en poco tiempo ya que éste está limitado por el plazo de trabajabilidad de la mezcla.

La compactación debe realizarse con la menor demora posible tras el mezclado por un doble motivo:

- para no dejar expuestos a la intemperie los materiales sueltos, con la consiguiente pérdida de humedad. Para ello conviene tener en el tajo algún equipo para compensar la evaporación superficial excesiva, que puede consistir simplemente en una sulfatadora de mano con agua en obras muy pequeñas u otra cuba de agua con rampa (además de la de suministro).



Figura 8.12.- Compactometro para ayudar al operario

- porque los plazos de trabajabilidad de los materiales reciclados suelen ser relativamente cortos (en condiciones favorables nunca más de 2 horas, dependiendo del tipo de cemento empleado y de la temperatura ambiente), salvo que se utilicen retardadores de fraguado. El empleo de estos últimos, así como de cementos con un contenido elevado de adiciones activas, es aconsejable en cualquier caso, sobre todo teniendo en cuenta que en las obras de reciclado es muy importante que unas bandas suelden con las otras. Para ello es esencial que el conglomerante de una banda no haya empezado a fraguar antes de finalizar la compactación de la extendida inmediatamente después.





Figuras 8.13. y 8.14.- Refino y nivelación con motoniveladora

Una compactación enérgica es fundamental para obtener la resistencia necesaria y un buen comportamiento del firme reciclado, por lo que debe alcanzarse la mayor densidad posible. Es recomendable conseguir el 100% PM, y en todo caso el 97% PM como valor medio en el espesor reciclado. Ello requiere la utilización de equipos potentes capaces de transmitir un elevado valor de energía, sobre todo teniendo en cuenta los fuertes espesores usuales en las capas recicladas con cemento.

8.2.6. Refino

Aunque con la maquinaria actual de reciclado se puede conseguir una regularidad superficial aceptable, no se debe adjudicar a estos equipos la responsabilidad de lograr la rasante definitiva si la rasante existente requiere modificaciones o es necesario recuperar el bombeo o los peraltes. En estos casos se debe proceder, antes de iniciar el reciclado, al extendido de un material granular (zahorra preferentemente) con el que se obtenga la rasante y peraltes definitivos. No hay que olvidar que los defectos que se mantengan en la capa reciclada se deben suplir con la capa superior de mezcla bituminosa, mucho más cara y cuyo espesor medio se incrementa al aumentar las irregularidades, a fin de conservar en cualquier punto las rasantes previamente definidas y los espesores mínimos previstos en el proyecto.

No obstante, con el objetivo de recuperar y mejorar la rasante afectada por los equipos de reciclado, conviene realizar un refino con motoniveladora y una primera compactación que afecte al fondo de la capa y que alcance hasta una densidad de al menos el 90 - 92% de la máxima Proctor modificado.



Figura 8.15.- Compatibilidad del reciclado con correcciones puntuales de trazado y peraltes



Figuras 8.16.- Reciclado de una banda



Figuras 8.17.- Reciclado respetando el arcén

Una vez llevado a cabo el refino, se prosigue la compactación hasta alcanzar la densidad requerida, pero ya sobre una superficie cuya regularidad superficial se ha corregido mediante la motoniveladora y en la que, al tener ya una compactación elevada, las deformaciones originadas por el paso de los rodillos son mucho menores que las que se producen en el material recién salido de la recicladora.

Es muy importante recalcar en el tajo que el material obtenido no es sólo un material granular (como la zahorra) y que todo el tiempo que se emplee en obtener la rasante va en contra del plazo de disponible de trabajabilidad y por lo tanto de la calidad final de la obra ejecutada. Así pues, el número de pasadas de la motoniveladora por encima del material recién reciclado debe reducirse al mínimo y por lo tanto se debe contar para este cometido con profesionales adecuados.

Por otra parte, durante el escarificado del firme se produce un esponjamiento del material, al que además se le incorpora un porcentaje de cemento. Todo ello, en el caso de que no se quieran elevar demasiado la rasante, supone un exceso de material a eliminar, lo cual puede realizarse mediante el refino.

El refino del material hasta la cota definitiva debe hacerse retirando unos milímetros en todo el ancho a refinar y nunca rellenando los puntos bajos con materiales procedentes de la eliminación de los puntos altos para evitar laminas delgadas que se despeguen. Los materiales sobrantes del refino pueden ser empleados para reperfilar los arcenes u otras unidades de obra anexas como los bordes de la carretera o la plataforma que se esté reciclando, los caminos, etc. También puede aprovecharse el material dejando la rasante elevada unos milímetros respecto a la situación inicial.



Figuras 8.18 a 8.21.- Diferentes acabados según la granulometría del material reciclado

Esta operación, como ya se ha mencionado, debe llevarse a cabo inmediatamente después de alcanzar una densidad del 90-92% de la máxima Proctor modificado, dado que puede llegar a ser difícil realizarla si se deja transcurrir un plazo excesivo, por la rápida rigidificación del material. Posteriormente se procede a continuar la compactación hasta obtener la densidad requerida. Como todas estas operaciones requieren su tiempo, hay que tenerlas en cuenta para no superar el plazo de trabajabilidad del material reciclado.

El espesor a refinar debe tenerse en cuenta al efectuar el reciclado, previendo un sobreespesor suficiente de escarificado (varios milímetros que en algún caso puede llegar a uno o dos centímetros).

8.2.7. Curado y protección del material reciclado

Una vez terminada la compactación final, y con el menor desfase posible, se debe proceder al curado de la capa reciclada con el objetivo de proteger al material de la intemperie, de la evaporación del agua y del tráfico.

Normalmente se recurre para ello a un riego con emulsión bituminosa de rotura rápida con una dotación mínima de betún residual de 300 g/m2, que se protege con la extensión de gravilla limpia y seca 3/6 (de una dotación comprendida entre 4 y 6 l/m2 y ligeramente incrustada con una pasada de rodillo), en caso de que el tráfico vaya a circular sobre el mismo. Si éste es importante, puede ser incluso aconsejable la extensión de un tratamiento superficial monocapa que además evite la clásica rotura de lunas.





Figuras 8.22 y 8.23.- Curado con emulsión bituminosa

8.2.8. Apertura al tráfico

La apertura al tráfico de la superficie reciclada debe realizarse, tomando siempre las debidas precauciones para que la velocidad sea moderada, con el fin de evitar tanto deslizamientos como desprendimientos superficiales o deterioros de otro tipo. Como ya se indicó, en el caso de requerir una apertura inmediata al tráfico, para evitar todo tipo de daños superficiales se debe conseguir que el valor del índice de carga inmediato IBI sea superior al valor de 50 (norma UNE-EN 13286-47).





Figuras 8.24 y 8.25.- Reciclados de ancho variable con paso del tráfico

En las obras en las que no hay tráfico, las capas superiores de mezcla bituminosa no se extenderán antes de transcurridos siete días salvo que se compruebe que se alcanza cierta resistencia a corto plazo del material reciclado que no se dañará (se concede al cemento esta propiedad de apertura temprana al tráfico) o se dispone de un material adecuado con un valor IBI mayor de 50 (se concede al árido esta propiedad de apertura temprana que al disponer de caras de fractura, por rozamiento interno, soporta el tráfico).

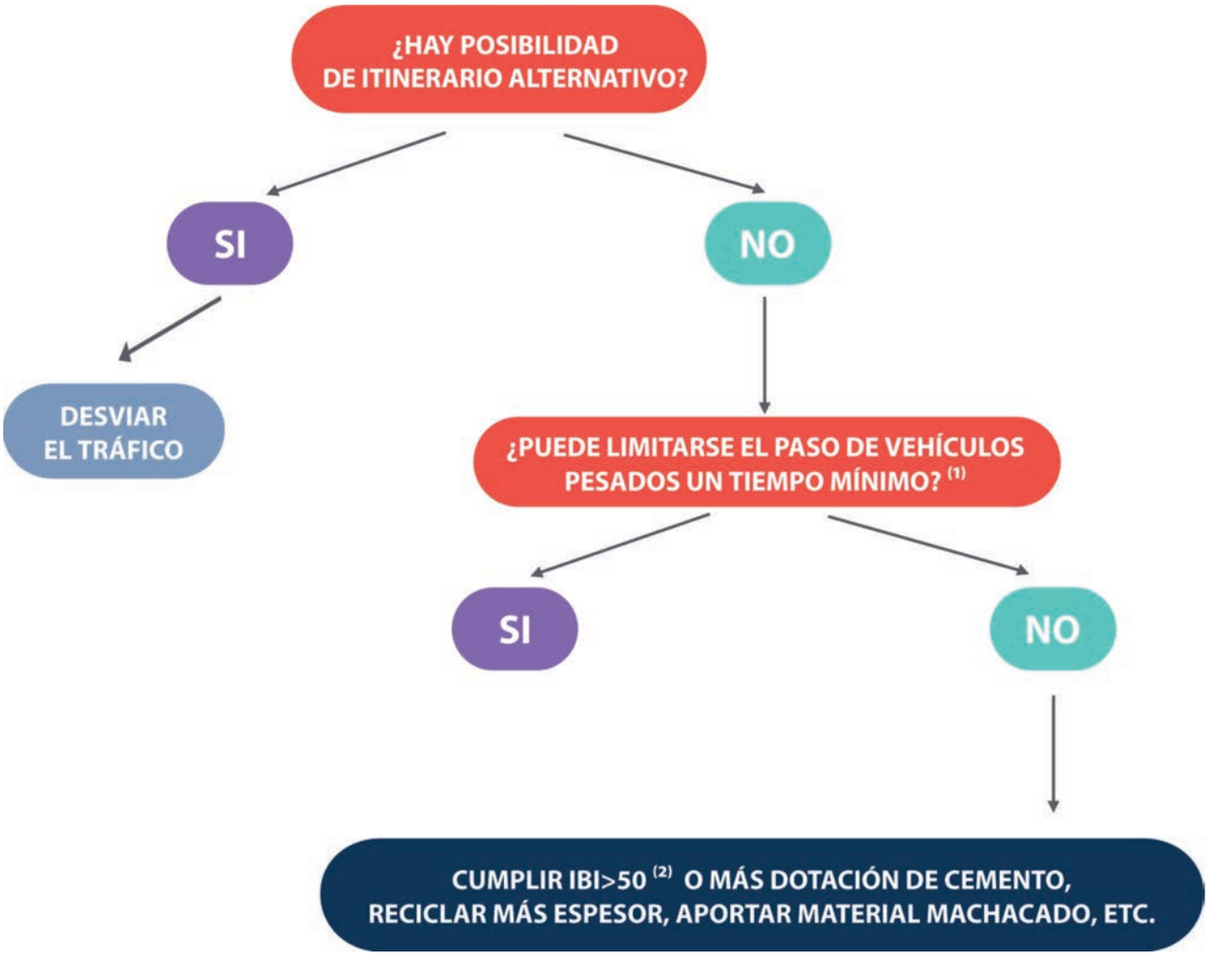
En aquellas obras en las que por las circunstancias de entorno debe darse tráfico lo más rápidamente posible, es conveniente que la capa de reciclado esté protegida cuanto antes, al menos con un simple tratamiento superficial de emulsión y gravilla que proteja la capa del contacto directo de las ruedas.





Figuras 8.26 y 8.27.- Protección superficial del reciclado con gravilla y compactación posterior

En las obras que no se pueda cerrar el paso del tráfico en al menos una semana, la secuencia de preguntas a realizarse es la siguiente[1]:



(1) Es muy importante hacer la distinción entre tráfico pesado, que a lo mejor puede disminuirse antes de ejecutar la obra, y tráfico ligero, que prácticamente apenas daña el pavimento.

(2) Si no se lograra un índice de carga inmediato IBI mayor de 50 (norma UNE-EN 13286-47) pueden llevarse a cabo otras acciones como el empleo de más dotación de cemento para alcanzar mayores resistencias a corto plazo, reciclar más espesor para que el efecto de las cargas pesadas sea menor en la parte considerada en cálculo, incrementar este espesor a reciclar con la aportación previa de árido machacado con caras de fractura o varias de las indicadas anteriormente.

El extendido de las capas bituminosas sobre el reciclado debe hacerse cuanto antes ya que constituyen un buen método de protección de la capa recién formada. No obstante, debe cuidarse que no se desprenda la zona superficial de ésta al circular por encima la maquinaria y los camiones del extendido (en muchas carreteras el tránsito de los camiones de material bituminoso es considerable y resulta muy sig nificativo) y mantener cerrado al resto del tráfico al menos una semana si fuera posible (salvo en los casos comentados).

Inmediatamente antes del extendido de estas capas, se procederá a una buena limpieza de la superficie reciclada y al extendido de un riego de adherencia, preferiblemente con emulsión modificada o termoadherente procedente de un betún duro, que asegure la correcta unión de las capas (condición imprescindible para un buen funcionamiento de este tipo de firmes).





Figuras 8.28 y 8.29.- Reciclado con cemento en una carretera local y en un camino




Figuras 8.30 y 8.31.- Diferentes tipos de carretera tras extender el tratamiento superficial




Figuras 8.32 y 8.33.- Terminación final del reciclado antes de extender la capa bituminosa de rodadura en diferentes carreteras




Figuras 8.34 y 8.35.- Diferentes tipos de carretera tras extender la capa bituminosa de rodadura





Figuras 8.36 y 8.37.- Carreteras en Palencia con más de 18 años de vida una vez recicladas sin reforzar, a pesar de que el agua se acumula en algunas márgenes.

8.3. ASPECTOS A CUIDAR EN UN RECICLADO

Aunque el reciclado de un firme con cemento es una operación que se debe realizar por personal especializado, en algunos casos perteneciente a una empresa subcontratada, y dada su similitud de realización con otras unidades de obra de materiales tratados con cemento, hay una serie de aspectos concernientes a su preparación y a la planificación de la obra que no corresponden a singularidades aisladas, que se deben prever y tener en cuenta para no resolver de manera espontánea:



Figura 8.38. Tráfico en una carretera reciclada

8.3.1. Drenaje

El reciclado del firme con cemento permite recuperar estructuralmente el firme o pavimento de una carretera logrando una nueva capa, pero si el agotamiento se debe a problemas de drenaje (acumulación de agua en las márgenes de la carretera y penetración en las capas inferiores formadas por suelos sensibles), la carretera volverá a presentar deterioros parecidos con el tiempo. Por eso previamente a la realización del reciclado, se deben resolver los problemas de explanada, blandones y drenaje existentes, así como la realización de las cunetas adecuadas. Dicho de otra manera, "el reciclado ayuda considerablemente a lograr una carretera en perfectas condiciones, pero no hace milagros".

8.3.2. Suministro de cemento

Aunque en España no suele haber problemas de este tipo por la proximidad de las obras a algunas fábricas de cemento, resulta muy importante asegurar el suministro continuo de este conglomerante durante la obra, situación que puede resultar complicada si no se ha previsto. El consumo de cemento realizado durante un reciclado es una situación singular por ser un consumo muy elevado durante un periodo de tiempo muy corto (cada día alrededor de 6 cubas de cemento de unas 27 t cada una). Por ello, es muy importante coordinar con la empresa fabricante de cemento con suficiente tiempo de antelación para no encontrarnos con futuros problemas., puesto que no podrá dejar de suministrar a sus clientes para atendernos puntualmente a nosotros,

Además, el transporte también puede complicarse si no se dispone de una cuba nodriza en obra o se coordina adecuadamente, pues es normal que los camiones no puedan descargar en la dosificadora hasta que se consuma el cemento disponible y se pare el proceso de dosificación del reciclado. Este proceso de descarga puede durar unos 20-30 minutos, por lo que, si no se ha previsto, a estas 2 –3 horas/día sin reciclar se suma que los transportistas preferirán ir a otros destinos donde al llegar siempre descarguen sin tener que esperar (como por ejemplo a cualquier central de hormigón).

8.3.3. Dosificación del cemento:

En un reciclado, se recomienda dosificar el cemento en forma de lechada sobre el tambor del equipo reciclador y asegurar un mezclado adecuado. El objetivo es que cada punto del suelo reciclado tenga como mínimo la cantidad predeterminada de cemento y asegurar que no haya ningún punto de la obra sin el mínimo necesario de conglomerante. Para ello, además de comprobaciones puntuales (mediciones), ha de hacerse comprobaciones de la dotación repartida en cada cisterna de cemento en la superficie adecuada (valores medios de la dotación de cemento obtenidos como el volumen de cemento de cada cisterna dividido entre la superficie en la que se extiende), además de mantener continuamente una limpieza obsesiva en la barra de distribución de la lechada.

Además, se debe ser generoso en cuanto a la dotación de cemento para evitar los costosos problemas que se pueden producir a posteriori con dotaciones muy ajustadas cuando se comprueba el valor de la resistencia en las probetas (inferior a la prescrita), debido entre otras razones a la heterogeneidad del material. La simple observación de la superficie antes y después del reciclado permite una evaluación general de la uniformidad de extendido, así como el olor o el aspecto visual de las calicatas de control abiertas a posteriori del reciclado, aunque no asegura que el reparto de cemento haya sido el correcto. En cualquier caso, se deberá atender a lo incluido al respecto en este Manual de reciclado de firmes in situ con cemento.

8.3.4. Suministro de agua

Algo similar puede suceder con el agua, cuyo suministro habrá que asegurar también, especialmente en épocas de sequía o zonas de secano o escasez donde puedan darse este tipo de problemas. Los permisos para poder coger el agua de arroyos pueden tardar mucho tiempo y en muchas ocasiones habrá que recurrir a los abastecimientos urbanos, por lo que será muy adecuado prever de donde se obtienen el agua necesaria para el reciclado y para el curado con el fin de que la superficie no se seque (al menos hasta que se extiende la emulsión).



Figura 8.39.- No se deben reciclar los bordes si no se limpian previamente de materia orgánica y se confirma que hay el mismo material que en la carretera

8.3.5. Anchura del reciclado

El ancho de la sección final reciclado no puede ser mayor que la del firme disponible. No se deben reciclar los bordes, ni siquiera los arcenes, cuando en ellos no haya un firme formado por capas de características similares a las que tiene la carretera y menos si en

estos bordes hay superficialmente vegetación, materia orgánica, suelos plásticos o cualquier otra materia perjudicial para el fraguado del cemento que deberá limpiarse previamente. Si se desea una plataforma mayor, habrá que considerar la obra como un ensanche, y para ello se deberá abrir una caja y aportar un material de características similares al firme existente para reciclar con el mismo (lo que permite la rectificación del trazado y la mejora de algunas curvas), o bien se deberá disponer de un suelocemento de central en la caja abierta para realizar el ensanche.



Figura 8.40.- Problemas de reflexión de las fisuras cada ± 2,40 m en una calzada carente de solape de las bandas de reciclado

Por eso, antes de iniciar el reciclado los bordes del firme deben ser limpiados detalladamente, sin que queden restos de suciedad o materia vegetal, y debe dejarse bien marcado los límites de la anchura del reciclado.

Los equipos normalmente utilizados tienen una anchura de reciclado efectiva de 2,00 a 2,40 m (se fabrican así para evitar requerir un transporte especial), por lo que la sección se tiene que dividir en bandas, considerando como necesario cierto solape en cada una de ellas. Así, cualquier carretera debe reciclarse en varias bandas, con una zona de solape entre ellas de al menos 20 cm en la que habrá que poner especial atención en no sobredosificar conglomerante y agua. El calentamiento de esta parte del rotor puede obligar a una apertura temporal de los inyectores de agua cerrados en esta mini banda de solape, con el objetivo de evitar un excesivo desgaste de las picas situadas en esta parte del mismo. Además, se debe cuidar muy especialmente no formar juntas frías en estas bandas que posteriormente provocan una fisuración longitudinal de la carretera, por lo que todas las operaciones de solape deben realizarse con cuidado y dentro del plazo de trabajabilidad del material.

La última de las bandas que hay que reciclar para finalizar toda la sección de la carretera, corresponde a uno de los bordes de la sección y puede resultar más estrecha que el propio equipo. Esta banda suele irse alternando del borde de la derecha al borde de la izquierda de la calzada según se finaliza la sección reciclada, con el fin de evitar realizar excesivas maniobras del equipo de reciclado e incrementar el rendimiento de trabajo. Si la banda resulta más estrecha que el rotor del equipo de reciclado lógicamente habrá una zona de solape con la banda adyacente que puede tener los problemas citados de sobredosificación.

8.3.6. Longitud de las bandas de reciclado

Dado que no se debe realizar ninguna operación en el material después de transcurrido el plazo de trabajabilidad (2 horas si no se ha determinado en el laboratorio), la longitud de las bandas de reciclado Inicialmente no debe ser mayor de 100 m, pudiéndose ampliar esta distancia si la realización se comprueba que se hace correctamente y la temperatura ambiente es aceptable. Posteriormente y gracias a la experiencia de los equipos de reciclado, esta longitud se amplia y se optimiza para que coincida con el vaciado del equipo dosificador de cemento y sea necesario volverlo a cargar, con el objetivo final de que el tiempo requerido para ello se realice con toda la sección completada, ya reciclada, de la carretera.

8.3.7. Regularidad superficial

No se puede pretender arreglar los problemas de regularidad superficial con la motoniveladora mientras se está realizando el reciclado. Si se retira material reciclado de una zona para aportarlo a otra, además de tener serios problemas de segregación, se reducirá el espesor de capa reciclada en la zona donde se extrajo dicho material.

Considerando que un reciclado copia la rasante de la carretera mejorándola solo ligeramente, para tener una buena regularidad superficial, en los tramos donde se desee modificar esta rasante, se debe aportar material antes de realizar el reciclado como por ejemplo en las curvas que carezcan de peralte. Posteriormente, se procede a reciclar la carretera con el material aportado, de manera que la dotación se ajustará al espesor de este material aportado para que no caigan los valores de las resistencias. Hay que considerar que el espesor de carretera antigua que se recicla es inferior, al formar el material aportado parte del espesor reciclado, y que las características del material que se viene reciclando resultarán diferentes, por lo que estos tramos deben ser cortos o deben ser considerados variantes y estudiar la cantidad de cemento a dosificar adecuada para obtener las resistencias prescritas.



Figura 8.41.- Segregación y nidos de áridos en un arranque

También se debe tener cierto cuidado cuando se introduce el rotor de la recicladora en el suelo para evitar irregularidades, segregaciones o nidos de áridos como el que puede verse en la foto adjunta.

Como ya se ha comentado, tras el material reciclado, se realiza uno o dos ciclos de compactación con el rodillo vibrando en su amplitud máxima para lograr densificar el fondo de la capa, solapando las bandas hasta trabajar en todo el ancho de la sección (o bien en la banda reciclada). Posteriormente la motoniveladora realiza un refino para obtener la rasante, pero este equipo debe remover el material lo menos posible por su tendencia a crear segregaciones y nidos de gruesos, intentando siempre realizar un refino, es decir retirada de material en los puntos altos, evitando la aportación de capas delgadas (evitando la agrupación de gruesos sin envolver en superficie que generen cierta discontinuidad).



Figura 8.42.- Excesiva humedad en el material reciclado

Para conseguir una buena compactación del material y la resistencia prescrita se debe controlar que la humedad del material está próxima a la óptima del ensayo Proctor modificado. Este es el parámetro más difícil de asegurar en obra. Un inadecuado control continuo de la humedad del terreno que conlleve a excesos o defectos de humedad provoca importantes descensos de la densidad, y por tanto en la resistencia del material, que puede dar lugar a fallos puntuales del firme.

Cuando el suelo se encuentra excesivamente seco y no se aporta suficiente agua, se suelen formar segregaciones y dificultades en el amasado para lograr un correcto material que se pueda compactar. En este caso, suele ser importante disponer de un equipo de obra capaz de difuminar agua que ayude a lograr la compactación y evite desecaciones superficiales.

Si el suelo se encuentra excesivamente húmedo, la mezcla se realizará mejor, pero la compactación se complica pues el rodillo colchoneará formando huellas superficiales y blandones en el material difícilmente compactado para obtener las prescripciones adecuadas. En este caso las únicas soluciones son airear el material para que se seque o mezclarlo con otro producto como la cal, que realice esta operación. A efectos orientativos un porcentaje del 1% de cal viva puede llegar a secar el material y reducir la humedad optima de compactación de 3 a 5 puntos.

8.3.8. Curado

El curado es una operación que no por sencilla, resulta menos importante que las demás pues hay que dejar a la losa reciclada madurar y endurecerse. Como no se suele disponer en todas las obras de una cuba regadora de emulsión para el curado inmediato de la capa reciclada, sino que en el mejor de los casos suele aparecer al final de la mañana y al terminar la jornada, se debe prever la disposición en obra de un equipo pulverizador de agua (pero que pulverice agua, no que encharque), capaz de mantener la superficie húmeda, con el fin de que no se produzcan secados superficiales (aunque no haya sol, ni viento). Este equipo debe ser independiente de la cuba necesaria para el suministro de agua que requiere el equipo recicladador, de manera que en todo momento esté asegurado el curado con agua de la superficie reciclada con cemento. Este equipo puede además emplearse en los casos de excesiva sequedad superficial que no permita una correcta compactación del material. Solo en el caso de obras muy pequeñas, se puede emplear un equipo manual, tipo sulfatadora.

8.3.9. Rendimientos

El rendimiento real siempre resulta inferior al previsto cuando al final de la obra se contabiliza la totalidad de los días incluyendo los que el equipo ha estado parado por averías, fiestas o cualquier otra circunstancia. Por ello, la cifra indicada como habitual entre 4.000 y 6.000 m2/día depende de muchos factores y sobre todo de las dimensiones de la obra. En líneas generales, puede indicarse que este rendimiento dependerá de:





Figuras 8.43. y 8.44.- Curado con riego previo con agua y lanza de emulsión de una superficie pequeña



Figura 8.45.- Imprevistos: Pinchazo de una rueda de un rodillo

- El volumen de material a reciclar, y en particular del espesor, de la superficie total y de su forma.
- Las características del firme que hay que reciclar, incluyendo los espesores de cada capa, la naturaleza y las características de los materiales.
- Los equipos utilizados.
- El porcentaje de cemento necesario.

Así, sin contabilizar otros problemas debidos a roturas o averías de los equipos o a la aparición de tuberías o conducciones existentes no señalizadas (en el caso de travesías o zonas urbanas, por ejemplo), al realizar la planificación de las obras, se debe considerar un rendimiento medio inferior al teórico para tener en cuenta todo este tipo de circunstancias.

8.3.10. Tráfico

Aunque ya se ha comentado, hay que intentar por cuestiones de seguridad, y siempre que sea posible, cortar la carretera al tráfico, para lo que habrá que señalizar los itinerarios alternativos e informar adecuadamente y con suficiente antelación al usuario.



Figura 8.46.- ¿Donde aparcar todos los equipos cada día?

En el caso de que este corte al tráfico no sea posible, hay que indicar bien a los operarios de los equipos de reciclado, los riesgos a los que estarán sometidos durante la jornada de trabajo para evitar accidentes fortuitos, señalizar bien las obras, planificar bien la forma de trabajo y sobre todo el transito alternativo de los vehículos (para lo que habrá que disponer al menos de dos operarios más). Además, hay que prever el extendido después del curado con emulsión de un árido de protección (suele ser arena 3-6 extendida con una dotación de 4 a 6 l/m2) que se deberá compactar y barrer correctamente para evitar que salte a los vehículos. Al final del tajo se deberá pintar el eje con pintura amarilla.

Además, en este caso de tráfico, hay que prever donde aparcar todos los equipos al final de cada día, transportándolos a un camino o superficie retirada de la calzada a reciclar, cuando todavía haya suficiente luz para evitar accidentes. En esta superficie se procederá a las necesarias operaciones de mantenimiento realizadas al final del día como la limpieza de los inyectores, etc.

8.3.11. Limpieza

Entre los equipos que no suele aportar la citada empresa recicladora y que hay que disponer siempre en obra está la barredora. No puede existir ninguna obra sin que haya al menos una barredora trabajando todo el tiempo y el reciclado de una superficie no es diferente a otras obras.



Figura 8.47.- Limpieza de la carretera para asegurar la adherencia

Los firmes reciclados resisten a fatiga por el trabajo conjunto entre la capa reciclada y la de mezcla bituminosa, y con el objetivo de salvaguardar esta última y que no se deteriore prematuramente, se debe asegurarse que ambas capas estén perfectamente adheridas. Para ello, antes de extender la emulsión de adherencia se debe asegurar que la superficie se encuentra limpia y se debe proceder a un buen barrido de la capa reciclada, levantando el material y la emulsión de curado (siempre que esta se encuentre suelta). Finalizado pues el reciclado y antes de extender la capa de rodadura, previamente el riego de adherencia, se debe realizar un enérgico barrido con una barredora de cerdas metálicas (no de plástico), retirando todos los áridos sueltos que hayan quedado en superficie y la emulsión de curado que no esté totalmente adherida a la capa reciclada. No importa tanto si la emulsión de curado se desprende o no de la superficie en la que fue aplicada, como que esta superficie se encuentre sana y limpia.



Figura 8.48.- Materia orgánica dejada por los caballos en un ensanche-reciclado

La barredora es un equipo imprescindible, que debe ser muy utilizada en cualquier obra de reciclado, sobre todo si se realiza con tráfico circulando. También se puede realizar la limpieza con un chorro de agua a presión o mediante aspiración.

Además, se debe asegurar la correcta adherencia de la capa superior y la de reciclado, por lo que se tendrá especial cuidado en realizar adecuadamente el riego de adherencia y evitar que sea levantado por los vehículos de obra o por los camiones que transportan la mezcla bituminosa de la capa superior. Esta perfecta adherencia puede comprobarse mediante la extracción de testigos una vez extendidas las capas bituminosas de rodadura.

8.3.12. Tramo de prueba

Antes de iniciar un reciclado, se deben corroborar los datos y resultados obtenidos en los ensayos previos en el laboratorio y que deberían estar incluidos en el proyecto. Para ello, se recicla con los mismos equipos que se vaya a utilizar en la obra, un pequeño tramo de varios metros sin dosificar cemento, ni agua, con el fin de tomar algunas muestras. Con estas, que tienen la granulometría final obtenida tras el paso de los equipos de reciclado, se realiza un ensayo Proctor modificado, obteniendo la humedad óptima y densidad máxima de compactación del material. Una vez añadido el porcentaje de cemento de la fórmula de trabajo a este material y el agua obtenido en la humedad óptima del ensayo Proctor modificado realizado, se fabrican varias probetas con el porcentaje indicado en las prescripciones de la densidad máxima de dicho ensayo (normalmente mayor o igual del noventa y ocho por ciento ≥ 98%) para romper a los 7 días con el fin de comprobar que se cumple la prescripción de resistencia establecida y corroborar los datos inicialmente considerados. En cualquier caso y, dada la veracidad de la granulometría lograda con el material, los resultados de estos parámetros de compactación, humedad óptima y densidad máxima Proctor modificado, así como la dotación de cemento necesaria serán los valores que se deben inicialmente adoptar, aunque resulten ligeramente diferentes de los identificados en la fórmula de trabajo.



Figura 8.49.- Material con bandas muy heterogéneas en el reciclado de una carretera

La realización de este tramo de ensayo debe realizarse con suficiente tiempo de antelación para tener los resultados disponibles antes de iniciar esta unidad de obra (aunque este valor debe establecerse como un compromiso entre disponer del equipo que estará algunos días sin trabajar y los resultados especificados que se establece a 7 días). Por ello, este tramo debe abonarse a parte, teniendo en cuenta su considerable coste.

La realización de un tramo de prueba es imprescindible, pudiendo quedar integrado como parte de la obra, pues permite comprobar entre otros la idoneidad de la fórmula de trabajo, la aceptabilidad de los medios mecánicos propuestos, la relación entre el número de pasadas del equipo de compactación y la densidad obtenida, la medición de esta densidad con cualquier equipo de resultados rápidos y la conformidad del material reciclado con las condiciones especificadas en el laboratorio.



Figura 8.50.- Tira y afloja entre el reciclador y el propietario de la vía

En este tramo de prueba, así como durante la realización de las obras, se debe definir el sistema de trabajo de los rodillos compactadores de acuerdo con lo especificado en el anejo nº 4 de este Manual. Para ello tras el primer ciclo de compactación y el paso de la motoniveladora, se darán varios ciclos completos, terminando con una pasada sin vibrar. Con una sonda nuclear contrastada o cualquier otro equipo con el que se obtengan resultados inmediatos de la densidad del material, se va midiendo este valor en varios puntos tras cada ciclo de compactación, finalizándose cuando se aprecie que las densidades, en vez de aumentar, disminuyen. Es importante mentalizar al maquinista de la importancia de su trabajo, por lo monótono y aburrido que resulta, y ayudarle con equipos auxiliares que suavicen su trabajo como el compactómetro o cualquier otro equipo que le indique dentro del rodillo cuando una banda se encuentra adecuadamente compactada y no debe trabajar más sobre la misma, a la vez que se controla de vez en cuando el número de pasadas y que estas se realizan correctamente.

También resulta muy importante que se controlen las densidades en obra mediante equipos rápidos como la sonda nuclear que estén correctamente contrastados y que permitan correcciones en el plan de compactación si no se obtiene como mínimo la densidad máxima Proctor modificado prescrita (normalmente el noventa y siete por ciento -97%- como mínimo). Los primeros días este control deberá ser intenso, debiendo estar el equipo de control continuamente en la obra.

Si las densidades mínimas no se obtienen, habrá que comprobar aspectos tales como el correcto estado del equipo de compactación, o el número de pasadas (si se cumple el proceso de compactación definido), los valores de la densidad y humedad óptima del Proctor de referencia, los equipos con los que se hicieron este Proctor (si se trata de una maza Proctor de acuerdo con la norma UNE-EN 13286-50 o de un martillo vibrante según la Norma UNE-EN 13286-51) o ver si se cumple el plazo de trabajabilidad.

8.3.13. Controles del material reciclado

Como se comenta posteriormente en el capítulo 9 es muy importante controlar el espesor reciclado mediante la apertura de calicatas realizadas en el material antes de compactar, junto a la banda de carretera sin reciclar que se toma de referencia para medir la profundidad, salvo en la última banda reciclada en la que hay que tener en cuenta el esponjamiento o la reducción del material al compactarlo. Además de controlar el espesor, estas calicatas sirven para comprobar que el material es homogéneo en color y aspecto (como ya se ha comentado, no se puede determinar la cantidad de cemento aportada).

Además, se debe controlar que la velocidad de la máquina de reciclado no resulte superior a 10 m/min con el objetivo de asegurar cierto equilibrio entre la homogeneidad en el mezclado (que el material esté suficiente tiempo en la cámara del tambor) y el rendimiento, de manera que este no se vea perjudicado (una menor velocidad asegura un mejor mezclado, pero compromete la producción).



Figura 8.51.- Extracción de un ancho testigo en una carretera: 10 cm de mezcla bituminosa + 25 cm de material reciclado

9 CONTROL DE CALIDAD

9.1. INTRODUCCIÓN

Como en cualquier tipo de obra, el Control de Calidad es imprescindible para garantizar la obtención de un resultado satisfactorio. En el caso del reciclado, su Plan de Calidad tendrá dos partes: una que controlará la realización de las obras mientras estas se llevan a cabo, y otra que comprobará que el resultado final cumple con todas las exigencias.

Además, antes del inicio de la obra debe verificarse la adecuación de los equipos a las características de la misma (dotación de conglomerante, profundidad de reciclado, eficacia del mezclado), así como su estado de conservación.

En el caso de obras importantes, es necesario realizar previamente un tramo de ensayo a fin de ajustar los parámetros de funcionamiento de los equipos de reciclado (sobre todo la velocidad de avance) y las condiciones de compactación (características de los compactadores y número de pasadas).

En todos los casos es muy importante que haya una comunicación fluida entre el laborante que realiza el control, los operarios que están reciclando y los técnicos que toman las decisiones con el fin de que, cuando se detecta un error (por ejemplo, bajas densidades o resistencias), se modifiquen inmediatamente los parámetros que permitan resolverlo (por ejemplo, mayor número de pasadas de rodillo o mayor dosificación de cemento).

En el Pliego de prescripciones técnicas generales se deben detallar los ensayos a realizar y las especificaciones a cumplir.

9.2. CONTROLES DURANTE LA REALIZACIÓN DE LAS OBRAS

Los puntos a controlar son los siguientes:

1. Materiales de aportación

Se debe controlar la calidad y cantidad del material de aportación y su correcta ubicación en la superficie de la carretera, ya sea el corrector granulométrico o árido de aportación, el cemento, el agua o cualquier otro aditivo. Cada uno de ellos deberá cumplir sus especificaciones, ya que una falta de calidad de estos materiales puede impedir la obtención de una capa reciclada de la calidad exigida.

- **Dotación de conglomerante**

  Cuando el cemento se extiende sobre el firme a reciclar, su dotación se controla mediante una lona o bandeja de superficie y peso conocidos, que se coloca antes

del extendido y se pesa con posterioridad a el mismo. De esta manera, se puede calcular la cantidad de cemento distribuido por unidad de superficie. Para determinar su dotación por m3 es preciso conocer el espesor reciclado y la densidad del material compactado en el punto en que se haya llevado a cabo la medida. Esta operación se realizará con mayor frecuencia en días de viento.

Cuando el cemento se incorpora directamente al tambor de la recicladora en forma de lechada, es necesario controlar el buen funcionamiento de las toberas de inyección y de los paneles indicadores y contrastarlos diariamente con el consumo efectivo de cemento, la superficie de reciclado ejecutada y el espesor del mismo.



Figura 9.1.- Comprobación de la dotación de cemento

Estos controles han de realizarse al menos una vez por la mañana y otra por la tarde e inicialmente, cada cuba.

En ambos casos (en polvo o lechada) es importante comprobar la dotación media dividiendo los Kg de cemento descargados en el dosificador entre los m^2 de superficie reciclada con dicho camión hasta que es necesario volver a cargar otro diferente. Se recuerda que así solo se obtiene un valor medio de dosificación que resulta muy importante chequearlo en todas las obras, pero este control no exime de cualquier otro control de dosificación del conglomerante.

La simple observación de la superficie antes y después del reciclado permite una evaluación general de la uniformidad de extendido, aunque no asegura que el reparto de cemento haya sido el correcto.

El cemento que se emplee en la realización debe ser del mismo tipo y la misma fábrica que aquél con el que se han hecho los ensayos previos.

- **Contenido de agua**

  La humedad del material a reciclar es una característica importante a controlar, ya que de ella dependerá en gran medida la compactación que se pueda obtener y en consecuencia las resistencias mecánicas. Por ello, la adición de agua (que será la correspondiente a la húmeda óptima obtenida en el ensayo Proctor modificado menos la humedad del suelo) debe regularse con el caudalímetro de la recicladora hasta obtener en cada tramo la humedad deseada. Es necesario mantener la humedad determinada como óptima o valores próximos a la misma, ya que, en otro caso, puede ser difícil obtener la compactación deseada, dentro del plazo de trabajabilidad, con los equipos de compactación en régimen normal.





Figuras 9.2. y 9.3.- Apertura de calicatas y toma de muestras

El control se realizará cada 200-500 m2 normalmente con sonda nuclear o cualquier otro equipo que permita obtener resultados rápidos. Es conveniente contrastar periódicamente los resultados obtenidos mediante cualquier ensayo rápido (sonda nuclear, determinación de la humedad mediante carburo, etc.) con el método de secado en estufa, mucho más lento pero más preciso.

En cuanto a la calidad del agua, deben seguirse en principio las mismas reglas que en la fabricación de hormigones y tener especial cuidado con el agua procedente de depuradoras o en zonas de riego en las que el agua puede estar contaminada con productos químicos que pueden influir en el fraguado del cemento.

2. Granulometría del material reciclado

La granulometría permite conocer la eficacia de la disgregación, así como la homogeneidad de la capa reciclada. También se obtiene una confirmación de que la velocidad de avance del equipo de reciclado no es excesiva (elevadas velocidades aseguran grandes rendimientos pero comprometen la homogeneidad del mezclado).

Se debe realizar al menos un análisis granulométrico diario, debiendo ser los ensayos más frecuentes al iniciarse las obras.

En líneas generales, el contenido de finos debe ser tal que éstos rellenen todos los huecos que dejan los tamaños gruesos. Como orientación, indicar que el contenido final de la mezcla de los tamaños que pasan por el tamiz de 5 mm debe ser superior al 35 – 40 %.

Recordar siempre que una buena granulometría asegura una buena compacidad, y ésta una buena durabilidad de la obra.

3. Homogeneidad de la mezcla

La comprobación se hará tanto visualmente, como mediante la toma de muestras aleatoria de las calicatas que se realizarán del material reciclado antes de su compactación, tanto en sentido longitudinal, como en sentido transversal en que suele ser más difícil de conseguir dicha homogeneidad. Además de la granulometría, pueden determinarse la densidad seca máxima, resistencias mecánicas, módulos, etc.



Figura 9.4 a 9.6.- Tamices y realización de probetas durante la realización de las obras

4. Compactación

El control de la densidad alcanzada presenta alguna complicación porque, habida cuenta de la heterogeneidad de los materiales reciclados, es difícil definir una densidad de referencia (o un intervalo de variación de la misma) con la cual

comparar las obtenidas en las mediciones. Por ello, es muy conveniente tratar de correlacionar dichas densidades con las características del proceso de compactación (número de pasadas, plan de la misma, intervalo entre el mezclado y el final de la compactación).

Con el ensayo Proctor modificado (UNE-EN 13286-2 y UNE-EN 13286-50), o bien con el ensayo de compactación con martillo vibrante (UNE-EN 13286-51) pueden obtenerse los valores de densidad máxima y humedad óptima de referencia. En obra se controlarán la densidad y humedad in situ, con sonda nuclear generalmente o con cualquier equipo de resultados rápidos. Para ello, el vástago de la sonda se bebe introducir hasta casi el fondo de la capa (y no hasta la mitad), con el objeto de obtener la densidad media de toda capa (que no es la densidad en el medio de la capa).

Se obtendrá una densidad seca media en cualquier punto que deberá resultar no inferior al noventa y siente y por ciento (97%) de la máxima Proctor modificado.

En cada una de las bandas de reciclado se realizarán determinaciones de densidad mediante sonda nuclear en emplazamientos aleatorios, con una frecuencia mínima de una cada 200 m^2 de superficie.

En el anejo 4 se detalla el procedimiento de comprobación de la densidad máxima que se puede alcanzar en obra con el equipo concreto de cada una de ellas.

Las probetas de laboratorio para la comprobación de la calidad de la capa construida deben compactarse siempre a la misma densidad (como máximo) que la que se obtenga en obra.





Figuras 9.7 y 9.8.- Medición de la densidad con sonda nuclear

5. Profundidad del tratamiento

Es importante verificar el espesor de la capa tratada. Éste viene condicionado por la profundidad de escarificado, pero se ve modificado por los materiales aportados (cemento y, en su caso, áridos), así como por el paso de los rodillos y las operaciones de refino. El espesor real no debe ser inferior al especificado, ni superar excesivamente a este último, puesto que entonces se disminuye la dotación efectiva de cemento por centímetro reciclado con la consiguiente disminución de resistencias. La única medida directa posible es a través de testigos extraídos después de realizar la compactación, pero el carácter destructivo de estas medidas limita su número a uno o dos por km. Durante la realización, y especialmente al inicio de la misma, es conveniente realizar algunas calicatas de comprobación del material reciclado, antes de iniciar la compactación. En cada jornada de trabajo, se abrirá una calicata por la mañana y otra por la tarde.



Figura 9.9.- Obtención de testigos de casi 40 cm de material reciclado

6. Aspecto superficial y geometría

Se comprobará que la superficie terminada reúne las condiciones geométricas requeridas, presentando un aspecto uniforme, con ausencia de segregaciones y con las pendientes y dimensiones especificadas.

9.3. Controles sobre la capa terminada

Se deben establecer lotes de una dimensión máxima no superior, en general, a 3.000 m^2 o a la superficie construida en medio día, a los que se aplicarán unos criterios de aceptación o rechazo. Se estudiarán los siguientes puntos:



Figura 9.10.- Testigos extraídos de una capa reciclada

1. Espesor del material reciclado

En el apartado anterior ya se ha indicado la conveniencia de extraer al menos un testigo por Km, si bien esta operación puede plantear dificultades a edades tempranas. Aún con la dificultad de limitar inferiormente la capa tratada, se ha de poder asegurar que el espesor medio de reciclado es igual o superior al especificado y que el mínimo en cualquier punto no sea inferior el especificado. Si ello, ocurriera, se aplicarán las sanciones económicas previstas, se compensará la merma con mezcla bituminosa, o se demolerá y reciclará de nuevo la capa tratada de acuerdo con la opinión del Director de las Obras.

Estos testigos sirven también para comprobar la densidad alcanzada y la resistencia a compresión simple o a tracción indirecta, así como el módulo de elasticidad.

2. Resistencias mecánicas

Durante la realización se deben fabricar probetas de material reciclado con la maza del Proctor modificado (norma UNE-EN 13286-50) o con la ayuda de martillo vibrante (Norma UNE-EN 13286-51), procurando que la densidad de compactación sea lo más parecida posible a la exigida en obra.

El número de probetas es variable, dependiendo de varias condiciones:

- Se debe realizar al menos una toma diaria de material, a fin de confeccionar como mínimo dos series de tres probetas para ensayar a 7 días. Asimismo, cada 2 ó 3 días es conveniente fabricar una serie de tres probetas para romper a veintiocho días.
- Si el reciclado se efectúa con dos equipos trabajando en tándem, se debe fabricar como mínimo dos series diarias por cada uno de ellos.

Antes de confeccionar las probetas, de 15 cm de diámetro y 18 cm de altura, se eliminará el material retenido por el tamiz 40 UNE.

Aunque el control se realiza fundamentalmente para evaluar la resistencia a compresión simple (norma UNE-EN 13286-41), es recomendable fabricar alguna serie para romper a tracción indirecta (norma UNE-EN 13286-42) y para determinar el módulo de elasticidad (UNE-EN 12390-13).



Figura 9.11.- Sencilla nivelación visual durante el reciclado

Cuando en un lote se obtengan en las probetas valores anormalmente altos o bajos, se extraerán testigos para realizar ensayos de información. Sus resultados deberán compararse con los otros testigos procedentes de otros lotes con características similares de los materiales a reciclar y en las que resistencias obtenidas en la probeta no sean inferiores a las especificadas. Esta comparación permitirá al Director de las Obras adoptar las medidas oportunas de aceptación del lote, eventualmente con sanción económica o su rechazo.

3. Nivelación

La superficie acabada no debe rebasar a la teórica en ningún punto, ni diferir de ella en más de 15 mm.

4. Anchura de reciclado

En ninguna sección el ancho de la capa reciclada debe resultar menor que el ancho estipulado en el proyecto. Por otra parte, debe comprobarse que en ningún punto se recicla material de los bordes (arcenes o bermas que no dispongan del mismo firme o tengan materia vegetal). Este aspecto es muy importante ya que frecuentemente estos bordes están formados por materiales muy diferentes de los del resto de la calzada, y lo que pueda parecer un intento de mejorar su capacidad estructural puede traducirse en un empeoramiento de la capacidad de la misma carretera. Siempre puede hacerse una labor previa de sustitución de estos materiales malos por otros más nobles antes de proceder al reciclado de toda la sección.

5. Regularidad superficial

La superficie de la capa reciclada debe presentar una textura, uniforme, sin segregaciones y con las pendientes adecuadas. En ningún punto de la misma deberá retener agua.

Se debe conseguir un índice de Regularidad Internacional (IRI) inferior a 5 en la totalidad del tramo, y de 4 al menos en un 50% de su longitud.

6. Deflexiones

Las medidas de deflexiones pueden servir para la estimación de la capacidad de soporte alcanzada:

- a corto plazo (3-7 días después del reciclado) permiten comprobar la homogeneidad del tratamiento y detectar alguna zona anormalmente débil que requiera un sobreespesor de mezcla bituminosa. No obstante, estas medidas son costosas y difíciles de realizar sin interferir en el ritmo de la obra si ésta es de cierta importancia
- a largo plazo (28 días o más después del reciclado) para evaluar la capacidad de soporte del firme reciclado. Estas medidas no son, en principio, necesarias

7. Control de grietas reflejadas en el pavimento

Este control visual debe enmarcarse en el seguimiento del firme reciclado para su correcta conservación, la cual deberá incluir eventualmente un ponteado de las grietas.

10 ESTUDIO DE COSTES

10.1. INTRODUCCIÓN

Cuando se comparan desde un punto de vista económico diferentes alternativas para un firme, tanto si se trata de uno nuevo como de la rehabilitación de uno existente, se debe contemplar no solamente el coste de construcción, sino también los de mantenimiento y, conservación entre los que se incluyen no solo los correspondientes al refuerzo, sino los costes de los usuarios (y en particular los originados por las operaciones de mantenimiento) a lo largo del periodo de análisis. A la suma de los anteriores hay que restar el valor residual del firme al final de dicho periodo.



Figura 10.1 a 10.4.- Diferentes reciclados de caminos y carreteras

En líneas generales, puede decirse que la solución de un vial que necesita una reparación, ya sea o no preventiva, pasa por el estudio de reciclado del mismo ya que aporta soluciones muy competitivas desde el punto de vista económico y de rapidez de realización. En este capítulo se estudiará únicamente el coste de construcción de una capa reciclada.

10.2. COSTE DE CONSTRUCCIÓN DE UNA CAPA RECICLADA DE 25 CM DE ESPESOR

En el caso del reciclado con cemento de un firme, su coste de realización depende fundamentalmente de los siguientes factores:

- **volumen de material a reciclar**, y en particular:
  - del espesor que hay que reciclar: a mayor espesor, menor rendimiento y por tanto mayor coste.
  - de la superficie total: cuanto menor es la misma, más repercusión tienen algunos los costes fijos, como por ejemplo el traslado de la maquinaria.
  - de la forma de la superficie: los anchos proporcionales al ancho de trabajo de la maquinaria reducen el número de operaciones; mientras que las formas irregulares, por ejemplo, por la presencia de aparcamientos, disminuyen considerablemente el rendimiento.
- **características del firme que hay que reciclar**, incluyendo en las mismas tanto los espesores de cada capa, como la naturaleza y características de los materiales: cuanto más duros sean y más grande su tamaño, mayor será también el desgaste de las picas y de la carcasa de la recicladora y, por tanto, el coste derivado tanto de la reposición de elementos como de la reducción del rendimiento.
- **equipos utilizados para el reciclado:** los de mayor potencia tienen un coste directo mayor, pero también mayores rendimientos, por lo que el coste final no es necesariamente más elevado. Además, estos equipos permiten obtener una mejor calidad de los materiales. Por otro lado, los equipos que inyectan el cemento en forma de lechada directamente dentro de las recicladoras permiten ahorrar conglomerante en comparación con la extensión en polvo, gracias a que logran una mejor dosificación y a que se evitan perdidas por el viento.
- **porcentaje de cemento necesario,** que depende lógicamente de las características del material y que tiene un doble efecto sobre el coste total del reciclado:
  - por el coste en sí del conglomerante, que tiene un gran peso en el conjunto
  - por la influencia en el rendimiento de la obra, que tiene asimismo un efecto que no hay que dejar de considerar. Así, por ejemplo, en una obra en la que se emplee un dosificador de lechada, el aumentar la dosificación de cemento del 3,5% al 5% puede traducirse en una reducción importante del rendimiento. A la disminución de velocidad, por el mayor caudal de lechada que hay que introducir en la recicladora, hay que añadir el mayor número de paradas para cargar el conglomerante, con una duración de cada una de ellas que puede llegar a ser de casi media hora por cuba. Estas operaciones pueden reducir el tiempo neto de trabajo entre 2 y 3 horas diariamente.

A la vista de todos estos factores es fácil deducir que el coste de un reciclado puede variar de forma muy considerable de una obra a otra, en función, sobre todo, del volumen de material a reciclar y de las necesidades de cemento.

Así, para un caso general de un r**eciclado en un espesor de 25 cm** se pueden diferenciar los costes que se detallan en los apartados siguientes[1].

10.2.1. Cemento

Lógicamente, dicho coste es directamente proporcional a la dosificación de cemento necesaria. Aunque el coste en sí del cemento depende del emplazamiento de la obra y de la situación del mercado en el momento de su realización, el precio obtenido en este caso como media de las bases empleadas en 2018 es de 97,74 €/tonelada.

La siguiente tabla muestra el coste del conglomerante en función de su dosificación, asumiendo una densidad seca de material compactado igual a 2.200 kg/m^3:

Tabla 10.1. Coste del cemento en un reciclado

Dotación de conglomerante	***3 %***	***4 %***	***5 %***
Densidad	2.200 kg/m^3	2.200 kg/m^3	2.200 kg/m^3
Espesor	25 cm	25 cm	25 cm
Precio	97,74 €/ton	97,74 €/ton	97,74 €/ton
Dosificación (k/m^2)	16,5 k/m^2	22 k/m^2	27,5 k/m^2
Total cemento	1,61 €/m^2	2,15 €/m^2	2,69 €/m^2

10.2.2. Equipo de reciclado

La repercusión por m^2 del coste del equipo de vía húmeda, formado básicamente por la dosificadora de lechada, la máquina recicladora, la motoniveladora, al menos una cisterna de agua y el o los rodillos de compactación, está muy condicionado por el volumen de la obra. Además, como se ha mencionado previamente, en obras pequeñas, el coste del transporte puede incidir de manera considerable.

[1] *Los precios unitarios se han obtenido como la media de las bases de precios comerciales existentes: Base Centro, PREOC, Base ITEC, CICCP Valencia y Base de precios del Gobierno Vasco.*



Figura 10.5.- Rodillo detrás de un equipo de reciclado in situ con cemento

Aunque hay factores de clara influencia en el coste, como la naturaleza del material que hay que reciclar (la diferencia entre un macadam cuarcítico y uno calizo puede llegar a superar las 0,15 €/m2 por el consumo de picas, la velocidad de avance del equipo y el desgaste de la propia carcasa y otras partes de la máquina) o la granulometría del mismo (un macadam de mayor tamaño reduce el rendimiento), puede establecerse un coste medio en función del tamaño de la obra:

- obras de gran volumen (más de 50.000 m^2):

  De forma general, se puede estimar la repercusión del equipo en 0,05 - 0,06 €/m^2 por centímetro reciclado de espesor según se describe a continuación.
  Este coste, en el caso de un reciclado de 25 cm de profundidad con un rendimiento medio del orden de 4.000 m^2/día, se puede descomponer en los siguientes conceptos:

Tabla 10.2. Coste de los equipos básicos en un reciclado

Concepto	***Coste €/m²***
Transporte y retirada de todo el equipo	0,18
Desgaste de picas (según características del material)	0,13
Recicladora + Repartidor de cemento	0,80
Equipo de nivelación, aporte de agua y compactación	0,30
Total equipos =	**1,41**

Esta descomposición es puramente orientativa puesto que hay una serie de factores variables. Así, la incidencia del transporte, valorado en 9.000 € se reduce al incrementar el tamaño de la obra; en el desgaste de picas influye mucho la naturaleza del firme; y los tres últimos sumandos dependen del rendimiento obtenido. En el caso de obras de superficie muy superior a los 50.000 m^2 este coste se puede reducir a valores de 1,05 - 1,08 €/m^2.

- **obras de pequeño volumen:**

  En estos casos, el transporte tiene un gran peso en el coste total de la obra. Para calcular la incidencia de la maquinaria de reciclado, una regla sencilla consiste en calcular, con un rendimiento razonable (habitualmente, entre 2.500 y 5.000 m^2/día), el número de días de reciclado y multiplicar por 7.000 € cada día de trabajo. A ello habría que añadir 9.000 € por el transporte de la maquinaria y otros conceptos.

  Por ejemplo, para reciclar 10.000 m^2 se necesitarían tres días de trabajo, lo que supondría un coste aproximado de 30.000 €, es decir, unos 3,0 €/m^2; mientras que para reciclar 20.000 m^2 se tendría un coste del orden de 44.000 €, correspondientes a cinco días de trabajo (el rendimiento suele aumentar con el volumen de la obra) y la partida alzada de transporte; es decir unos 2,2 €/m^2. En cualquier caso, éstas son cifras medias que conviene contrastar con las empresas especializadas en este campo cuando se quiera realizar una obra de pequeñas dimensiones, pues influyen otros muchos factores.



Figura 10.6.- Algunos de los equipos auxiliares en un reciclado

A este respecto, conviene destacar la existencia en el mercado español de varias empresas especializadas en la técnica del reciclado in situ, dotadas de equipos modernos y de personal con experiencia, las cuales suelen trabajar como subcontratistas en este tipo de obras así como en las de estabilización y a las que solamente hay que facilitar el cemento, el agua y los equipos complementarios en algunos casos.

10.2.3. Equipos auxiliares

Como equipos auxiliares hay que incluir una motoniveladora para efectuar el refino y, en caso necesario, corregir la rasante de la calzada, con un coste aproximado de 83 €/h, una cisterna para suministrar el agua a la recicladora o, en su caso, al equipo dosificador de lechada, con un coste aproximado de 32 €/h y un rodillo compactador con un coste aproximado de 54 €/h.

Con ello, la repercusión de esta maquinaria auxiliar puede valorarse en

$$(169\ €/h \times 8\ h/día) / 4.000\ m^2/día = 0{,}34\ €/m^2$$

Otro equipo que hay que considerar es el equipo para la realización de juntas en fresco en caso de emplearse. La repercusión de esta maquinaria, suponiendo el equipo de inyección de emulsión en la acanaladura formada, es de aproximadamente 0,40 €/m^2, considerando la unidad de medida la superficie de reciclado.

10.2.4. Otros costes

A los costes anteriores hay que añadir el del riego de curado y protección de la capa reciclada, de aproximadamente 0,28 €/m^2; y, cuando sea necesario, el coste del material granular de aportación para corregir la granulometría o la rasante de la calzada o para complementar el espesor a reciclar.

10.2.5. Coste total

Agrupando los distintos sumandos mencionados anteriormente, el **coste de un reciclado con cemento en una profundidad media de 25 cm en el caso de una obra de 50.000 m² de superficie** puede variar entre los límites que se indican a continuación:

Tabla 10.3. Coste total por m² de un reciclado de 25 cm de espesor

Superficie obra ≥ 50.000 m²		***Mínimo***	***Máximo***
		€/m²	€/m²
1. Cemento		1,61	2,69
2. Equipos	Equipo de reciclado	1,40	1,60
	Equipos auxiliares	0,34	0,40
3. Riego de curado		0,28	0,28
	Total reciclado 25 cm	3,63	4,97

De forma similar, para un espesor medio de 30 cm se pueden considerar los costes siguientes:

Tabla 10.4. Coste total por m² de un reciclado de 30 cm de espesor

Superficie obra ≥ 50.000 m²		***Mínimo***	***Máximo***
		€/m²	€/m²
1. Cemento		1,93	3,21
2. Equipos	Equipo de reciclado	1,60	2,00
	Equipos auxiliares	0,34	0,50
3. Riego de curado		0,28	0,28
	Total reciclado 30 cm	4,15	5,99



Figura 10.6.- Equipo de reciclado en una autopista

Así pues, en obras de unos 50.000 m^2 el coste total, incluyendo la realización de juntas, varía en general entre 3,63 €/m^2 para un contenido de cemento del 3% y un espesor de reciclado de 25 cm y 5,99 €/m^2 para un contenido de cemento del 5% y un espesor de reciclado de 30 cm; mientras que en las obras de pequeño volumen estas cifras pueden incrementarse ligeramente.

La principal ventaja del reciclado in situ con cemento está en que este último es un conglomerante de coste muy estable, sin apenas variabilidad no previsible, ni dependencia del negocio exterior, siendo la tendencia de crecimiento reducida y lineal.

10.3. COMPARATIVA DE COSTES ENTRE SECCIONES REFORZADAS Y RECICLADAS

10.3.1. Sección para tráfico pesado intenso

El reciclado con cemento es una solución también empleada en las categorías de tráfico más pesado o en las autovías cuando el firme del carril lento se encuentra deteriorado (rotura de las capas bituminosas y salida de finos a superficie) con el objetivo de recuperar la capacidad de soporte perdida. Para ello, se fresa una parte de las capas bituminosas (8-10 cm) y se recicla el resto junto a la capa inferior de suelocemento o zahorra artificial obteniendo una capa de elevada resistencia a las tensiones generadas por las cargas del tráfico. Posteriormente se reponen las mezclas fresadas y, en su caso, se refuerza el conjunto. En ocasiones, es preciso sanear la explanada.

La competitividad de estas secciones en cuanto a coste, así como su mayor durabilidad, puede comprobarse en los datos adjuntos:

Tabla 10.5. Firme indicado en la norma 6.3 IC del Ministerio de Fomento Español (2018) para deflexiones de cálculo entre 150 y 200 x 10^{-2} mm.

CATEGORÍA TRÁFICO	SECCIÓN REFUERZO con Mezcla bituminosa	COSTE €/m^2	SECCIÓN Mezcla bituminosa + RECICLADO	COSTE €/m^2	AHORRO €/m^2	(*) Nª VECES QUE SOPORTA DE MÁS LA SECCIÓN RECICLADO
T22 IMD=200 a 400	18 cm.	23,94	12+30 cm.	20,96	2,98 (-14,22%)	57

Tabla 10.5. Firme indicado en la norma 6.3 IC del Ministerio de Fomento Español (2018) para deflexiones de cálculo entre 150 y 200 x 10^{-2} mm

CATEGORÍA TRÁFICO	SECCIÓN REFUERZO con Mezcla bituminosa	COSTE €/m²	SECCIÓN Mezcla bituminosa + RECICLADO	COSTE €/m²	AHORRO €/m²	(*) Nª VECES QUE SOPORTA DE MÁS LA SECCIÓN RECICLADO
T31 IMD=50 a 200	15 cm.	19,95	10+30 cm.	18,3	1,65 (-9,02%)	99
T42 IMD=25 a 50	8 cm.	10,65	5+25 cm.	10,64	0,01 (-0,09%)	760

10.3.2. Sección para tráfico pesado reducido

Los 5 cm de cobertura del reciclado pueden ser mezcla en frío o incluso un doble tratamiento superficial por lo que resultaría mucho más económica la sección de reciclado.

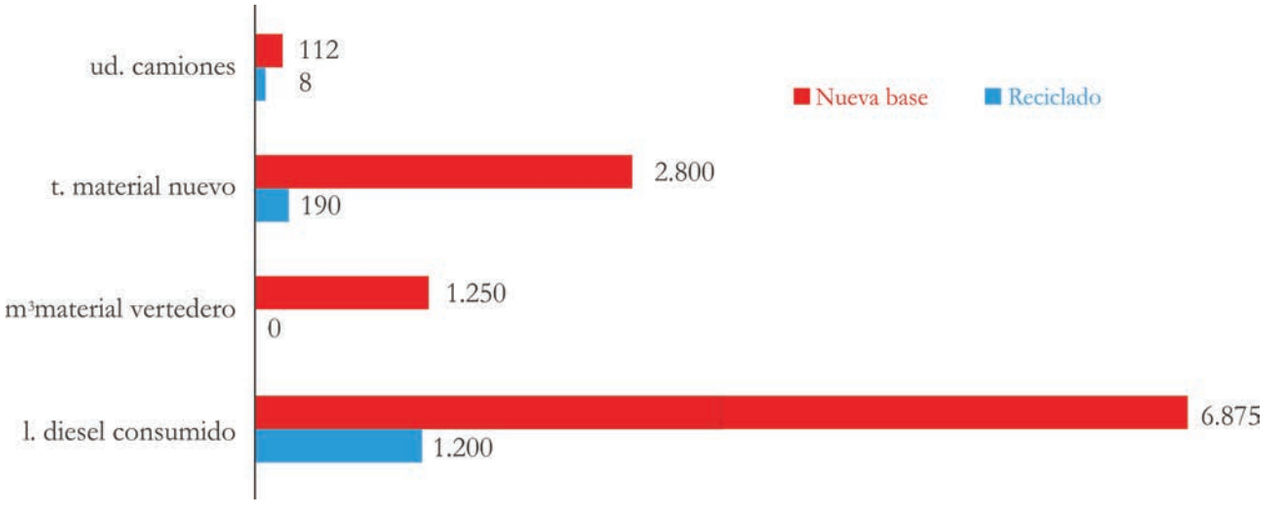
A todo esto, hay que sumar ciertas ventajas sociales no contabilizadas que la opción reciclado in situ con cemento conlleva, como la reducción del plazo frente a otras alternativas, el ahorro de energía y materiales respecto a una base nueva, además de lograr mucha mayor capacidad estructural, y la reducción de operaciones y tiempo que puede resultar de gran incomodidad para los usuarios de la carretera. Realizando unos cálculos sencillos tenemos que:

- Camiones/kilómetro necesarios en un reciclado de 25 cm de espesor de una carretera de 7 m ancho (3 % de cemento) = 4 camiones de 28,9 t cada uno (1000 m x 7 m x 16,5 K/m^2 = 115,5 t) de material nuevo (cemento).
- Camiones/kilómetro necesarios en el caso de un refuerzo bituminoso = 70 camiones (por cada capa 1000 m x 7 m x 0,06 m x 2,4 t/m^3 = 1008 t = 35 camiones).
- Camiones/kilómetro necesarios en el caso de un refuerzo con base granular (zahorra artificial) = 128 camiones (por 20 cm de ZA + 5 cm de aglomerado, se añaden 100 camiones de ZA + 28 de aglomerado).

Según la Guía realizada entre la Portland Cement Association (PCA), el National Concrete Pavement Technology Center y la Iowa State University *"Guide to fyll-depth reclamation with cement"* de marzo de 2017, solo se requieren 8 camiones frente a 112 camiones, 190 t de

material nuevo frente a 2.800 t, sacar 0 m³ de material frente a 1.250 m³ y 1.200 l de gasoil frente a 6.875 l en cada kilómetro para una carretera de 7m de ancho en la que se recicla un espesor de 15 cm (ver figura 10.7).

Figura 10.6.- Comparación por kilómetro de una carretera de 7 m de ancho entre la solución de un firme nuevo y un reciclado de 15 cm de espesor



A1 ANEJO 1

PROPUESTA DE PROYECTO DE RECICLADO IN SITU CON CEMENTO

El proyecto de cualquier tramo reciclado in situ con cemento es un proyecto de una obra de conservación o rehabilitación, por lo que su estructura carece de las características de una obra nueva como el estudio de trazado, por lo que debe tener constar compuesto al menos de 4 documentos como cualquier otro proyecto. Estos son:

- Memoria y sus anejos
- Planos
- Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares
- Presupuesto

1. Memoria y sus anejos

La memoria es un documento donde se incluye un resumen de todo el proyecto de manera que el lector sea capaz de comprender este y los detalles incluidos en el mismo. Por eso debe comprender al menos la exposición de la situación previa y los antecedentes, los factores técnicos, económicos, sociales y medioambientales considerados, una justificación de la solución adoptada y el objeto y las características principales de las obras proyectadas (descripción del proyecto que debe incluir la descripción general de toda la obra y un resumen de cada uno de los anejos).

Además, debe incluir los datos previos, los métodos de cálculo, los ensayos efectuados y el dimensionamiento de las obras (cuyo detalle y cuyo desarrollo deben figurar en los anejos), la necesidad o no de la apertura inmediata al tráfico, la realización o no de juntas mediante cualquiera de los sistemas descritos en el anejo 3, así como una relación de todos los documentos que integran el Proyecto.

Hay diversos anejos que incluirán escasa información para el reciclado, como los de antecedentes (donde se incluyen los documentos que justifican esta realización), la geología de la zona y procedencia de materiales (si se requiere), climatología, hidrología y efectos sísmicos, drenaje (recordaremos que el reciclado del firme es una solución ventajosa y muy favorable pero no realiza milagros, los problemas debidos a un mal drenaje continuaran apareciendo), estructuras, señalización y balizamiento, integración ambiental (ya se ha comentado en el capítulo 1, apartado 1.5, las ventajas medioambientales), reposición de servicios, plan de obra, clasificación del contratista, justificación de precios, formula de revisión de precios (si se considera que el periodo necesario para la obra lo requiere) o el estudio

adecuado de gestión de residuos de construcción y demolición (que en el caso de un reciclado será inexistente).

Pero hay otros anejos, que se pueden considerar muy importantes a los efectos de obtener datos para el reciclado. Estos son:

- **Tráfico.** Cuando un pavimento llega al final de su vida útil no lo hace por el efecto del vehículo más cargado sino por el efecto acumulado de todos los vehículos que han transitado sobre él. En consecuencia, para dimensionar un pavimento será necesario conocer tanto el nivel de tráfico como el período de proyecto o duración prevista para el mismo. Con ambos datos se podrán estimar los vehículos acumulados que circularán sobre el pavimento durante su vida de servicio. Debe, por tanto, analizarse el trafico circulante en la carretera, dividiéndolo entre vehículos ligeros y pesados, y obteniéndolo a partir del número de vehículos que vayan a pasar diariamente por el pavimento.

  Desde el punto de vista el cálculo del firme sólo tiene interés los vehículos pesados (camiones, autobuses, etc.). Los niveles de tráfico se clasifican de acuerdo con la tabla 6.1. incluida en el capítulo 6, Dimensionamiento, de acuerdo con el número medio diario de vehículos pesados que circulan o se prevea que vayan a circular por el vial a lo largo del año de puesta en servicio (ver también la tabla 6.2, Determinación de los tráficos de proyecto en función del ancho de la calzada).

- **Firmes y pavimentos.** Se deben definir y justificar todas las secciones de firme adoptadas, no solo de reciclado en función de la categoría de tráfico y explanada, sino también de las estructuras.

  Una vez definida la necesidad de un reciclado del firme in situ con cemento y el tipo de reciclado que se desea obtener de acuerdo con lo establecido en el capítulo 4, Tabla 4.1, Tipos de reciclados, el firme se calcula de acuerdo con el catálogo definido en el capítulo 6, Dimensionamiento, tabla 6.3, Reciclado tipo A (Resistencia a compresión a 7 días = 2,5 MPa) o Tabla 6.4, Reciclado tipo B (Resistencia a compresión a 7 días = 3,5 MPa), o bien mediante un cálculo analítico considerando los valores incluidos en el anejo 2.

  En el anejo de firmes y pavimentos se deberá incluir toda la información recogida sobre el firme existente en la carretera, así como los datos obtenidos al realizar las calicatas y testigos de la carretera y todos los ensayos de laboratorio citados en los capítulos anteriores de este Manual.

  Obtenidas las capas que forman el firme actual y tramificada la carretera según el firme disponible, se procede a los ensayos de obtención de la fórmula de trabajo de acuerdo con lo definido en el capítulo 5. Para ello se determina la gra-

nulometría de los productos resultantes del escarificado y, en su caso, las medidas correctoras necesarias, la humedad óptima y densidad máxima del ensayo Proctor modificado que definirán la humedad y densidad adecuadas en cada tramo, el tipo y contenido de cemento y el plazo de trabajabilidad del material mezclado. Además puede incluirse, si se considera apropiado, la sensibilidad de esta mezcla a las variaciones de humedad o densidad.

2. Planos

Este documento debe incluir al menos los planos de planta y secciones tipo de la carretera tramificada, según los diferentes tipos de reciclado seleccionados, entendiendo por tal cualquier tramo en el que cambie el reciclado tipo, como por ejemplo la dotación de cemento.

Resulta muy interesante incluir también los puntos donde están realizadas las calicatas y la extracción de testigos, así como el firme encontrado en esos puntos.

3. Pliego de Prescripciones técnicas generales

Se incluye a continuación un Pliego tipo que se puede incluir en cualquier proyecto de realización de un reciclado in situ con cemento:

1 - DEFINICIÓN

Se define esta unidad como la mezcla íntima, convenientemente compactada, del material procedente del escarificado de un firme existente con cemento y agua (previo aporte de un corrector granulométrico en caso necesario) y eventualmente aditivos, cuyo fin es reutilizar una o varias capas de un firme deteriorado. Todo el proceso de ejecución de esta unidad se realiza a temperatura ambiente y sobre la misma superficie a tratar.

Su ejecución comprende las operaciones siguientes:

- estudio previo de los materiales
- estudio y definición de la fórmula de trabajo
- reciclado del firme existente, consistente en la ejecución sucesiva por bandas, en una sola pasada en cada una de ellas, del escarificado del firme en el espesor definido, incorporación del cemento, agua y eventualmente áridos de aportación y aditivos, mezcla de los distintos componentes y extensión de la misma
- realización de juntas en fresco

- compactación y refino de la mezcla
- curado y protección superficial en su caso.
- comprobación de la unidad terminada

2 - MATERIALES

2.1 - MATERIALES A RECICLAR

2.1.1 - Condiciones generales

Los materiales a reciclar procederán del escarificado o levantamiento de una o varias capas del firme existente.

2.1.2 - Granulometría

El material a reciclar no contendrá elementos de tamaño superior a ochenta milímetros (80 mm). En caso contrario, el Director de las Obras indicará las medidas a adoptar para la eliminación o rotura de los mismos.

El contenido de partículas pasando por el tamiz UNE 4 mm no será inferior al treinta por ciento (30%) en masa. En caso contrario, deberá preverse la incorporación de un corrector granulométrico al material a reciclar, a fin de alcanzar dicha proporción mínima, salvo que se asegure que el equipo de reciclado puede triturar los áridos de forma que se obtenga la misma.

2.1.3 - Limpieza

El material a reciclar estará exento de materia orgánica y de productos (sulfatos, sulfuros, piritas, etc.) que puedan perjudicar el fraguado del cemento.

2.1.4 - Plasticidad

El índice de plasticidad será inferior a treinta y cinco (35) y el límite líquido a doce (12). Dichos valores se determinarán mediante las Normas UNE 103103 y UNE 103104, respectivamente.

2.1.5 - Materiales no cumpliendo las limitaciones de limpieza y plasticidad

Los materiales que no cumplen las condiciones de limpieza y plasticidad indicadas en los apartados 2.1.3 y 2.1.4 deberán ser objeto de un estudio para definir las medidas correctoras a adoptar. En el caso de que sea preciso recurrir a un tratamiento previo con cal o cualquier otro conglomerante, la dotación de la misma deberá ser determinada mediante ensayos previos en laboratorio y aprobada por el Director de las Obras.

2.2 - CEMENTO

Los cementos a utilizar cumplirán con las especificaciones de la vigente Instrucción para la recepción de cementos. Deberán estar en posesión de la marca de calidad N de AENOR u otra marca oficialmente reconocida. Serán de categoría resistente treinta y dos y medio (32,5). El Director de las obras podrá autorizar el empleo de un cemento de categoría resistente veintidós y medio (22,5), así como en épocas frías o cuando esté justificado, el de un cemento de categoría resistente superior.

No se podrán emplear mezclas de cemento con adiciones que no hayan sido realizadas en la fábrica de cemento.

2.3 - AGUA

El agua empleada en el mezclado del material reciclado cumplirá las condiciones establecidas para su empleo en hormigones y por tanto deberá cumplir las prescripciones establecidas en la vigente Instrucción española de Hormigón Estructural o normativa equivalente.

2.4 - ADITIVOS

Los aditivos a emplear para obtener la trabajabilidad adecuada y/o mejorar otras propiedades de la mezcla deberán ser especificados en la fórmula de trabajo y aprobados por el Director de las obras. Podrán emplearse retardadores de fraguado para ampliar el plazo de trabajabilidad del material según las condiciones climáticas.

2.5 - ÁRIDOS DE APORTACIÓN

Si los ensayos del material reciclado aconsejasen el empleo de un árido como corrector granulométrico, éste deberá tener una granulometría e incorporarse al firme existente en una proporción que permita obtener una curva granulométrica del material reciclado lo más continua posible. Los materiales a utilizar con dicho fin serán no plásticos y tendrán un equivalente de arena, determinado de acuerdo con la Norma UNE-EN 933-8, mayor de treinta (30). El contenido de partículas arcillosas, determinado según la Norma UNE-EN 933-9, no excederá del dos por ciento en peso (<2%).

Si fuese necesario utilizar un árido de aportación para corregir peraltes, completar el espesor de capa reciclada o efectuar un ensanche, éste cumplirá las prescripciones exigidas en la normativa española para Zahorra (artículo 510 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes del Ministerio de Fomento) o materiales tratados con cemento (artículo 513 del mismo Pliego). Su empleo deberá ser aprobado previamente por el Director de las obras. Por otra parte, en el caso de ensanches ejecutados simultáneamente con el reciclado , el árido deberá seleccionarse de forma que se obtenga una resistencia a compresión igual como mínimo pero no superior a más del veinte por

ciento (20%) de la del firme reciclado, empleando la misma dotación de cemento de este último.

3 - ESTUDIO DE LA MEZCLA Y OBTENCIÓN DE LA FORMULA DE TRABAJO

La ejecución de esta unidad de obra no deberá iniciarse hasta que no se haya estudiado el tipo y composición de la mezcla con los ensayos necesarios tanto in situ como en laboratorio, y definido la correspondiente formula de trabajo, la cual deberá ser aprobada por el Director de las obras.

La resistencia mínima a compresión simple del material reciclado a los siete (7) días será de dos coma cinco megapascales (2,5 MPa).

Las probetas para la determinación de resistencias se compactarán según la maza Proctor modificado (Norma UNE-EN 13286-2), o bien con martillo vibrante (según la Norma UNE-EN 13286-51), con la energía que proporcione el porcentaje exigido del 97% de la densidad máxima Proctor Modificado (determinada de acuerdo con la citada norma UNE-EN 13286-2 o similar), o la densidad obtenida en obra de acuerdo con lo establecido por el Director de las Obras, y se ensayarán a compresión según la Norma UNE-EN 13286-41.

El contenido de cemento será tal que permita a la mezcla obtener la resistencia exigida con las dispersiones esperadas en obra. Salvo que se indique otro valor superior, el contenido mínimo de cemento, en masa respecto del total de los áridos de la mezcla en seco, será del tres y medio por ciento (3,5 %).

Es necesario determinar el plazo de trabajabilidad de acuerdo con el método indicado en la norma UNE13286-45, realizando los ensayos a la temperatura media ambiente prevista entre las doce (12) y las quince (15) horas durante la ejecución del reciclado.

El material reciclado deberá tener un plazo de trabajabilidad tal que permita completar la compactación de una banda antes de que haya finalizado dicho plazo en la banda adyacente reciclada previamente. Además, deberá ser superior a cualquiera de las operaciones necesarias para finalizar una sección, con el objetivo de eliminar la formación de juntas frías.

La fórmula de trabajo, además de definir el espesor de reciclado que se realizará, deberá incluir como mínimo los siguientes valores:

- la granulometría del material reciclado, las tolerancias de la misma y, en su caso, las características de los áridos de aportación.
- el tipo y porcentaje en masa de cemento respecto a la del material a reciclar en seco y, en su caso, el del aditivo.

- el porcentaje de agua respecto a la masa en seco del material a reciclar en el momento de mezclado y la humedad óptima de compactación.
- el valor de la densidad a obtener, cuyo valor medio en el espesor de la capa reciclada no será inferior al 97% de la máxima obtenida en el ensayo Proctor Modificado, determinada según la Norma UNE UNE-EN 13286-2.
- el plazo de trabajabilidad de la mezcla, determinado según la norma UNE13286-45, a la temperatura media ambiente prevista durante la ejecución de las obras entre las doce (12) y quince (15) horas.

Además, en el caso de que sobre la capa reciclada in situ vaya a pasar de forma inmediata al tráfico, se debe determinar el índice de carga inmediato (IBI) (norma UNE-EN 13286-47).

4 - EQUIPO PARA LA EJECUCIÓN DE LAS OBRAS

4.1 - EQUIPO PARA EL RECICLADO IN SITU

Se empleará un equipo mixto fresadora-mezcladora autopropulsado capaz de realizar la operación de reciclado, en el ancho y espesor definidos, en una sola pasada. La anchura de trabajo mínima será de dos metros (2 m). Dicho equipo deberá contar al menos con los siguientes elementos:

- rotor de fresado con control y regulación de la profundidad de fresado
- sistema de inyección de agua o de lechada de cemento y agua
- carcasa o cámara de mezclado
- dispositivo regulable para el extendido del material reciclado

Podrán utilizarse también trenes de reciclado en los que las operaciones de fresado y mezclado con conglomerante sean llevadas a cabo por equipos diferentes, siempre que la fresadora pueda disgregar el firme existente, en el espesor y ancho definidos, en una sola pasada, y que su anchura de trabajo mínima sea igual a dos metros (2 m).

4.2 - EQUIPO PARA EL SUMINISTRO DE CEMENTO

El cemento se deberá dosifica preferiblemente en forma de lechada. Sólo en aquellas obras en las que esto no fuera posible por la humedad, accesibilidad de la maquinaria, tamaño de la obra u otras circunstancias, se dosificará en forma de polvo. En ese caso se emplearán equipos con dosificación ponderal y distribuidor ligado a la velocidad de avance. Si la descarga del cemento sobre el firme a reciclar se realiza desde una altura superior a

diez centímetros (10 cm), el dispositivo de descarga estará protegido con faldones cuya parte inferior no deberá distar más de diez centímetros (10 cm) de la superficie del firme.

En el caso de suministrarse el cemento como lechada, el equipo de alimentación será capaz de dosificar el porcentaje necesario de cemento, de acuerdo con la velocidad de avance y profundidad de trabajo, inyectando directamente la lechada en el equipo de reciclado que se rociará sobre el material fresado. El silo de cemento será estanco y estará perfectamente aislado de la humedad y de posibles pérdidas.

4.3 - EQUIPO PARA EL SUMINISTRO DE AGUA

Deberá disponerse para el agua de amasado en la proporción necesaria, de un camión cisterna o un equipo similar capaz de incorporar al equipo de reciclado, o en su caso al equipo de suministro de lechada, de acuerdo con la velocidad de avance y profundidad de trabajo.

El suministro desde la cuba o el depósito móvil debe realizarse de manera que se eviten paradas del equipo debido a esta causa.

4.4 - EQUIPO PARA EL SUMINISTRO DE ADITIVO

En caso de emplearse aditivos y de que el equipo de reciclado no tuviera dispositivos específicos para su incorporación en la dosis requerida, se añadirán al agua de amasado en el equipo de alimentación de la misma, debiendo entonces estar provisto este último de los dosificadores necesarios.

4.5 - EQUIPO DE COMPACTACIÓN

El equipo de compactación deberá tener la potencia suficiente para lograr la densidad requerida. Se empleará como mínimo un compactador autopropulsado vibrante de rodillo metálico delantero lisos con una carga estática sobre la generatriz no inferior cincuenta kilogramos por centímetro (50 kg/cm), capaz de alcanzar una masa de al menos quince toneladas (15 t) con amplitudes y frecuencias de vibración adecuadas. El Director de las Obras podrá exigir excepcionalmente el empleo de otro rodillo pesado de neumáticos capaz de alcanzar una masa de al menos veintiuna toneladas (21 t) y una carga por rueda de al menos tres toneladas (3 t), con una presión de inflado que pueda alcanzar un valor no inferior a ocho décimas de megapascal (0,8 MPa).

Los compactadores de llanta metálica no deberán presentar surcos ni irregularidades en ellas. Los compactadores vibratorios estarán provistos de dispositivos automáticos para detener la vibración al invertir la marcha. Los de neumáticos tendrán ruedas lisas, en número,

tamaño y configuración tales que permitan el solape de las huellas de las delanteras con las de las traseras.

En los lugares inaccesibles para los equipos de compactación normales, se emplearán otros de tamaño y diseño adecuados para la labor a realizar.

4.6 - EQUIPO PARA LA EJECUCIÓN DE JUNTAS EN FRESCO

Para la ejecución de juntas en fresco se utilizarán equipos autónomos que efectúen en cada pasada un surco vertical de al menos dos tercios (2/3) del espesor a reciclar y que al mismo tiempo introduzcan en el mismo una emulsión bituminosa de rotura rápida u otro producto adecuado para impedir que la junta se cierre de nuevo.

El Director de las Obras podrá autorizar la utilización de equipos de desplazamiento manual, siempre que se compruebe su utilidad y no supongan un descenso del ritmo de avance previsto para el reciclado.

4.7 - EQUIPO PARA EL REFINO

En caso de tener que realizar un refino, éste se llevará a cabo con una motoniveladora cuyas características deberán ser aprobadas por el Director de las Obras.

5 - EJECUCIÓN DE LAS OBRAS

5.1 - ESTUDIO PREVIO DE LOS MATERIALES

Se debe realizar una inspección de la superficie a reciclar comprobando los datos incluidos en el proyecto y la tramificación propuesta. Para ello se tomarán en la obra muestras de material fresado en el espesor previsto en el Proyecto, empleando e equipo que se utilizará en las obras o al menos de similares características. Sobre las muestras de cada tipo de material fresado en cada tramo homogéneo se determinará:

- Un análisis granulométrico (norma UNE-EN 933-1).
- El límite líquido e índice de plasticidad (normas UNE 103103 y UNE 103104).
- Él contenido de sulfatos (norma UNE 103201).
- El contenido de materia orgánica (norma UNE 103204).
- El contenido de humedad (norma UNE-EN ISO 17892-1).
- La densidad máxima y la humedad óptima del Proctor modificado (norma UNE-EN 13286-2).

- La presencia de elementos inhibidores del fraguado del cemento, tales como sulfuros (piritas) o cloruros (sal gema).

Se debe comprobar que el material cumple todas las condiciones establecidas en el proyecto, realizándose una nueva tramificación y una nueva fórmula de trabajo en caso contrario.

5.2 - PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE EXISTENTE

El reciclado no se iniciará hasta que se haya comprobado que la superficie a escarificar está perfectamente limpia y exenta de sustancias perjudiciales tales como trozos de arcilla o materia orgánica. El proyecto debe indicar las medidas necesarias para obtener una regularidad superficial aceptable y, en su caso, para reparar las zonas defectuosas.

5.3 - SUMINISTRO DEL CEMENTO

El cemento se suministrará y acopiará de acuerdo con lo indicado en la vigente Instrucción española para la recepción de cementos.

Cuando el suministro del cemento suponga un retraso de realización de las obras por exceso de tiempo en las paradas para la carga del mismo, se dispondrá de una cuba silo o cualquier equipo de almacenaje donde puedan verter las cubas de transporte sin necesidad de esperar al vaciado del equipo dosificador. La capacidad mínima de acopio de cemento en obra en este caso, no deberá ser inferior a veinte toneladas (20 t).

5.4 - EXTENSIÓN DEL CEMENTO

El cemento se podrá extender como lechada o bien en polvo, con los equipos de dosificación ponderal y distribuidor ligado a la velocidad de avance descritos en el punto 4.2. No se permitirá en ningún caso la extensión manual del mismo.

En caso de utilizarse dosificadores en polvo, se deberá extender uniformemente sobre la superficie a reciclar la dotación prevista, tanto en sentido transversal como longitudinal, con las tolerancias especificadas. Deberán coordinarse adecuadamente los avances del equipo de dosificación de cemento y del de reciclado, no permitiéndose que haya entre ambos una longitud extendida de cemento superior a doscientos metros (200 m). La extensión del cemento se detendrá cuando la velocidad del viento supere los diez metros por segundo (10 m/s). Dicho valor se disminuirá a cinco metros por segundo (5 m/s) en caso de encontrarse a menos de mil metros (1 000 m) de una zona poblada o medioambientalmente protegida.

Cuando se utilicen dosificadores de lechada, se realizará una limpieza de los difusores en cada parada del equipo de reciclado, y como mínimo dos (2) veces al día.

Las operaciones para abastecer de cemento al equipo dosificador se realizarán sin afectar al tráfico adyacente.

5.5 - ESCARIFICADO Y MEZCLADO

El escarificado del firme y su mezcla con los otros componentes (cemento, agua y eventualmente áridos y aditivos) se realizará en una única operación con la misma maquina. Para ello se introducirán directamente el agua y aditivos necesarios en la recicladora.

El Director de las Obras podrá autorizar el empleo de equipos diferentes para la disgregación del firme y la mezcla del material resultante con el resto de materiales, siempre que cumplan las prescripciones de este apartado 5.

La velocidad de avance del equipo será tal que se asegure una profundidad uniforme de escarificado y una buena homogeneidad del material reciclado, sin por ello afectar gravemente al rendimiento. Se evitarán en lo posible las paradas, y cuando sean necesarias se cortarán de forma inmediata las entradas de cemento y agua para evitar sobredosificaciones y encharcamientos.

Siempre que se observe una heterogeneidad o defecto continuado en el mezclado, como cambios de granulometría, variaciones en el contenido de cemento u otros, se detendrá el reciclado hasta eliminar las causas de dicho defecto (desgaste de picas, obstrucción de inyectores, etc.).

En caso de que la humedad natural del material a reciclar (o la del material más la mínima necesaria para la alimentación del cemento si ésta se realiza en forma de lechada) sea superior a la óptima del ensayo Proctor modificado, se deberá proceder a un escarificado previo del firme para orear el mismo.

Cuando la anchura de la superficie a reciclar sea superior a la del equipo de trabajo, el reciclado se realizará por bandas paralelas, que se solaparán en un ancho comprendido entre diez y veinte centímetros (10-20 cm) para no dejar materiales sin mezclar en los bordes de las mismas. Deberán adoptarse las precauciones necesarias para evitar que se produzcan sobredosificaciones de conglomerante en los solapes. En el caso de utilizar para el reciclado varios equipos en paralelo se adoptará la misma precaución en lo que se refiere a los anchos de trabajo de los mismos. La ejecución en bandas se deberá planificar adecuadamente para permitir el paso alternativo del tráfico, si fuera necesario.

Se delimitarán cuidadosamente los arcenes o zonas de borde adyacentes a la calzada a fin de evitar que los materiales reciclados en las mismas se mezclen con los de aquélla si son diferentes.

5.6 - EJECUCIÓN DE JUNTAS

Antes de iniciar la compactación de la capa reciclada se realizarán en la misma juntas transversales en fresco por la técnica denominada prefisuración, a una distancia comprendida entre tres metros (3 m) y cuatro metros (4 m), y que deberá ser fijada por el Director de las Obras.

Se dispondrán juntas transversales de trabajo siempre que el proceso constructivo se interrumpa un tiempo superior al periodo de trabajabilidad de la mezcla, y siempre al final de cada jornada. Al inicio, así como después de cada parada de duración superior al plazo de trabajabilidad de la mezcla, se reiniciará el reciclado sobre el material ya tratado al menos un metro (1 m) por detrás del punto en el que se produjo la detención del trabajo, adoptando las precauciones necesarias para evitar sobredosificaciones.

5.7 - COMPACTACIÓN Y REFINO

La compactación se realizará inmediatamente después del mezclado y la ejecución de las juntas para evitar perdidas de humedad y permitir su finalización dentro del plazo de trabajabilidad del material.

La densidad seca obtenida deberá ser en todos los puntos superior al noventa y siete por ciento (97%) de la máxima Proctor modificado de la mezcla, determinada según la Norma UNE 103501.

La compactación se iniciará longitudinalmente por el borde más bajo de la banda que se esté tratando, y se continuará hacia el borde más alto de la misma, solapándose las sucesivas pasadas.

Durante la compactación se dispondrá de un equipo capaz de extender agua en forma de neblina sobre la superficie del firme reciclado, a fin de evitar que se produzcan desecaciones en la misma.

En una sección transversal cualquiera, la compactación de una banda deberá quedar terminada antes de que haya transcurrido el plazo de trabajabilidad de la adyacente ejecutada previamente.

Una vez finalizada la compactación de una banda no se permitirá su recrecido. Sin embargo, y siempre que se quiera obtener una buena regularidad superficial, se deberá efectuar dentro del plazo de trabajabilidad, un refino con motoniveladora u otro equipo adecuado, una vez que se haya alcanzado una densidad comprendida entre el noventa y el noventa y dos por ciento (90-92%) de la máxima Proctor modificado, prosiguiéndose luego la compactación hasta alcanzar la densidad especificada. El refino del material hasta la cota definitiva deberá realizarse en todo el ancho de la banda o bandas a refinar y nunca rellenando los

puntos bajos con materiales procedentes de la eliminación de puntos altos. Los materiales sobrantes del refino, siempre dentro del plazo de trabajabilidad, se podrán emplear para los arcenes, bordes o en otros caminos adyacentes.

5.8 - CURADO

Una vez finalizadas las operaciones de compactación y refino, y en cualquier caso antes de transcurrir tres horas (3 h), se procederá a la aplicación de un riego de curado con emulsión (C60B3 CUR o C60B2 CUR) de rotura rápida, con una dotación mínima de betún residual de cuaatrocientos gramos por metro cuadrado (400 g/m^2), o bien manteniendo húmeda la superficie mediante la pulverización continua de agua durante al menos 3 días.

Siempre que vaya a circular el tráfico sobre la superficie emulsionada, esta se protegerá inmediatamente después mediante la extensión de un árido de protección de tamaño comprendido entre tres y seis milímetros (3/6 mm), con una dotación entre cuatro y seis litros por metro cuadrado (4 a 6 l/m2), que se apisonará con un compactador de neumáticos y se barrerá apropiadamente. Siempre que sea posible se deberá retrasar el paso del tráfico sobre la superficie reciclada.

Se recuerda que para que el tráfico pueda circular inmediatamente sobre la capa reciclada, se debe lograr un índice de carga inmediato de la mezcla reciclada (norma UNE-EN 13286-47) superior a cincuenta (IBI > 50). En cualquier caso, conviene adoptar precauciones, como por ejemplo limitar la velocidad de los vehículos, intentar que las rodadas no circulen siempre por las mismas bandas o la extensión de un tratamiento superficial para evitar desprendimientos, además lógicamente de proteger a los operarios que están trabajando.

5.9 - TRAMO DE PRUEBA

Será preceptiva la realización, al inicio de cada tramo homogéneo en los que esté dividida la obra, de un tramo de prueba que podrá quedar como parte integrante de la misma en caso de resultar satisfactorio a juicio del Director de las Obras. Dicho tramo se realizará con el espesor y la fórmula de trabajo prescritos y empleando los mismos medios que se vaya a utilizar para la ejecución de las obras.

La longitud de este tramo de prueba debe ser superior a los cien metros (100 m) con el fin de obtener cierta homogeneidad de resultados.

Durante la construcción del tramo de prueba se comprobarán al menos las siguientes prescripciones:

- la idoneidad de la fórmula de trabajo
- La adecuación de los medios mecánicos propuestos y la velocidad de avance del equipo para obtener una mezcla uniforme y homogénea.

- que se obtiene la profundidad del reciclado considerando el esponjamiento que se produce de la capa reciclada.
- la relación entre el número de pasadas del equipo de compactación y la densidad obtenida,
- la conformidad del material reciclado con las condiciones especificadas sobre humedad, espesor de la capa, densidad, granulometría, contenido de cemento, resistencia y demás requisitos exigidos.

Además, se puede comprobar la correlación entre los métodos de control de la densidad y la humedad in situ y otros métodos rápidos de control que se pueden emplear.

A la vista de los resultados obtenidos, el Director de las Obras decidirá si son aceptables la fórmula de trabajo y los medios propuestos para los trabajos. En caso de no ser así, se deberá presentar otra propuesta con otros equipos o con la modificación de los existentes y se deberá realizar un nuevo tramo de prueba.

Los resultados obtenidos en el tramo de prueba válido servirán para fijar la fórmula de trabajo definitiva y los valores de referencia para las tolerancias y especificaciones de la unidad terminada.

Antes de transcurridos veintiseis (26) días de su puesta en obra se extraerán del tramo aceptado al menos tres (3) testigos cilíndricos, según la Norma UNE-EN 12504-1. Dichos testigos estarán situados en emplazamientos aleatorios que disten entre sí un mínimo de siete metros (7 m) en sentido longitudinal, y separados más de cincuenta centímetros (50 cm) de cualquier grieta de retracción o junta transversal. Estos testigos se ensayarán a compresión, según la Norma UNE-EN 13286-41, después de haber sido conservados durante cuarenta y ocho (48) horas al aire en ambiente de laboratorio, en las condiciones establecidas en la Norma UNE-EN 12504-1. El valor medio de los resultados de estos ensayos servirá de base para su comparación con los obtenidos en los ensayos de información a los que se refiere el presente Pliego.

6 - ESPECIFICACIONES DE LA UNIDAD TERMINADA

6.1 - TOLERANCIAS SOBRE LA FÓRMULA DE TRABAJO

Las tolerancias admisibles sobre la fórmula de trabajo, en porcentaje en masa del material a reciclar seco, serán las siguientes:

Característica	*Porcentaje sobre la masa total del material a reciclar en seco*
Cemento	± 0,3
Humedad de compactación (agua total)	-1 / + 0,5

6.2- TOLERANCIAS GEOMÉTRICAS

6.2.1 - De cota y anchura

La superficie acabada no deberá rebasar a la teórica en ningún punto, ni diferir de ella en más de veinte milímetros (20 mm). Si esta tolerancia fuera rebasada y no existieran problemas de encharcamiento se podrá aceptar la capa siempre que la superior a ella compense la merma, sin incremento de coste para la Administración.

La anchura del pavimento reciclado no podrá ser en ningún caso inferior a la teórica deducida de la sección tipo de los Planos.

Las irregularidades que excedan de las tolerancias especificadas deberán corregirse según las instrucciones del Director de las obras.

6.2.2 - De espesor

El espesor de la capa no será inferior en ningún punto al previsto para ella en la sección tipo de los planos ni excederá en más del diez por ciento (10%) a dicho valor.

6.2.3 - De regularidad superficial

El Índice de Regularidad Internacional (IRI) debe resultar inferior a tres (3) en el cincuenta por ciento (50%) de la longitud del tramo y a cuatro (4) en la totalidad del mismo (100%).

Las irregularidades que excedan de las tolerancias especificadas deberán corregirse mediante fresado con equipo de discos múltiples o, en su defecto, de acuerdo con lo establecido por el Director de las obras.

7 - LIMITACIONES DE LA EJECUCIÓN

El reciclado con cemento in situ no se ejecutará cuando la temperatura ambiente, a la sombra, sea superior a los treinta y cinco grados centígrados (35ºC) si no se adoptan precauciones tales como el empleo de retardadores de fraguado o de equipos para regar la superficie y evitar su desecación.

Asimismo se suspenderá cuando dicha temperatura sea inferior a cinco grados centígrados (5ºC) y exista fundado temor de heladas. En este último caso, si la temperatura tiene tendencia a aumentar, podrá iniciarse a partir de los dos grados centígrados (2 ºC).

En caso de lluvia fuerte o precipitación puntual con una intensidad significativa que pueda modificar la humedad del material, se deben suspender los trabajos.

8 - CONTROL DE CALIDAD

8.1 - CONTROL DE PROCEDENCIA DE LOS MATERIALES

El suministro e identificación del cemento deberá atenerse a lo indicado en el presente Pliego.

En los áridos utilizados como corrector granulométrico, de cada procedencia y para cualquier volumen de producción previsto se tomarán al menos cuatro muestras, según la Norma UNE-EN 933-2, y de cada una de ellas se determinará:

- la granulometría según la Norma UNE-EN 933-1
- el contenido de partículas arcillosas, determinado según la Norma UNE-EN 933-9, o su ausencia.

En el caso de que para corregir la rasante, complementar el espesor a reciclar o realizar un ensanche se emplease una zahorra artificial como árido de aportación, se llevarán a cabo sobre dichos materiales los controles de procedencia indicados respectivamente en el artículo 501 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes del Ministerio de Fomento español.

8.2 - CONTROL DE PRODUCCIÓN

De cada partida de cemento que llegue a obra se tomarán muestras y sobre ellas se realizarán los ensayos preceptivos de recepción, según los criterios de la vigente Instrucción española para la recepción de cementos. Al menos una (1) vez al mes, o siempre que se sospechen anomalías en el suministro por los resultados de los ensayos preceptivos, se realizarán también los ensayos optativos incluidos en dicha Instrucción.

Si la proporción de cualquier componente del cemento variase en más de cinco (5) puntos porcentuales respecto de aquélla con la que se realizó el estudio de la mezcla para la obtención de la fórmula de trabajo, éste deberá estudiarse de nuevo.

Se examinará la descarga al acopio o al equipo de extendido, desechando los áridos que, a simple vista, presenten restos de tierra vegetal, materia orgánica o tamaños superiores al máximo.

En los áridos utilizados como corrector granulométrico, sobre cada fracción de árido que se reciba se realizarán al menos una (1) vez al día los siguientes ensayos:

- granulometría, según la Norma UNE-EN 933-1
- contenido de partículas arcillosas, determinado según la Norma UNE-EN 933-9

En el caso de que para corregir la rasante, complementar el espesor a reciclar o realizar un ensanche se emplease una zahorra artificial como árido de aportación, se llevarán a cabo sobre dichos materiales los controles de producción indicados respectivamente en el artículo 501 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes del Ministerio de Fomento.

8.3 - CONTROL DE EJECUCIÓN

8.3.1 - Dosificación del cemento

Cuando el conglomerante se extienda sobre el firme a reciclar, su dotación se controlará mediante una lona o bandeja de superficie y peso conocidos, que se colocará antes del extendido del material y se pesará con posterioridad al mismo. Dicho control se realizará al menos una vez por la mañana y otra por la tarde, debiendo incrementarse su frecuencia en días de viento.

Si el conglomerante se incorpora directamente a la recicladora en forma de lechada, se debe controlar al menos una vez por la mañana y otra por la tarde el funcionamiento de las boquillas de inyección. Asimismo se contrastará diariamente el consumo efectivo de cemento con la información proporcionada por el microprocesador para control del volumen de lechada añadido.

En ambos casos se debe comprobar la dosificación media obtenida por cada cuba de transporte dividiendo las toneladas de cemento aplicadas entre la superficie que se ha utilizado, contabilizada en metros cuadrados.

8.3.2 - Escarificación y mezcla

Al menos una vez al día y al menos una vez por lote, definido en el Apartado 8.4, se debe tomar una muestra del material a la salida de la recicladora para determinar su granulometría, según la Norma UNE-EN 933-1.

Al menos dos (2) veces al día, una por la mañana y otra por la tarde, y al menos una vez por lote se tomará una muestra del material a la salida de la recicladora para confeccionar dos (2) series de tres (3) probetas cada una de ellas, de acuerdo con el método indicado en las Normas UNE-EN 13286-2 o UNE-EN 13286-51.

Si el reciclado se realiza con dos equipos trabajando en paralelo, se fabricarán por cada uno de ellos las mismas probetas indicadas en el párrafo anterior.

Dichas probetas se fabricarán con la densidad mínima exigida en obra, pero nunca con valores superiores, y se ensayarán a compresión, a las edades especificadas, de acuerdo con la Norma UNE-EN 13286-41.

La adición de agua o de lechada se controlará con el caudalímetro de la recicladora, de forma que se obtenga en cada tramo la humedad especificada para el mismo.

En cada una de las bandas de reciclado se realizarán determinaciones de humedad mediante sonda nuclear o cualquier equipo que facilite los datos rápidamente en emplazamientos aleatorios, con una frecuencia mínima de una (1) cada doscientos metros cuadrados (200 m2) de superficie. Con la frecuencia que indique el Director de las Obras se contrastarán los resultados de las mismas con los obtenidos mediante secado en estufa según la Norma UNE-EN ISO 17892-1.

Además, se debe comprobar con la frecuencia necesaria según el Director de las Obras:

- Que la profundidad y anchura de reciclado, y la velocidad del rotor y de avance del equipo son las aprobadas.
- El aspecto de la mezcla reciclada, especialmente la dispersión homogénea del cemento, y la ausencia de grumos y segregaciones.
- El espesor extendido mediante un punzón graduado u otro procedimiento, teniendo en cuenta la disminución que experimentará el material al ser compactado.

8.3.3 - Profundidad de tratamiento

Al menos dos (2) veces en cada jornada de trabajo, una por la mañana y otra por la tarde, se controlará la profundidad de escarificado a la salida de la recicladora mediante la apertura de una (1) calicata antes de iniciar la compactación.

8.3.4 - Compactación

Se comprobará la composición y forma de actuación del equipo de compactación, verificando:

- que el número y tipo de compactadores es el aprobado
- el funcionamiento de los dispositivos de humectación y limpieza
- el lastre y peso total de los compactadores y, en su caso, la presión de inflado de las ruedas de los compactadores de neumáticos

- la frecuencia y amplitud de los compactadores vibratorios
- el número de pasadas de cada compactador

En cada una de las bandas de reciclado se realizarán determinaciones de densidad en emplazamientos aleatorios mediante sonda nuclear o cualquier otro equipo de resultados rápidos, con una frecuencia mínima de una (1) cada doscientos metros cuadrados (200 m^2) de superficie. Para la determinación de la densidad media, la varilla o vástago con la fuente radioactiva deberá introducirse hasta el fondo de la capa reciclada o casi hasta el mismo o al menos hasta treinta centímetros (30 cm) de profundidad si el espesor a tratar fuera superior. En caso de que las densidades obtenidas fuesen inferiores a las especificadas se proseguirá el proceso de compactación hasta alcanzar los valores prescritos.

8.3.5 - Curado

Se controlará que la superficie del material reciclado permanezca constantemente húmeda antes de la extensión del producto de curado.

Se realizará como mínimo un (1) control diario de la dotación de emulsión bituminosa y, en su caso, del árido de protección, mediante el pesaje de bandejas metálicas u otros dispositivos similares de superficie y peso conocidos, colocados sobre la capa reciclada durante la aplicación del riego de curado.

8.4 - CONTROL DE PRODUCTO TERMINADO

Se considerará como lote, que se aceptará o rechazará en bloque, al menor que resulte de aplicar los tres (3) criterios siguientes:

- quinientos metros (500 m) de calzada
- tres mil quinientos metros cuadrados (3 500 m^2) de calzada
- la fracción construida diariamente

Se extraerán testigos cilíndricos (UNE-EN 12504-1) en puntos aleatoriamente situados, en un número mínimo de dos testigos por lote (2), aumentándose hasta cinco (5) si el espesor de alguno de los primeros fuese inferior al prescrito y servirán de base para el control del producto terminado. Los orificios producidos se rellenarán con material de la misma calidad que el utilizado en el resto de la capa, el cual será correctamente compactado y enrasado.

La regularidad superficial de la capa ejecutada se comprobará tanto paralela como perpendicularmente al eje de la calzada.

8.5 - CRITERIOS DE ACEPTACIÓN Y RECHAZO DEL LOTE

8.5.1 - Regularidad superficial

Las irregularidades que excedan de las tolerancias especificadas deberán corregirse mediante fresado con equipo de discos múltiples o, en su defecto, de acuerdo con lo establecido por el Director de las obras.

8.5.2 - Espesor

El espesor obtenido deberá estar comprendido dentro de los límites especificados en el presente Pliego, pero nunca debe resultar el espesor de la losa reciclada inferior al del diseño incluido en el proyecto para cada tramo.

El Director de las Obras fijará las penalizaciones a imponer por falta de espesor o si se debe reciclar de nuevo todo el lote a expensas del Contratista.

8.5.3 - Resistencia mecánica

La resistencia de un lote a una determinada edad se calculará como media de las resistencias de las probetas fabricadas Se recuerda la dependencia que este valor tiene de las densidades obtenidas en la obra y por ello, la importancia de alcanzar como mínimo la densidad prescrita.

El Director de las Obras debe fijar las penalizaciones a imponer por falta de espesor o si se debe reciclar de nuevo todo el lote a expensas del Contratista, quien puede decidir realizar gratuitamente esta última solución. Para determinar esto se debe realizar las siguientes actuaciones:

Antes de transcurridos veintiseis (26) días de su puesta en obra se extraerán del lote seis (6) testigos cilíndricos, según la Norma UNE-EN 12504-1. Dichos testigos estarán situados en emplazamientos aleatorios que disten entre sí un mínimo de siete metros (7 m) en sentido longitudinal, y separados más de cincuenta centímetros (50) de cualquier grieta de retracción o junta transversal. Estos testigos se ensayarán a compresión, según la Norma UNE-EN 13286-41, después de haber sido conservados durante cuarenta y ocho (48) horas al aire en ambiente de laboratorio, en las condiciones establecidas en la Norma UNE-EN 12504-1.

El Director de las obras podrá autorizar que los testigos de referencia se extraigan de un lote aceptado cuya situación e historial lo hicieran comparable a aquél que vaya a ser sometido a ensayos de información (como los extraídos del tramo de prueba).

El valor medio de los resultados de estos ensayos se comparará con el valor medio de los resultados del tramo de referencia:

- si no fuera inferior, el lote se considerará aceptable
- si fuera inferior a él, pero no inferior a su noventa por ciento (±90%), el Director de las Obras podrá decidir las penalizaciones a imponer o si se debe reciclar de nuevo todo el lote a expensas del Contratista.
- En los restantes casos se debe reciclar de nuevo del lote a expensas del Contratista.

9 - MEDICIÓN Y ABONO

El reciclado con cemento se medirá por metros cuadrados (m^2) obtenidos de la medición de la superficie realmente reciclada con el espesor indicado en el Proyecto, el cual se entiende como mínimo en cualquier punto. No tienen derecho a un incremento de abono las zonas solapadas o las superficies que por sus defectos haya sido necesario reciclar en más de una pasada, ni las creces laterales, ni la limpieza de la superficie existente.

En el precio se consideran incluidas todas las operaciones y materiales necesarios para la correcta terminación, excepto el cemento y en su caso el árido de aportación.

Tanto el cemento como el árido de aportación se medirán por toneladas (t) realmente empleadas en obra, obtenidas mediante pesada directa en báscula debidamente contrastada de los vehículos de suministro y utilizado.

La aplicación del ligante bituminoso para el riego de curado se abonará por toneladas (t) realmente empleadas en obra, medidas antes de su empleo. El árido de cobertura superficial, incluida su extensión, apisonado y eliminación posterior, se abonará por toneladas (t) realmente empleadas en obra, de acuerdo con otros capítulos de este Pliego.

Todas estas unidades se abonarán a los precios indicados en el Cuadro de Precios nº 1.

4. Mediciones y presupuesto

Este documento debe comprender las mediciones, donde debe incluirse el reciclado con cemento que se debe medir por metros cuadrados (m^2) obtenidos como medición real de la superficie realmente reciclada con el espesor indicado en el Proyecto y las otras unidades independientes que comprenda (como el cemento, corrector granulométrico en su caso, emulsión de curado y otros), el Cuadro de Precios nº 1, en el que figuran los precios de esas unidades (el coste del reciclado se incluye en el capítulo 10), el Cuadro de Precios nº 2, que incluye el precio descompuesto en 3 partidas (maquinaria, materiales y mano de obra) y el presupuesto o producto de las mediciones por el precio de cada una.

A2 ANEJO 2

ANÁLISIS TENSIONAL DE FIRMES RECICLADOS IN SITU CON CEMENTO

No hay que olvidar que el reciclado de firmes in situ con cemento es una técnica relativamente joven de rehabilitación de carreteras por la que se consigue transformar un firme deteriorado en una capa nueva de base de notable capacidad estructural, aprovechando la misma carretera como cantera o fuente de suministro de áridos (técnica absolutamente sostenible).

Para el dimensionamiento de un firme reciclado con cemento, además de las secciones incluidas en los catálogos de algunas de las normativas vigentes, se pueden emplear procedimientos matemáticos basados en su asimilación a un medio multicapa elástico y lineal, siguiendo dos enfoques diferentes y complementarios: el cálculo directo y el cálculo inverso.

Ambos deben ser realizados por técnicos profesionales en este campo del cálculo y nunca debe olvidarse de las aplicaciones o experiencias existentes, que pueden servir de referencia o comparación con otras secciones de nueva construcción.

1. CÁLCULO DIRECTO

Consiste en comprobar tensionalmente el firme mediante el análisis de diferentes combinaciones de espesores, módulos y condiciones probables de adherencia o despegue entre capas. En cada una de las mismas se calcula la tensión radial de flexotracción resultante en la fibra inferior de la capa de material reciclado producido por una rueda o una pareja de ruedas gemelas de un eje de 130 kN (que es el comúnmente empleado en España, aunque en algunos otros paises esta carga se ha visto reducida).

Así se puede comprobar si el firme es capaz de soportar el número de cargas a que va a estar sometido (tráfico pesado en ejes equivalentes de 130 kN) sin agotar su capacidad estructural; o, lo que es mejor, se puede comparar el cociente σr/Rf, (tensión en la fibra inferior / resistencia a flexotracción) con el de materiales similares en otras secciones de firme. Para ello es frecuente adoptar leyes de fatiga similares a las de cualquier material tratado con cemento, las cuales suelen ser del tipo:

$$\sigma_r = K\,(N/10^6)^{-1/12}$$

donde cada símbolo representa:

σ_r tensión radial en la fibra inferior de la capa reciclada (MPa)

K parámetro que depende de la resistencia a flexotracción del material reciclado (≈ 0,64 Rf). Como orden de magnitud, se suelen adoptar valores entre 4 (suelocemento) y 8 (gravacemento), según el material.

N número de ejes equivalentes de 130 KN (repeticiones de carga). A falta de otros datos y como orden de magnitud, puede suponerse que es del orden de los dos tercios del total de vehículos pesados acumulados en un sentido a lo largo del periodo de proyecto (normalmente, 20 años).

De acuerdo con los cálculos incluidos en la tesis doctoral de Jesús Díaz realizados en la Universidad de Burgos con materiales reciclados del tipo A de 2,5 MPa de resistencia a compresión a los 7 días, la ley de fatiga tendrá los siguientes valores:

$$\sigma = 0{,}64 \cdot R_f \cdot \left(\frac{N}{10^6}\right)^{-0{,}035}$$

o bien

$$\sigma_r = = R_f\,(1\text{-}X \log N)$$

donde algunos de los símbolos ya se han definidos y el resto son:

Rf resistencia a flexotracción del material reciclado (MPa), que en caso de reciclado tipo A de 2,5 MPa de resistencia a compresión a 7 días resulta muy variable entre 0,5 y 0,7 MPa.

X parámetro que indica la pendiente de la recta de fatiga en un diagrama de escala logarítmica con σr / Rf en el eje de abscisas y N en el eje de ordenadas depende de la resistencia a flexotracción del material reciclado. Como orden de magnitud, se ha medido en el laboratorio valores para el reciclado tipo A de 2,5 MPa de resistencia a compresión a 7 días del orden de 0,058. Para la gravacemento (reciclado solo de un material granular de granulometría continua) se han medido valores de 0,065 y para el suelocemento del orden de 0,070-0,080.

Así pues, de acuerdo con los resultados publicados en dicha tesis, se puede considerar que la ley de fatiga es del orden:

$$\frac{\sigma}{R_f} = 1 - 0{,}058.\log N$$

En cuanto a los parámetros que intervienen en los sistemas multicapa se suelen adoptar unos valores medios usuales, cuyo módulo se caracteriza para la capa reciclada en el capítulo 4, así como los datos obtenidos en el reciclado de algunas carreteras (en la citada tesis se han ensayado unas 60 probetas cilíndricas a compresión simple, a tracción indirecta y módulo de elasticidad, así como 106 probetas prismáticas de 15x15x60 cm a flexotracción y empleadas en los ensayos dinámicos) que se exponen a continuación:

- La resistencia a compresión a noventa días ($R_{C,90d}$) es una vez y media (1,5) la resistencia a compresión a 7 días ($R_{C,7d}$), siendo este el parámetro que se controla en obra, superando en el largo plazo el valor de uno coma ocho (1,8) veces dicha resistencia ($R_{C,LP}$):

$$R_{C,90d} = 1{,}5\ R_{C,7d}$$

- De forma similar, la resistencia a flexotracción a largo plazo ($R_{F,LP}$) es dos veces (2) la resistencia a flexotracción a 7 días ($R_{f,7d}$):

$$R_{f,LP} = 2\ R_{f,7d}$$

- La resistencia a tracción a largo plazo o 90 días ($R_{TI,90d}$) es al menos de dos veces (2) la resistencia obtenida a 7 días ($R_{TI,7d}$):

$$R_{Ti,90d} = 2\ R_{Ti,7d}$$

- La relación entre estas resistencias a largo plazo y con la resistencia a compresión medida a los 7 días controlada en todas las obras, viene definida por las siguientes expresiones:

$$R_{Ti,LP} = 0{,}15\ R_{C,7d}$$

$$R_{f,LP} = \frac{1}{0{,}442802 + \frac{2{,}822844}{R_{C,7d}}}$$

Por otra parte, se suele considerar que la capa reciclada se apoya sobre una explanada de alta calidad (índice CBR > 12 MPa) dada la fuerte compactación que el firme existente suele haber sufrido por el tráfico a lo largo de los años, pero en caso de duda, conviene determinar este índice de capacidad de soporte (CBR) y el módulo del conjunto explanada - material granular que no se recicla mediante sondeos y calicatas, o bien por medio de ensayos deflectométricos (deflexión en el geófono más alejado del deflectómetro de impacto). Se supone además que la capa reciclada está adherida tanto a la explanada como a las capas superiores de mezcla bituminosa.

En algunos casos se considera además el efecto de las juntas de retracción en la capa reciclada mediante la aplicación de un coeficiente de mayoración (del orden de 1,25) a las tensiones obtenidas en el análisis multicapa.

2. CALCULO INVERSO

Consiste en el proceso por el que se determinan los módulos de deformación de las capas del firme existente a partir de los datos de auscultación (medidas de deflexión y radio de curvatura del cuenco de deflexión producido en la carretera por una carga tipo).

El resto de los datos necesarios para establecer la capacidad residual del firme (espesores de las capas y tipos de materiales que tendrán sin duda una gran influencia) se determinan mediante la extracción de testigos (para obtener la mayor precisión posible).

Una vez estimados mediante cálculo inverso los módulos de la capas que quedarán por debajo de la capa reciclada, y adoptando unos valores razonables de los mismos para la capa reciclada y la mezcla bituminosa, pueden obtenerse mediante cálculo directo los espesores necesarios para resistir las cargas de tráfico previstas. Es conveniente por tanto que entre la medida de las deflexiones para realizar el proyecto y la fecha real de ejecución de la obra transcurra el menor tiempo posible.

El paso previo de un equipo geo-rádar, junto con el historial de la carretera, puede ser útil para efectuar una tramificación previa del firme existente y ubicar de modo más eficaz los puntos de realización de los ensayos necesarios ya comentados, consistentes en:

- testigos de mezcla bituminosa para conocer el número de capas, espesor y adherencia entre las mismas
- calicatas para medir espesores y naturaleza de los materiales granulares y para obtener el índice CBR de la explanada
- deflexiones, determinando el valor máximo y el cuenco o línea de influencia de la deformación del firme en una serie de puntos alejados del de aplicación de la carga.

Como ya se indicó, y si bien en el cálculo directo también es necesario, es imprescindible que este cálculo inverso sea realizado por técnicos profesionales en este campo del cálculo para no obtener resultados poco lógicos raramente sancionados por la experiencia.

A3 ANEJO 3

REALIZACION DE JUNTAS EN FRESCO

1. INTRODUCCIÓN

La fisuración por retracción y cambios volumétricos debidos a los cambios térmicos y otros condicionantes es una característica inherente a las capas de materiales tratados con conglomerantes hidráulicos y por ello a las capas recicladas. La distancia y forma de esta fisuración depende de las características del material reciclado, del tipo y contenido de cemento utilizado y del gradiente térmico. Dependiendo de la anchura de la capa tratada, estas fisuras son fundamentalmente transversales o pueden venir acompañadas de fisuras longitudinales. Las distancias entre fisuras son variables en función de las condiciones térmicas de la zona, si bien se puede apreciar cierto patrón.

Con el paso del tiempo se ha visto que, en algunas carreteras recicladas, las fisuras se han reflejado en la superficie del firme. Estas fisuras reflejadas dependen principalmente de varios factores:

- las características del material reciclado (naturaleza del árido, tipo y contenido de conglomerante principalmente),
- el espesor y tipo de capas de mezcla bituminosa dispuestas sobre la capa de material tratado con cemento,
- las variaciones del estado térmico (principalmente las variaciones estacionales de temperatura y las variaciones diarias de temperatura) y
- la intensidad del tráfico pesado.
- las condiciones de adherencia entre capas y con ello las condiciones de puesta en obra.

Para evitar este efecto se puede intervenir sobre alguno de los factores anteriores:

- empleando ligantes modificados en las mezclas,
- disponiendo capas intermedias como geomallas y geotextiles impregnados o sistemas de absorción de tensiones,
- bien ejecutando juntas en la capa reciclada, lo que permite disponer éstas de manera que se minimice su efecto sobre las capas superiores de mezcla bituminosa.

2. FORMACIÓN DE JUNTAS

Para la formación de juntas existen dos alternativas posibles: serrado o prefisuración, cuyas principales características, ventajas e inconvenientes se describen a continuación.

a. Formación de juntas mediante serrado. Con la ayuda de una sierra de disco se procede a dar un corte en la capa de material tratado con una profundidad comprendida entre 1/4 y 1/3 de su espesor, con la finalidad de crear una zona debilitada que termina por fisurarse cuando el material retrae. Este procedimiento se puede realizar en fresco o una vez endurecido. Este último, presenta la ventaja de que la formación de la junta es segura y no se interfiere en la ejecución de la capa permitiendo un mayor rendimiento, pero tiene el inconveniente de que hay que proceder a su formación antes de que el material retraiga y de que aparezcan las primeras fisuras, pudiéndose provocar deterioros en los labios de las juntas si se ejecutan demasiado pronto y el material no presenta la suficiente resistencia. Aunque con este procedimiento se tiene la ventaja de que se conoce con certeza dónde se ha ejecutado la junta, se produce una pérdida significativa de transferencia de cargas entre las losas formadas, al estar ésta confiada al encaje entre los áridos.

b. Formación de juntas mediante técnicas de prefisuración o realización de juntas en fresco. Consiste en la disposición en fresco de juntas de contracción a distancias próximas formando losas pequeñas, bien conectadas entre sí para conservar la transmisión de cargas entre ellas y evitando, en lo posible, el acceso de agua hacia las capas inferiores. Para ello, una vez reciclada la capa in situ con cemento, mientras se encuentra en estado fresco y dentro de su plazo de trabajabilidad, se realizan surcos en los que se introduce un material para evitar la adherencia de los bordes durante la compactación, cuyo objetivo es crear la discontinuidad para que la capa rompa a distancias próximas. Si están correctamente ejecutadas, no se pierde la capacidad de transferencia de carga entre las losas formadas, pero reduce los rendimientos de la puesta en obra y puede afectar a la regularidad superficial final de la capa.

La prefisuración hace innecesario imponer un límite superior a la resistencia de los materiales reciclados. Este límite superior se establece cuando no se prefisura para limitar el contenido de conglomerante, que está asociado a una mayor resistencia, pero también a una mayor retracción y a mayores riesgos de reflexión de fisuras. Con la prefisuración, este riesgo desaparece y se pueden dosificar mayores cantidades de conglomerante, lo que mejora la calidad del material y, especialmente, aumenta su homogeneidad. Se evita el riesgo asociado a emplear dotaciones bajas de conglomerante para reducir la fisuración, que hacen

difícil garantizar un reparto homogéneo en la masa y, en consecuencia, conducen a un material heterogéneo y de baja calidad que puede presentar zonas excesivamente débiles que propicien la aparición de deterioros bajo la acción del tráfico.

Independientemente de que se prefisure o no, tras su ejecución, la capa reciclada se debe cubrir con un riego de curado que reduzca la probabilidad de formación de fisuras de retracción.

La decisión de prefisurar o no la capa suele depender de cuatro parámetros fundamentales:

- tráfico de vehículos pesados,
- condiciones climáticas,
- espesor de mezcla bituminosa y
- resistencia del material reciclado

En la Tabla A3.1 se recogen algunas recomendaciones sobre los criteriosa emplear en distintas circunstancias:

Tabla A3.1 Criterios de prefisuración de capas recicladas con cemento.

Tráfico Pesado	***Zona Climática***	***Resistencia a comprensión (7 días)***
Alto (IMDp > 200)	Continental	Obligatorio (*)
	Litoral	Recomendable (**)
Bajo (IMDp ≤ 200)	Continental	Recomendable (***)
	Litoral	No es necesario

(*) No es necesario cuando el espesor de mezcla bituminosa es igual o mayor de 18 cm.
(**) Obligatorio según ciertos autores y no necesario según otros
(***) No es necesario cuando la IMDp es inferior a 25 vehículos pesados/carril/día.
IMDp = Intensidad Media Diaria de vehículos pesados

Para garantizar que todas las juntas prefisuradas se abren, pero con el objetivo de limitar la abertura de las mismas, la distancia más adecuada entre juntas transversales de contracción es de 2 a 3 metros, aunque en los casos menos críticos, se puede aumentar esta distancia a 4 m.

Siempre que se prefisure transversalmente la capa y la anchura de la calzada sea superior a 5 m se deben realizar también juntas longitudinales para evitar que surjan fisuras cuya reflexión pueda coincidir con la zona de rodada de los vehículos. En general, estas juntas

longitudinales se pueden situar en el centro de los carriles o, en todo caso, muy próximos a la línea de separación de los mismos, procurando que se formen losas con una relación entre sus lados no superior a 2.

3. SISTEMAS DE PREFISURACIÓN

La prefisuración a distancias cortas debe:

- Conseguir un debilitamiento de la resistencia a tracción de la capa reciclada con cemento de modo que, con los primeros acortamientos inducidos en ella, se abran todas las fisuras marcadas previamente.
- Mantener también una buena trabazón entre las losas generadas en la capa y, por lo tanto, una transferencia de carga satisfactoria, limitando el riesgo de los movimientos verticales y horizontales.

El sistema de prefisuración en fresco a espesor parcial, sin inclusión de ningún elemento, plantea la duda de si las discontinuidades se cerrarán tras el paso de los rodillos y de si, aún sin cerrarse, el debilitamiento será suficiente para que se forme la junta en todas ellas. Para evitar este problema, es recomendable prefisurar en fresco un espesor importante de la capa incorporando en el surco formado, algún elemento o material (como emulsión bituminosa, láminas de plástico flexible o perfiles ondulados de plástico rígido) que evite la adherencia entre los labios de la fisura y asegure un debilitamiento real de la losa en la zona de la junta realizada.

Se han desarrollado equipos con potencia y peso suficientes para poder realizar un corte que afecte a una gran parte del espesor de la capa (más del 50%) o a su totalidad, aún en el caso de que ésta tenga una cierta precompactación, y que al mismo tiempo efectúen algún tipo de tratamiento, para evitar que se vuelvan a adherir las caras de la junta.

Entre los equipos para realizar juntas se pueden mencionar los siguientes:

- **Prefisuración en estado fresco**
  - Con incorporación de emulsión asfáltica
  - Con inserción de film de plástico
  - Con inserción de perfil plástico rígido
  - Otros

- Prefisuración en estado endurecido
  - Serrado de juntas
  - Fisuración por aplicación de cargas pesadas

3.1 - Prefisuración en estado fresco

3.1.1. Con incorporación de emulsión asfáltica

Se trata de equipos autopropulsados que realizan el surco en la capa de material tratado e introducen una cierta cantidad de emulsión asfáltica en el corte realizado. El proceso incluye las siguientes etapas:

- Creación de un surco transversal en la capa tratada con cemento a intervalos regulares en una profundidad de al menos 2/3 el espesor de la capa, antes de la compactación final.
- Introducción de un producto bituminoso en este surco, temporalmente abierto.
- Cierre de este surco en el momento de la compactación final.

El producto bituminoso utilizado es una emulsión asfáltica catiónica de rotura rápida similar a la utilizada en el riego de curado de estos materiales.

La emulsión juega un doble papel:

- Su fase acuosa de pH bajo crea un área de menor resistencia (al aumentar en esa zona la relación agua/cemento), favoreciendo la localización de las fisuras de contracción.
- Su fase bituminosa crea una discontinuidad permanente (al impedir el fraguado del cemento en la zona en la que se aplica) y permite una localización precisa de la fisura.

Cabe destacar diversos equipos como el equipo CRAFT (Creación automática de fisuras transversales), patentado por una empresa francesa en 1988, que, montados sobre diferentes máquinas o chasis, disponen de un sistema de funcionamiento común: disponen de una cuchilla fijada a un equipo con brazo articulado móvil, a un bastidor guía o bien a un equipo móvil, de un depósito de emulsión bituminosa y de una bomba que va inyectando dicha emulsión en el surco formado por la cuchilla





Figuras A3.1 y A3.2. – Vista general del equipo CRAFT® y detalle de su elemento de corte

Los equipos basados en corte con inyección de emulsión más habitualmente empleados se pueden clasificar a su vez en tres grupos:

- Un equipo tipo excavadora en el que la cuchilla inyectora se acopla a un brazo articulado con movimiento hidráulico capaz de dirigir la cuchilla a lo largo de la trayectoria deseada para la prefisuración. El equipo le proporciona potencia y realiza el desplazamiento a cada posicionamiento en la capa a tratar.
- Una viga o celosía transversal a la capa de material tratado extendida, que avanza en el mismo sentido que el extendido y se posiciona sobre la zona en la que ha de prefisurarse la capa sirviendo de guía y soporte para el desplazamiento de un útil de corte que efectúa la junta e inserta la emulsión. El bastidor recibe potencia y se desplaza bien de forma autónoma o bien por acoplamiento a un equipo automóvil.





Figura A3.3 y A.3.4. – Vista general y detalle de corte con el sistema de celosía bastidor®

- El útil o cuchilla de corte se acopla a un equipo (como quads, mini-retroexcavadoras, rodillos compactadores de pequeño tamaño o bandejas vibrantes) cuyo movimiento ha de seguir necesariamente la dirección de la junta, lo que implica una serie de maniobras sobre la capa tratada recién extendida, tanto durante la ejecución de la junta, como en el posterior cambio de posición para ejecutar la siguiente.

La principal desventaja de estos sistemas es que las rodadas de los equipos sobre la capa reciclada empeoran su regularidad superficial que, en muchos casos, no se puede corregir mediante la extensión de las capas superiores.





Figura A3.5 y A3.6. – Equipo de prefisuración sobre quad y sobre mini-retroexcavadora







Figura A3.7 a A3.9. – Diferentes sistemas de prefisuración utilizados

3.1.2. Con inserción de film de plástico

Estos equipos crean un surco transversal en la capa y simultáneamente insertan en él una cinta de plástico de forma automatizada. La cinta se suministra en rollos, que se montan en el equipo, facilitando su colocación y suele tener un ancho del orden de un tercio del espesor de la capa, y un espesor de 70 a 80 µm.

La cinta constituye una barrera física que impide por sí misma la continuidad del fraguado de la losa, marcando la junta y definiendo inequívocamente su longitud. A su vez, en función de su rigidez o espesor, puede llegar a deformarse bajo la compactación y proporcionar la adecuada trabazón entre losas para transmisión de carga entre ellas por encaje entre los áridos.

Para evitar que sea arrastrada por los equipos de puesta en obra, la cinta se coloca a una profundidad de 6 a 10 cm por debajo de la superficie del material a compactar. Con ello, se tiene en cuenta tanto el descenso que se produce en la compactación, como un eventual refino para mejorar la regularidad superficial.





Figura A3.10 y A3.11. –Equipo OLIVIA® y detalle de corte

3.1.3. Con inserción de perfil plástico rígido

El equipo, acoplado a una pala hidráulica sobre neumáticos que garantiza el transporte, el posicionamiento y facilita la energía hidráulica necesaria, consta de un instrumento de apertura del surco por vibro-presión, en el que se introduce un perfil de plástico rígido con forma sinusoidal y se procede posteriormente al cierre del hueco abierto gracias a un dispositivo frontal constituido por dos peines que, colocados a ambos lados de la junta y animados de un movimiento alternativo, acaban de cerrar el hueco acercando el material contra el perfil introducido. El ancho de trabajo de este equipo es el correspondiente a un

carril de circulación, lo que obliga a efectuar una rotación en torno al eje de la calzada para poder ejecutar la junta en toda la longitud, proceso que es controlado electrónicamente para garantizar una adecuada alineación de la junta.

La operación consta de las siguientes fases:

- La creación, antes de la compactación, de unos surcos transversales en la capa de material tratado a intervalos regulares.
- La colocación en el surco de un perfil de plástico rígido de forma sinusoidal, cuya altura y longitud son variables en función del espesor total de la capa de material tratado y del ancho de la calzada.
- El cierre del surco antes de la compactación para asegurar la posición del perfil de plástico y que el material tratado ocupa todos los huecos a su alrededor.





Figura A3.12 y A3.13 – Colocación y detalle de la Junta Activa®

3.1.4. Otros

Existen otros equipos distintos a los anteriores, que permiten realizar las juntas y cumplir las funciones de las mismas, como por ejemplo el serrado en fresco una vez precompactada la capa, introduciendo posteriormente en la marca así creada emulsión asfáltica o cualquier otro elemento que evite que la junta se cierre durante la compactación final.

3.2 - Prefisuración en estado semiendurecido

Una vez fraguado el cemento la fisuración de la capa tratada puede controlarse mediante la formación de juntas por serrado, o bien induciendo una micro-fisuración en toda ella mediante el empleo de cargas pesadas.

3.2.1. Serrado de juntas

El serrado de juntas debe realizarse tan pronto como sea posible sin que se produzca el desportillado de los labios de la junta y siempre antes de que comience la fisuración espontánea de la capa tratada.

La profundidad de serrado debe ser la suficiente para debilitar la capa de material tratado y suele estar comprendida entre un mínimo de 1/4 y un máximo de 1/3 del espesor de la misma. El valor más adecuado debe determinarse, en cualquier caso, en un tramo de prueba.

Es recomendable disponer de un equipo de serrado con una potencia y un número de elementos suficientes para llevar a cabo esta labor en un periodo de tiempo razonable, de manera que su labor finalice antes de que transcurra el tiempo necesario para que se produzca la fisuración espontánea de la capa tratada con cemento.





Figura A3.14 y A3.15. – Ejecución de la prefisuración mediante serrado en fresco.

3.2.2. Fisuración por aplicación de cargas pesadas

Se puede tratar de conseguir una fisuración de la capa tratada con cemento mediante la aplicación de varias pasadas de rodillo metálico vibrando con la amplitud máxima al principio del período de endurecimiento de la capa, habitualmente entre el primer y tercer día de la puesta en obra (el tiempo en el que debe intervenir se calcula con un equipo de deflectómetro de impacto o similar).

El objetivo teórico perseguido es el de transformar la capa continua de material tratado en una sucesión de pequeños bloques encajados entre sí, de unas dimensiones lo suficientemente pequeñas como para que no se produzcan movimientos diferenciales por efecto de

gradientes térmicos, lo que mantiene juntos los bordes de las fisuras creadas y garantiza la transferencia de cargas a través de estas.

Este procedimiento no se ha empleado hasta la fecha en España y no se tiene experiencia real de su empleo, aunque si se utiliza mucho en los países del continente americano.



Figura A3.16 y A3.17. – Ejecución de la fisuración por aplicación de cargas pesadas

4. SOLUCIONES PARA MEJORAR LA REGULARIDAD SUPERFICIAL

El control de la regularidad superficial de la capa reciclada empleada en la base a través de índices como el IRI (Índice Internacional de Regularidad) debe ser informativo en la mayoría de los casos, pues su importancia dependerá, entre otros factores, del espesor de mezcla bituminosa dispuesto encima. Cuando mayor sea este espesor más sencillo será corregir las irregularidades de la capa. Ahora bien, no se puede dejar a esta o estas capas la responsabilidad funcional de una buena regularidad superficial.

No existen reglas claras sobre los aspectos que determinan una mejor o peor regularidad final de la capa reciclada con cemento pues intervienen factores como las características de los materiales empleados, la fórmula de trabajo o el equipo de extensión. Lo que sí se ha constatado es que las operaciones de prefisuración pueden dificultar los resultados finales, pero se trata en definitiva de una operación necesaria para optimizar la sección del firme (al controlar la reflexión de fisuras) y por lo tanto hay que adoptar medidas para tratar de minimizar su efecto, alguna de las cuales se describen a continuación.



Figura A3.18 – Compactación final sobre las juntas prefisuradas

4.1. Precompactación

En muchas ocasiones la medida más eficaz y sencilla para mejorar la regularidad final de las capas recicladas con cemento prefisuradas es extenderlas con un cierto grado de precompactación. No existen unos criterios claros sobre cuáles son los valores más adecuados, pues dependen del equipo de reciclado empleado y del equipo de prefisuración utilizado, por lo que lo recomendable es determinar este valor mediante la realización de un tramo de prueba.

Lo que sí está claro es que en una superficie precompactada, las huellas que forman los equipos de prefisuración al desplazarse sobre la misma son menores y puede ser más sencillo que se corrijan en cierta forma con el paso de la motoniveladora y el equipo de compactación. También es cierto que a mayor grado de precompactación mayor es la energía necesaria para formar la prefisura y mayor, por tanto, el riesgo de que no alcance toda la profundidad requerida, por lo que hay que hacer un balance considerando todos estos aspectos para adoptar una solución equilibrada.

4.2. Aplicación de rastrillo en la junta en estado fresco

Se puede aplicar un rastrillo de longitud mínima de un metro sobre la junta prefisurada para tratar de eliminar la elevación generada por la prefisuración. El rastrillo se aplica en el sentido de la junta, lo que reduce de manera considerable las protuberancias generadas por la prefisuración y puede repartir el material sobrante o eliminarlo sacándolo fuera de la superficie de la capa reciclada.



Figura A3.19 – Aplicación de un rastrillo sobre la junta prefisurada

4.3. Reciclado en dos capas

Cuando se recicla una capa muy gruesa, se puede realizar el reciclado en dos capas perfectamente adheridas. La primera capa suele suponer el 75-80% del espesor total y es en la que se realiza la prefisuración. Posteriormente, y dentro del período de trabajabilidad (que hay que asegurar con un retardador de fraguado), se recicla (o se extiende) la segunda capa hasta alcanzar el espesor total previsto en proyecto, lo que permite absorber perfectamente los posibles problemas que pueda generar la prefisuración en la regularidad superficial de la primera capa. En estos casos es muy importante comprobar y garantizar la adherencia entre ambas capas, no sólo para evitar que se formen en la capa superior las fisuras por reflexión, sino para evitar una fatiga prematura de la sección por agotamiento de la capa superior.

La ventaja adicional que presenta la técnica de extendido en doble capa es la facilidad de garantizar una adecuada compactación del espesor total de la sección, aumentando en consecuencia la resistencia y durabilidad de la misma.

4.4. Fresado

En algunas obras, una vez endurecida la capa, se realiza un fresado de la superficie para lograr una perfecta regularidad. Es una solución que elimina cualquier posible problema de puntos altos y, además, favorece enormemente la adherencia de la capa reciclada con cemento con la primera capa de mezclas bituminosas en caliente. Se ha utilizado con buenos resultados en la rehabilitación de algunos tramos de autovía en los que se requiere

una elevada precisión de la rasante de la capa reciclada, para reponer el mismo espesor retirado de capa bituminosa. La única diferencia con el denominado microfresado consiste en el equipo empleado, con un rotor con más o menos picas. Tras el fresado, se debe realizar un perfecto barrido y aspirado de la superficie para garantizar un adecuado funcionamiento del riego de adherencia.



Figura A3.20 y A3.21. – Detalle del fresado de una capa de material tratado con cemento

4.5. Mejora de la capa bituminosa inmediatamente superior

Se puede mejorar de manera notable la regularidad superficial de la capa bituminosa situada inmediatamente encima de la capa tratada con cemento prefisurada adoptando precauciones adicionales como el extendido con regla de alta compactación o el extendido con sistema de nivelación adecuado (laser, 3D, etc.), de modo que se obtenga una capa con una geometría correcta y una alta densidad.

A4 ANEJO 4

PROCEDIMIENTO ESPECÍFICO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD A LOGRAR EN OBRA PARA MATERIALES RECICLADOS IN SITU

1. Introducción

La maquinaria empleada para el reciclado de materiales in situ puede provocar una modificación en la granulometría de los mismos que es función de varios factores propios de dichos materiales tales como el tipo de material a tratar (características), el grado de consolidación de los mismos, la profundidad o espesor del reciclado y algunos otros factores que dependen de la maquinaria empleada (o del adecuado amasado y mezcla de los materiales), tales como la velocidad de avance de los equipos, la velocidad del rotor y la disposición y buen estado de los elementos de desgaste y de la carcasa de envuelta.

La modificación de la granulometría lleva consigo una variación de la densidad que es posible alcanzar con la maquinaria específica para estos trabajos, densidad que en muchas ocasiones no coincide exactamente con la obtenida en los ensayos previos a la ejecución de las obras.

En este tipo de obras, algunas veces no es posible llevar a cabo ensayos a escala real que permitan realizar ensayos de compacidad con muestras del material ya reciclado, aunque este es el método adecuado. Incluso muchas veces hay variaciones muy importantes tanto en la granulometría como en las características de los materiales que se pueden encontrar a lo largo de una misma obra.

2. Objeto y alcance

El objeto del procedimiento establecido en este anejo es proporcionar a las direcciones de obra, a las empresas de asistencia técnica y a las empresas constructoras una pauta para el desarrollo de un ensayo que permita determinar la máxima densidad que se puede obtener y que es necesario alcanzar en los tajos de reciclado con los equipos de compactación disponibles. Está densidad puede cambiar si se modifican los equipos de compactación y por tanto la energía aplicada.

Este procedimiento debe aplicarse en todas las obras en las que sea preciso ejecutar un reciclado in situ del suelo, independientemente de su aplicación en otro tipo de tecnologías similares como el estabilizado de suelos o la realización de cualquier capa de materiales tratados con cemento.

3. Contenido

3.1 Preparación de la superficie a reciclar

Se considera que se llevará a cabo el reciclado de una superficie pavimentada, por lo que la capa de suelo a reciclar estará ya previamente extendida (e igual con cualquier otro material en el que se pretenda determinar la máxima densidad posible alcanzable con los equipos de obra mediante este ensayo de compactación). Así, se procederá a la mezcla del suelo con el conglomerante y el agua con la máquina recicladora en un tramo no inferior a 100 metros de longitud, de manera similar a como se realiza en la obra (este tramo de ensayo puede formar parte de la misma obra).

Las dotaciones de conglomerante y agua serán las fijadas en la fórmula de trabajo para el tramo en el que se determina la compacidad del material. El porcentaje de agua se calculará restando del porcentaje óptimo de humedad obtenida en el ensayo Próctor modificado del material, el porcentaje de agua que contenga el suelo en el momento de inicio de los trabajos. Se procurará siempre que la mezcla obtenida tenga una humedad próxima a la obtenida como óptima en los ensayos Proctor modificado para ese tramo (± 1 punto de la humedad óptima), estando preferiblemente en la zona seca de la curva Próctor.

3.2 Compactación de la capa reciclada

Para la compactación de este tramo de ensayo se utilizará el mismo rodillo que se vaya a emplear durante toda la obra. El rodillo dará una pasada hacia delante y otra hacia atrás sin vibrar únicamente para aplastar o planchar el material, considerándose en lo sucesivo como "una pasada" el efecto doble de pisar sobre la superficie (ir hacia adelante y hacia atrás). Posteriormente realizará otra pasada (doble paso) con la amplitud de vibración que fije el equipo encargado del reciclado en función del rodillo empleado y del espesor de suelo a tratar (suele usarse la máxima amplitud que el rodillo dispone al menos una o dos veces y las siguientes con la amplitud menor).

3.3 Toma de datos

Después de esta segunda pasada se tomarán datos de densidad y humedad en varios puntos (al menos tres) a lo largo de la banda ya reciclada y compactada parcialmente, anotándose el número de pasadas de rodillo (dos en este caso) a las que corresponde este valor de la densidad, la amplitud de vibración del rodillo y una referencia del punto físico en el que se ha medido dicha densidad. Se realizará una media de todas las densidades y humedades tomadas en esta segunda pasada (si es posible medida en los mismos puntos).

De igual manera se procederá con una tercera pasada, una cuarta y así sucesivamente hasta que se compruebe que las densidades obtenidas resultan inferiores a las obtenidas en la pasada de rodillo anterior. La amplitud de vibración de cada una de las pasadas podrá modificarse a voluntad según la experiencia de los ejecutores de la prueba, siguiéndose siempre las indicaciones del Director de Obra, aunque no se recomiendan cambios para evitar cualquier tipo de error o fallo.

Para la medición de ambos parámetros (densidad y humedad del material reciclado) se utilizarán equipos rápidos de medición debidamente contrastados (como puede ser una sonda nuclear o cualquier equipo similar).

Se comprobará la variación de la humedad en cada uno de los puntos en cada pasada, habida cuenta de los diferentes resultados que puede dar un mismo aparato en un mismo sitio (los aparatos nucleares hacen mediciones superficiales de las partículas de hidrógeno, y por tanto de la humedad del suelo que se obtendrá es superficial. Variaciones de ±1 % del valor de la humedad en un mismo punto se consideran normales y son debidos a los errores de medición del aparato).

Para cada tramo, se dibujará una gráfica en la que en ordenadas se pondrá la densidad y en abscisas el número de pasadas, limitándose el efecto de compactación cuando se compruebe que las densidades obtenidas tras una pasada resultan inferiores a las obtenidas en la pasada de rodillo anterior, lo que normalmente indica que no se debe continuar compactando la capa pues se procede a una descompactación del material.

Este ensayo se repetirá tantas veces como sea preciso a lo largo de la obra y al menos, una vez por semana y cada vez que cambien las características del material.

3.4 Densidad de trabajo

Se tomará como densidad de trabajo aquella que aparezca como máxima en la curva dibujada en el punto anterior y como número de pasadas y amplitud de trabajo las que se deduzcan de dicha curva y que han dado lugar a la máxima densidad que se puede obtener con ese material y esa energía de compactación.

Esta densidad corresponderá a la máxima obtenida en obra y servirá como referencia para realizar la compactación de las probetas y todos los ensayos de control.

El operario conductor del rodillo de compactación, no solo deberá participar en este ensayo de compactación, sino que deberá estar totalmente informado del número de pasadas y la amplitud de trabajo que debe utilizar en el tramo en cuestión, y que corresponden a aquellas con las que se ha obtenido la máxima densidad de material en obra.

Este procedimiento se deberá repetir alguna vez más con objeto de optimizar la compactación, pudiendo modificar la amplitud de vibración del rodillo. También deberá repetirse a lo largo de la obra cada vez que se observe que con el número de pasadas de rodillo establecidas se ha modificado la compactación indicada o bien cada vez que se crea que ha habido una modificación en los materiales a reciclar.

A5 ANEJO 5

FICHAS DE OBRAS RECICLADAS CON CEMENTO

Se ha intentado recoger las características más importantes de algunas de las obras de carretera reciclada in situ con cemento realizadas en España. Para ello se ha resumido la información contenida en las publicaciones realizadas por los responsables de dichas obras, complementada en muchos casos por los datos obtenidos. En consecuencia, y de acuerdo con las fuentes manejadas en cada caso, algunas obras se describen de forma más completa que otras. Además, lógicamente y ante la imposibilidad de incluir todas que suman a fecha actual (2018) más de 250 obras que suponen más de 4.000 km reciclados en España, solo se han incluido algunas de ellas. A pesar de todo, se considera que la experiencia recogida es muy útil para conocer el desarrollo logrado en pocos años por esta nueva técnica en España a través de su aplicación a obras de diversa índole.

5.1. - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS TRAMOS RECICLADOS

5.1.1.- El tráfico

El tráfico que circula por las carreteras recicladas en España hasta la fecha varía desde las categorías más pesadas, como los tramos de la carretera N-431, Huelva – Cartaya, con una intensidad diaria superior a los 12.000 vehículos y 10% de pesados (según datos del año de realización, 1991) o los de la autovía A-231, Camino de Santiago, (con una intensidad de 9.183 vehículos/carril/día con 2.042 camiones en 2007); hasta las categorías más ligeras, como muchos de los tramos realizados en diversas provincias, con tráficos de inferiores a los 25 camiones/día/carril.



Figura A5.1. Reciclado N-431, Huelva–Cartaya. Año 1991



Figura A5.2. N-630. Ruta de la Plata. Cáceres. Año 1995

5.1.2.- ANCHURA DE RECICLADO

El ancho de reciclado es también muy variable, dependiendo lógicamente de la categoría de la carretera. Mientras que en las vías nacionales y carreteras principales se ha llegado a reciclar secciones transversales de 10 m, en las vías de baja intensidad de tráfico o caminos locales a penas se alcanzan los 4,5 m, lo que permite realizar el reciclado con solo dos bandas de trabajo. En las autovías solo se recicla el carril lento resultando una anchura de 3,5 m.

5.1.3.- SECCIONES DE FIRME RECICLADAS

Igualmente, las secciones de firme recicladas son muy distintas existiendo lógicamente en las carreteras principales diferentes capas en el firme mucho más gruesas en su conjunto que en las carreteras secundarias. Así las secciones de firme son tan variables, tanto en espesor como en las características de los materiales, como se describen en los siguientes ejemplos:

Tabla A5.1. Secciones de firmes existentes en calzadas recicladas en España

AUTOVÍA A-231 ***Camino de Santiago***	***CTRA. N-431*** ***Huelva – Cartaya***	***CTRA. N-630*** ***L.P. Salamanca-Cañaveral Sur***	***CTRA. AV-902*** ***Navaluenga-Burgohondo***	***CTRAS. SG-241 y SG-242*** ***Sépulveda-Sacramenia***
12 cm Mezclas fresadas + 6 cm mezcla bituminosa	10-15 cm Mezcla bituminosa en caliente	2,5-9 cm Mezcla bituminosa en frío	5 cm Mezcla bituminosa en frío	Tratamientos superficiales
25 m suelocemento	18 cm Zahorra	11-20 cm Mezcla bituminosa en caliente	30 cm Macadam	15 cm Macadam
	15 cm Zahorra natural	20-25 cm Zahorra artificial o Macadam		

De manera general, y sobre todo en las carreteras de reducido tráfico, los materiales reciclados suelen ser mezclas bituminosas o tratamientos superficiales junto con las capas de macadam de base, apareciendo en algún caso zahorras artificiales. En el caso de las autovías, el material reciclado suele ser una capa de mezcla bituminosa sobre la capa de base de suelocemento deteriorada o zahorra artificial.



Figura A5.3. Reciclado de una carretera ensanchada

5.1.4.- SECCIONES DE RECICLADO NUEVAS

Inicialmente el espesor de las capas recicladas y los firmes diseñados son muy heterogéneos ante la ausencia de un catálogo y normativa, obteniéndose mediante métodos analíticos por comparativa con otras opciones de rehabilitación. Mientras que los espesores de reciclado suelen variar de 25 a 35 cm, reduciéndose a 20 cm para las calzadas con baja intensidad de tráfico pesado, los espesores de mezcla bituminosa varían mucho más, disponiéndose en las primeras realizaciones espesores muy reducidos a pesar del tráfico pesado muy elevado.

Actualmente se tiende a homogeneizar las secciones de acuerdo con las incluidas en las Recomendaciones de Proyecto y Construcción de Firmes y Pavimentos de la Junta de Castilla y León, con las ligeras correcciones introducidas en el presente Manual de Firmes Reciclados in situ con Cemento.



Figura A5.4.- Vista exterior del reciclado de Zamarramala. Segovia. Año 1997



Figura A5.5.- Extensión del corrector granulométrico. Sacramenia. Segovia. 1998



Figura A5.6.- Reciclado de arcenes en N-430. Badajoz. 1998



Figura A5.7.- Reciclado en Ubrique. Cádiz. 1998

Para la realización del reciclado, en algunas obras se aporta cierto material como corrector granulométrico cuando la capa de base tiene una granulometría muy discontinua (por ejemplo, un macadam sin recebar), o bien para mejorar la rasante, obtener el peralte de las curvas o lograr el espesor de firme suficiente para reciclar (en esto casos suele disponerse una zahorra o suelo seleccionado).

5.1.5.- EQUIPOS

En cuanto a la maquinaria utilizada, si bien en la primera realización se empleó un equipo ARC-700 del grupo francés BEUGNET, y en alguna otra obra posterior se ha utilizado una recicladora Caterpillar RM-350, una Wirtgen 2000 DC ó 2100 DCR con un mezclador Raco-250 detrás, actualmente se emplean recicladoras de varias casas destacando las Wirtgen WR 2500.



Figura A5.8.- Prefisuración en la Ruta de la Plata. 1995



Figura A5.9.- Compactación del material reciclado SG-310. Segovia. 1997



Figura A5.10.- Refino con motoniveladora. Barcelona. 2001



Figura A5.11.- Terminación con compactador de neumáticos. Cáceres. 1995

La distribución del conglomerante ha sufrido una evolución similar. Si bien, inicialmente se utilizaron diversos dosificadores con alveolar regulado en función del avance (el equipo más utilizado para la dosificación en polvo es el Panien), el empleo de las recicladoras Wirtgen ha permitido el uso mayoritario de distribuidores de lechada de esta misma marca, introduciéndose en el año 97 los equipos WM 400 y posteriormente los WM 1000, con el fin de lograr mayores rendimientos.

El equipo de compactación empleado suele estar formado por un único rodillo mixto de más de 16 t de peso total y una carga estática por centímetro de generatriz de aproximadamente 53 kp/cm, aunque en algunas obras se han utilizado dos equipos formados por un rodillo tandem vibratorio (de unas 17-19 t) y un rodillo de neumáticos de unas 35 t (5 t por rueda). Últimamente suele utilizarse un rodillo pesado que da una o dos pasadas detrás del equipo de reciclado, realizándose posteriormente un refino con motoniveladora (y en su caso, la prefisuración previamente), para lograr una regularidad superficial aceptable. Posteriormente se termina el proceso de compactación con 3-4 pasadas dobles con el mismo u otro rodillo menos pesado.

Salvo en algunas obras, en la mayoría no se ha realizado la prefisuración de la capa reciclada. Hasta la fecha, no se han observado problemas importantes por reflexión de las fisuras en la capa de rodadura en las obras de reducido tráfico pesado, pero es una técnica necesaria para tráficos importantes (tráfico de categoría superior a los 200 vehículos pesados/día/carril), cuyo problema se agrava con fuertes gradientes térmicos.

Los rendimientos medios obtenidos llegan a los 5.000–6.000 m^2/día, habiéndose obtenido en algunas obras rendimientos de 8.000 m^2/día (unos 1.000 m2/hora), aunque este valor se ve ampliamente reducido a medida que la planificación de la obra se complica por la necesidad de mantener el tráfico circulante, hay problemas con el suministro del cemento, o la anchura de la calzada obliga a muchas bandas solapadas, y por tanto muchas maniobras de los equipos.

5.1.6.- CURADO Y PROTECCIÓN

Mientras que muchas de las realizaciones se han llevado a cabo sin tráfico, desviando el mismo por otras rutas alternativas, en algunas carreteras el reciclado se ha realizado por bandas dando paso inmediato al tráfico o permitiendo su circulación pasadas algunas horas. Para ello, tras el curado con un riego asfáltico (emulsión tipo ECI o ECR-1), se extiende un árido 3-6 mm de protección.

El período transcurrido desde el reciclado del firme existente hasta el extendido de la capa superior de mezcla bituminosa es muy variable de unas obras a otras, entre 1 ò 2 semanas hasta 3 ò 4 meses dependiendo de cada obra (aunque se protege en el caso de circular tráfico).





Figura A5.12. y A5.13. Autovía A-231 o Camino de Santiago. Reciclado con cemento del carril lento para rehabilitar varios tramos en las provincias de León y Palencia..

RELACIÓN DE OBRAS

1. N·431, Huelva - Cartaya (Huelva) (Andalucía)
2. C-519, Villabrágima - Villagarcía de Campos (Valladolid) (Castilla y León)
3. N-630, Límite provincia de Salamanca - Cañaveral Sur (Cáceres) (Extremadura)
4. N-430, Acedera - Presa de García Sola (Badajoz) (Extremadura)
5. SG-310, Tramo experimental en acceso a Zamarramala (Segovia) (Castilla y León)
6. AV-902, Navaluenga - Burgohondo (Ávila) (Castilla y León)
7. SG-211, C-60l - Aguilafuente (Segovia) (Castilla y León)
8. C-3331, Ubrique - Jimena de la Frontera por Puerto Gáliz. Parque Natural de los Alcornocales (Cádiz) (Andalucía)
9. SG-241, Sepúlveda - Sacramenia (Segovia) (Castilla y León)
10. BA-V.9014, Aceuchal - Villafranca de los Barros (Badajoz) (Extremadura)
11. AV-114, San Pedro del Arroyo - Muñico (Avila) (Castilla y León)
12. P-953, Becerril de Campos - Fuentes de Nava (cruce con P-940) (Palencia) (Castilla y León)
13. BU-400 Castrojeriz-Villaquiran de los Infantes (Burgos) (Castilla y León)
14. P-940, Mazariegos - Fuentes de Nava (cruce con P-953) (Palencia) (Castilla y León)
15. P-963, de P-961 a Cervatos de la Cueza (cruce N-120) (Palencia) (Castilla y León)
16. P-984, de N-611 a San Cebrian de Campos (Palencia) (Castilla y León)
17. P-411 Valdemorillos (cruce P-410) - Torquemada (Palencia) (Castilla y León)
18. P-921 Torremormojón - Ampudia y P-943 Ampudia-Valoria de Alcor (Palencia)(Castilla y León)
19. CL-517, Vitigudino - La Fregeneda. Pk 66+700 a 110+150 (Salamanca)(Castilla y León)
20. Carretera A-222 de Ventas de Muniesa a Cortes de Aragón (Zaragoza)(Aragón)
21. Acceso al Arenal (Ávila) (Castilla y León)
22. CL-622. Santa María del Páramo - La Bañeza (León)(Castilla y León)
23. N-632a De las Dueñas a Canero (Asturias) (Principado de Asturias)
24. Carretera de Revilla a Puente Arce (Cantabria) (Cantabria)
25. LE-510 y ZA-510, Valencia de Don Juan a Fuentes de Ropel (León y Zamora) (Castilla y León)
26. Via de servicio perimetral del aeropuerto de Pamplona (Navarra)(Navarra)
27. AV-941, Venta de Rasquilla (N-502) - Hoyos del Espino (Ávila)(Castilla y León)
28. Arzua-Portodemouros (Orense) (Galicia)
29. Acceso a Laguna de Negrillos (León)(Castilla y León)
30. Acceso al Teide (Tenerife) (Islas Canarias)
31. Ramales de la carretera de los pantanos P-210: P212, P213, P216 Y P217 (Palencia) (Castilla y León)
32. Carretera BI-2543, de Dima a Otxandio (Vizcaya)(País Vasco)
33. Carretera a Txanka/Orio (Guipuzcoa)(País Vasco)
34. Autovía A231, de León a Burgos, rehabilitación en la provincia de Palencia(Castilla y León)
35. SO-615, de Ausejo a Paraje de Recelada (Soria)(Castilla y León)
36. CV377, de Bugarra a Gestalgar (Valencia) (Comunidad Valenciana)
37. Actuación de recuperación ambiental del rio Segura en Cieza (Murcia) (Murcia)
38. CM-3105 de La Roda a Barrax (Albacete) (Castilla La Mancha)
39. Caminos de la Confederacion Hidrografica del Ebro en Gimenells (Lerida) (Cataluña)
40. Reparación y mejora del camino de Eguino a Ziordia (Álava) (País Vasco)
41. Camino de servicio particular en El Escorial (Madrid) (Comunidad de Madrid)
42. SE-4108. Ramal de la A-8100 a Arahal, Carmona (Sevilla)(Andalucía)

OBRA Nº 1 | TRAMO: N·431, HUELVA - CARTAYA (HUELVA) (ANDALUCÍA)







Administración: Ministerio de Fomento
Contratista: TRACSA
Fecha realización: 3/12/91 a 24/3/92 (52 días reales de trabajo)
Longitud: 13,2 km (3 tramos)
Superficie: 94 871 m²
Tráfico: T2 (IMD: 12 000, 10% pesados)
Sección existente: 7 m de calzada + 1,5 - 2,5 m de arcén a cada lado
Firme existente: Según tramos: 10 - 15 cm MBC + 15 cm ZA + 15 cm ZN.
Explanada constituida en general por suelos tolerables (calizas o arcillas), con índices de plasticidad entre 10 y 25 y límites líquidos entre 25 y 40.
El espesor total de zahorras variaba entre 30 y 60 cm en algunos tramos, y el de mezcla bituminosa entre 3 y 25 cm.
En otros tramos, bajo la mezcla bituminosa se encontraba zahorra artificial (10 - 25 cm) sobre mezcla bituminosa (7 - 15 cm), macadam (7 - 15 cm) y zahorra. En varios puntos, sobre el macadam, en vez de mezcla bituminosa, se había dispuesto un tratamiento superficial con gravilla.
Problemas observados: Deterioros en un gran porcentaje de su superficie
Firme nuevo: Reciclado en un espesor de 30 cm + 5 cm MBC
Corrector granulométrico: No
Espesor reciclado: 30 cm.
% cemento y tipo: 4,5 % V-35
Ensayos previos:

Granulometría

Tamices UNE	40	25	20	12,5	5	2,5	0,63	0,080
Aglomerado recuperado								
2-1-M	100	96,4	93,1	75,3	46,0	29,0	11,2	2,3
6-1-M	100	98,6	96,0	73,5	42,3	26,2	9,2	1,8
Gravas recuperadas								
1-2-G		42,4	37,4	22,1	11,1	7,6	3,6	1,8
3-2-G		74,0	69,0	53,0	40,0	32,6	21,6	8,7

Equivalente de arena

Aglomerado recuperado	89
Gravas recuperadas	35

Azul de metileno

3 g de azul por 100 g de finos

Humedad óptima

% Cemento V-35	4,5	5,5
Hopt (%)	5,6	7,2
Dmax (t/m³)	2,24	2,24

Resistencia a compresión simple

% Cemento V-35	7 días	28 días	90 días
4,5	36	51	54
5,5	30	48	56

Resistencia en obra: 3,3/ -- / 6,1 MPa
(7/28/90 días)
Resistencia de testigos (edad): Media: 6,5 MPa - Valores extremos: 1,0 - 11,9 MPa (a 6 meses)
Densidad/Humedad en obra: Humedad: 6,5% - Densidad: 2,1 t/m^3
Densidad de testigos: Media: 2,25 t/m^3- Valores extremos: 1,98 - 2,36 t/m^3
Equipo de dosificación: Distribuidor alveolar remolcado por tractor
Equipo de reciclado: Recicladora ARC-700 (750 CV, 36 000 kp)
Ancho/n. pasadas 2 m (25 cm de solape entre bandas de reciclado)
Equipo de refino: Motoniveladora
Equipo de compactación: Rodillo Dynapac CA 511 (48,8 kp/cm en carga estática)
Rendimiento medio: 1,9 m/min, pero muy dependiente del espesor de mezcla bituminosa:
- entre pk 94 y 103: 313 m/día
- entre pk 91 y 92,5: 156 m/día (valor mínimo: 0,5 m/min)

Rendimiento máximo: 590 m/día (4 m/min)
Equipo de prefisuración: No
Distancia entre juntas:
Capa de protección: Riego de curado e imprimación con emulsión ECI y extensión de árido de cobertura
Paso inmediato del tráfico: Sí
Período sin capa superior: Según tramos, hasta 3 meses
Auscultación del firme: Al cabo de 7 meses de concluir la obra:
- deflexión media: entre 8 y 15 (1/100 mm)
- deflexión característica: entre 17 y 35 (1/100 mm)

Coeficiente de viágrafo medio entre 2,4 y 3,1, salvo en la zona comprendida entre el pk 91+350 y 93+000, en donde sube a 6,2

Comportamiento: Correcto en el año 1999
Separación media entre fisuras transversales: 4,5 m
Bandas longitudinales ocasionales con síntomas de agotamiento apareciendo de forma alterna en las proximidades de uno de los arcenes. Probable causa: contaminación con materiales arcillosos, procedentes de la base de los arcenes, durante el proceso de reciclado

Observaciones: Las deflexiones en los tramos reciclados se redujeron a una quinta parte de las existentes antes del tratamiento (25 (1/100 mm)) frente a 115 (1/100 mm)), mientras que en otros tramos reforzados con 10 cm de MBC dicha disminución fue solamente de un 50% (60 (1/100 mm)).
El espesor real de mezcla bituminosa, medido sobre testigos, oscila entre 2,8 y 6,1 cm, con un valor medio de 4,7 cm.
Los módulos dinámicos de los testigos variaron entre 3 500 y 10 900 MPa, con un valor medio de 6 275 MPa.

OBRA Nº 2 | TRAMO: C-519, DE VILLABRÁGIMA-VILLAGARCÍA DE CAMPOS (VALLADOLID) (CASTILLA Y LEÓN)









Administración: Junta de Castilla y León
Contratista: Dragados
Fecha realización: 4/5/94 a 25/5/94
Longitud: 16 km
Superficie: 106 000 m2 (toda la calzada, incluso arcenes)
Tráfico: T3 (IMD: 935, 8% pesados)
6,40 m pavimentados sin arcenes (en 1987 se realizó un ensanche)
Firme existente: 8 cm MB + 25 cm ZA (en ensanche), macadam en tronco carretera antigua
Firme nuevo: Reciclado 33 cm + 5 cm microaglomerado con fibras acrílicas o 6 cm MBC S-12 con B 60/70
Problemas observados: Gran pérdida de capacidad estructural por problemas de drenaje y las arcillas de gran plasticidad existentes
Corrector granulométrico: No
Espesor reciclado: 33 cm
% cemento y tipo: 4,1 % II/C-35 A (28 kg/m^2)

Granulometría

Tamices UNE	40	25	20	10	5	2	0,40	0,080
Zahorra artificial	100,0	85,0	80,0	56,7	36,9	29,0	15,5	8,7
Zahorra artificial + aglomerado	100,0	92,9	87,5	64,0	54,4	33,7	9,3	7,2

Plasticidad

	LL	LP	IP	Equivalente arena
Zahorra artificial	20,2	13,7	6,5	29
Zahorra artificial + aglomerado	No plástico	No plástico	No plástico	70

Estudio de la fórmula de trabajo

Cemento (%)	Proctor Modificado		CBR 3 horas		Resistencia compresión 7 días (MPa)	
	Humedad óptima (%)	Densidad máxima (t/m^3)	Humedad óptima (%)	CBR caliente	Humedad óptima (%)	Resistencia (MPa)
3,0	8,2	2,019	8,0	32,0	6,5	1,72
4,0	8,2	2,033	7,8	37,7	6,6	2,47
5,0	8,2	2,052	7,7	42,5	6,8	2,99
6,0	8,3	2,071	7,7	46,5	6,8	3,78

Resistencia en obra (7/28/90 días):	2,66 / -- / -- MPa
Resistencia de testigos (edad):	4,77 MPa (13 meses)
Densidad/Humedad en obra:	--
Densidad de testigos:	2,19 t/m^3
Equipo de dosificación:	Distribuidor de cemento ELDE-15 en polvo (dosificación volumétrica controlado por la velocidad con un sistema de autopesado y corrección de dosificación media)
Equipo de reciclado:	Recicladora Wirtgen 2000 DC + mezclador Raco-250
Ancho de reciclado/nº de pasadas:	--
Equipo de refino:	Motoniveladora
Equipo de compactación:	1 rodillo vibrante mixto
Rendimiento medio:	900 m^2/h
Rendimiento máximo:	1 500 m^2/h
Equipo de prefisuración:	Olivia
Distancia entre juntas:	3-5 m
Capa de protección:	Riego de curado con emulsión ECL-1 (0,4 kg/m^2) y sellado con gravilla
Paso inmediato del tráfico:	Sí
Período sin capa superior:	1 día
Auscultación del firme:	Reducción de deflexiones de valores medios de 120(1/100 mm) a 30 (1/100 mm) (medidas al año de reciclar)
Comportamiento:	Bueno
Observaciones:	Las fisuras se reflejaron en el pavimento al poco tiempo, pero no ha sufrido mayor deterioro ni evolución (desgaste en los labios) después de 24 años (tiene un tráfico muy bajo, inferior al previsto, pero un clima agresivo)

OBRA Nº 3 | TRAMO: N-630, DE LÍMITE PROVINCIA SALAMANCA A CAÑAVERAL SUR (CÁCERES) (EXTREMADURA)









Administración:	Ministerio de Fomento
Contratista:	Cubiertas MZOV
Fecha realización:	13/6/95 a 14/9/95 (83 jornadas efectivas)
Longitud:	35,962 km (5 tramos)
Superficie:	283 098 m^2
Tráfico:	T1 - T2 (según zonas, IMD entre 4 000 y 7 000, con porcentaje de vehículos pesados entre el 18% y el 29%)
Sección existente:	Calzada: 6,5 - 7 m - Arcenes: 0,5 - 1,5 m a cada lado
Firme existente:	Muy variable según tramos En los 6 m centrales: 2,5 a 9 cm MBF (en dos capas) 11,5 a 20 cm MBC (en tres ó cuatro capas) 20 a 50 cm ZA o macadam recebado. En los ensanches para pasar de 6,5 a 7 m de calzada, cuñas de firme escaso (una ó dos capas sobre unos 20 cm de pizarra machacada)
Problemas observados:	Envejecimiento de MBC y MBF; ejecución de sucesivos refuerzos con capas demasiado delgadas de mezclas bituminosas, mal adheridas entre sí e incluso con defectos de compactación; escasa calidad de zahorras y macadams, con finos plásticos Como consecuencia, zona central de la calzada muy agrietada y fisurada, y zonas de ensanche prácticamente rotas
Firme nuevo:	En tramos con explanada E2: - 10 cm MBC + 25 cm reciclado en parte central - 10 cm MBC + 25 cm reciclado+15 - 25 cm ZA en parte exterior En tramos con explanada E1 el espesor reciclado se aumentó a 30 cm
Corrector granulométrico:	No
Espesor reciclado:	25 - 30 cm según categoría de explanada
% cemento y tipo:	5%; II-F 35 A
Ensayos previos:	--
Resistencia en obra (7/28/90 días):	2,2 / 2,7 / 3,1 MPa
Resistencia de testigos (edad):	Media: 4,6 MPa; media zona central: 4,3 MPa; media ensanches: 5,3 MPa (testigos tomados entre 60 y 162 días)
Densidad/Humedad en obra:	1,91 t/m3 - 5%
Densidad de testigos:	--
Equipo de dosificación:	Camión dosificador con alveolar regulado en función de su avance
Equipo de reciclado:	Dos recicladoras Wirtgen 2100 DCR en paralelo (desfase de 15 m)
Ancho de reciclado/nº de pasadas:	2 m
Equipo de refino:	No
Equipo de compactación:	Rodillo tándem vibratorio de 15 t Rodillo de neumáticos de 35 t (5 t por rueda)
Rendimiento medio:	866 m/día (3,5 - 4 m/min)
Rendimiento máximo:	1.550 m/día
Equipo de prefisuración:	Solamente se prefisuró con placa vibrante provista de cuchilla un tramo de 100 m
Distancia entre juntas:	2,5 - 3,5 m

Capa de protección:	Al principio de la obra, 1 kg/m^2 de emulsión ECR-2 y árido de sellado. Posteriormente, sólo emulsión ECI, para evitar problemas de derrapes.
Paso inmediato del tráfico:	Al cabo de 4 horas
Período sin capa superior:	- Primera capa de 5 cm de MBC: 3 meses después del reciclado - Segunda capa de 5 cm de MBC: en 1998
Auscultación del firme:	En octubre de 1996 se realizó una campaña de deflexiones sobre elfirme reciclado más la la primera capa de MBC, obteniéndose valores medios comprendidos entre 35 y 75 (1/100 mm) según los tramos. Ello ha supuesto una disminución radical de las deflexiones con respecto a las registradas un año antes de iniciarse el reciclado (febrero - marzo 1994), en donde se obtuvieron deflexiones características comprendidas, en general, entre 110 y 260 (1/100 mm), con una media de 160.
Comportamiento:	Se clasifica como un buen comportamiento en la edición del manual de 1999. Durante el período en que únicamente se había dispuesto una capa de MBC, las fisuras de retracción se reflejaron en la superficie de la misma sin ser preocupantes (se hacían visibles en los meses fríos y no se apreciaban en los templados). Las juntas del tramo prefisurado se reflejaban en todas las épocas del año, si bien el espesor de MBC sobre las mismas era reducido (datos del año 1999).
Observaciones:	Previamente al reciclado se procedió a la excavación y retirada de los materiales que componían el ensanche y el arcén de cada una de las márgenes, respetándose los 6 m centrales. Las cajas así abiertas se rellenaron con zahorra artificial en un espesor de 40 a 55 cm según tramos, procurando ensanchar la plataforma hasta un máximo de 7/10 m. El reciclado se llevó a cabo en un ancho de 8 m.

OBRA Nº 4 | TRAMO: N-430, DE ACEDERA A PRESA DE GARCÍA SOLA (BADAJOZ) (EXTREMADURA)







Administración: Ministerio de Fomento
Contratista: Lain y Ecoasfalt
Fecha realización: 11/12/95 - 9/4/96
Longitud: 59 km
Superficie: 103 343 m²
Tráfico: T3 (IMD: 1899, 29% pesados)
Sección existente: Se reciclaron los arcenes sin pavimentar
Firme existente: Zahorra natural con espesor entre 40 y 62 cm
Problemas observados: Se trataba de arcenes sin pavimentar, con un desnivel respecto a la calzada
Firme nuevo: Reciclado en un espesor de 20 a 22 cm en función del tipo de explanada
7 cm mezcla G-20 + 5 cm mezcla S-20
Corrector granulométrico: Zahorra artificial Z1 - 40 (ver Observaciones)
Espesor reciclado: 20 - 22 cm en función del tipo de explanada
% cemento y tipo: 2,5 % II/F-35 A
Ensayos previos:

Tamices UNE	80	63	50	40	25	20	10	5	2	0'4	0'08
Material procedente del fresado en arcenes más material de marcadora adyacente del borde exterior del firme de la calzada	100	97	93	81	75	59	52	40	32	14	5'7
Material de aportación	100	100	100	100	90	77	54	36	23	16	4'6
Material fresado (75%) + Material de aportación (25%)	100	98	95	86	79	63	52	39	30	14	5'1

Cemento (%)	Densidad probetas (t/m³)	Resistencia a compresión (MPa)	
		7 días	28 días
2,5	2'18	2'14	3'34
3	2'21	4'26	7'00

Resistencia a compresión (7/28/90 d): 3,4 / 4,9 / 8,2 MPa
Resistencia en obra (7/28/90 días): --
Resistencia de testigos (edad): 4,77 MPa (13 meses)
Densidad/Humedad en obra: Humedad: 2,5 - 5%
Densidad de testigos: --
Equipo de dosificación: --
Equipo de reciclado: Recicladora Caterpillar RM-350
Ancho de reciclado/nº de pasadas: 1'75 m
Equipo de refino: --
Equipo de compactación: Rodillo tándem Lebrero VTA-90 +
rodillo de neumáticos Lebrero CNL-721
Rendimiento medio: 3 334 m²/día

Rendimiento máximo:	6 230 m^2/ día
Equipo de prefisuración:	No
Distancia entre juntas:	
Capa de protección:	Riego de curado e imprimación con emulsión ECI y extensión de arena de cobertura
Paso inmediato del tráfico:	
Período sin capa superior:	4 meses
Auscultación del firme:	--
Comportamiento:	Bueno (según el Manual del año 1999)
Observaciones:	Para reciclar el material existente en los arcenes, constituidos por un espesor de zahorra natural variando entre 40 y 62 cm, fue necesaria la realización de algunas operaciones previas, ya que la presencia de macadam en los 50 cm adyacentes al borde exterior de la calzada daba como resultado en la zona de la junta calzada - arcén una mezcla de granulometría deficiente, abierta y falta de compacidad, y un acabado superficial inadecuado. Para solucionar este problema se realizó con motoniveladora un mezclado transversal de los materiales del arcén, a fin de mejorar su homogeneidad Además, para obtener la pendiente transversal necesaria, así como una granulometría más adecuada, se realizó una aportación de zahorra artificial tipo ZA-40. Las altas resistencias obtenidas inicialmente llevaron a modificar el porcentaje de cemento, establecido en un principio en el 4% , y que finalmente se redujo al 2,5%.

OBRA Nº 5 | TRAMO EXPERIMENTAL SG-310 ACCESO A ZAMARRAMALA (SEGOVIA)(CASTILLA Y LEÓN)









Administración: Junta de Castilla y León
Contratista: COLLOSA (Recicla Asfaltécnica)
Fecha realización: 9/04/97 (3 días)
Longitud: 1,5 km
Superficie: 10 500 m^2
Tráfico: T3
Sección existente: 6,50 -7,20 m - Ancho reciclado: 8 m para obtener una explanada E3
Firme existente: 3-4 cm MBC + 20 cm ZN con IP > 12
Firme nuevo: 23 cm hormigón poroso + 25 cm suelocemento (sin compactar con rodillo)
Problemas observados: Firme muy deteriorado, con piel de cocodrilo y blandones
Espesor reciclado: 25 cm. 40 cm en alguna zona de blandón
% cemento y tipo: 2 % II-C/35A (8 kg/m^2 para obtener la explanada)
Ensayos previos:

Granulometría

Tamices UNE	40	25	20	10	5	2	0,40	0,080
Material reciclado + cemento	100	97,9	93	60,1	38,4	26,3	6,7	1,7

Dmáx = 2,06 t/m^3
Hópt = 7,6%
CBR = 121
Resistencia a compresión (7 días): 1,53 MPa

Resistencia en obra (7/28/90 días): 1,4 / - / - MPa CBR (7 días) = 136
Resistencia de testigos (edad): --
Densidad/Humedad en obra: 101 % Dmáx / 87% Hópt
Equipo de dosificación: Distribuidor de lechada WIRTGEN WM 400
Equipo de reciclado: Recicladora WIRTGEN WR 2500
Ancho de reciclado/nº de pasadas: 2,5 m / 4 pasadas
Equipo de refino: Motoniveladora
Equipo de compactación: Rodillo mixto HAMM 5011
Rendimiento medio: 4.000 m^2/día
Rendimiento máximo: 7.000 m^2/día
Capa de protección: Riego de curado y sellado con arena
Paso inmediato del tráfico: No
Período sin capa superior: Una semana
Auscultacíon del firme: Deflexión media capa reciclada 54 (1/100 mm)
IRI medio capa reciclada calzada derecha 3,9
IRI medio capa reciclada calzada izquierda 3,4
Comportamiento: Bueno (según datos del año 1999)
Observaciones: --

OBRA Nº 6 | TRAMO: AV-902, DE NAVALUENGA A BURGOHONDO (ÁVILA) (CASTILLA Y LEÓN)





Administración: Junta de Castilla y León
Contratista: COPROSA (Recicla Asfaltécnica)
Fecha realización: 22/08/97 - 4/09/97
Longitud: 4,5 km
Superficie: 31 500 m²
Tráfico: T41 (IMD:1152, 60= 5% pesados en 2004 que son 30)
Sección existente: 5,00 m pavimentados sin arcenes (se ensanchó a 6/7 m)
Firme existente: 30 cm macadam + riego + 5 cm MBF
Firme nuevo: 30 cm reciclado (suelocemento en cajeos laterales) + 8 cm MBC
Problemas observados: Pérdida de capacidad resistente
Espesor reciclado: 30 cm
% cemento y tipo: 4% V-35 en calzada reciclada y 5% V-35 en suelocemento in situ
Ensayos previos:

Granulometría

Tamices UNE	40	25	20	10	5	2	0,40	0,080
Suelo en ensanches			100,0	98,8	93,3	59,4	16,4	6,9

Hopt = 9,5% Dmáx = 1,94 t/m³

Estudio fórmula de trabajo (suelocemento en ensanches)

Cemento (%)	Proctor Modificado		Resistencia a compresión (MPa)	
	Densidad máxima (t/m³)	Humedad óptima (%)	3 días	7 días
3	2,09	8,5	1,29	1,65
4	2,10	8,2	2,02	2,38
5	2,11	7,7	2,21	2,49
6	2,11	8,0	2,46	2,73

Resistencia a compresión: 2,5 MPa (7 días)

Resistencia en obra (3/7/28 días): Calzada: 3,09 / 3,80 / 4,85 MPa
Suelocemento ensanche: 1,86 / 2,07 / 2,90 MPa
Banda calzada-ensanche: 2,84 / 3,27 / 4,41 MPa
Resistencia de testigos (edad): --
Densidad/Humedad en obra: 2,1 t/m³ / 8,2%
Equipo de dosificación: Distribuidor de lechadaWirtgen WM 400
Equipo de reciclado: Recicladora Wirtgen WR 2500
Ancho de reciclado/nº de pasadas: 2,4 m / 3
Equipo de refino: Motoniveladora
Equipo de compactación: Rodillo vibrante mixto
Rendimiento medio: 450 m²/hora
Rendimiento máximo: --
Capa de protección: Riego de curado (ECR-1) y sellado con gravilla
Paso inmediato del Tráfico: Sí
Período sin capa superior: --
Auscultacíon del firme: Reducción de deflexiones a los 3 meses del 50% (viga Benkelman): pasaron de 150 a 73 (x 1/100 mm)
Observaciones: Previamente al reciclado se realizó un cajeo de ambas márgenes, rellenándose con jabre para la obtención de un suelocemento in situ con la misma maquinaria de reciclado.

OBRA Nº 7 | TRAMO: SG-211, DE C-601 A AGUILAFUENTE (SEGOVIA) (CASTILLA Y LEÓN)





Administración: Junta de Castilla y León
Contratista: Canteras Ortiz, S.A. - Grecoc, S.A. (UTE) (Recicla Asfaltécnica)
Fecha realización: 16 - 27 octubre 1997 y 3 - 5 junio 1998
Longitud: 8,5 km
Superficie: 59 500 m^2
Tráfico: --
Sección existente: 6 - 6,5 m
Firme existente: 5 cm MBF + 20 cm macadam silíceo
Firme nuevo: 25 cm reciclado + 5 cm S-20 + 6 cm S-12
Problemas observados: --
Espesor reciclado: 25 cm
Corrector granulométrico: 10% arena machaqueo caliza
% cemento y tipo: 3 % cemento CEM IV/B 32,5
Ensayos previos:

Granulometría

Tamices UNE	50	40	25	20	10	5	2	0,40	0,080
Material reciclado + arena	100,0	100,0	81,2	74,6	57,8	39,4	31,3	17,0	8,1
Material reciclado + cemento	100,0	97,7	81,9	76,8	57,6	34,7	26,5	18,1	13,1

Estudio de la fórmula de trabajo

Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad probetas (t/m^3)	Resistencia a compresión (MPa)	
			7 días	90 días
2,5	6,4	2,199	1,63	2,20
3,0	5,5	2,197	2,05	2,40
3,5	6,0	2,192	2,27	3,14

Dmáx = ,24 t/m^3 Hopt = 5,5 %

Resistencia en obra (7/28/90 días): 2,86 / - / 5,2 MPa
Resistencia de testigos (edad): 5,2 MPa (90 días)
Densidad/Humedad en obra: 2,05 t/m^3 - 5,7 %
Equipo de dosificación: Distribuidor de lechada Wirtgen WM 400
Equipo de reciclado: Recicladora Wirtgen WR 2500
Ancho de reciclado/nº de pasadas: --
Equipo de refino: Motoniveladora
Equipo de compactación: Rodillo vibrante mixto
Rendimiento medio: 7.000 m^2/día - 800 m^2/hora
Rendimiento máximo: --
Capa de protección: Riego de curado con emulsión ECL-1 (0,4 kg/m^2)
Paso inmediato del tráfico: No
Período sin capa superior: 2 semanas
Auscultacíon del firme: Deflexiones + placa de carga
Comportamiento: Bueno (año 1999)
Observaciones: --

OBRA Nº 8 | TRAMO: C-3331, DE JIMENA DE LA FRONTERA A PUERTO GALIZ (CÁDIZ) (ANDALUCÍA)







Administración: Junta de Andalucía
Contratista: Construcciones Salvador Rus López (Recicla Soltec)
Fecha realización: mayo - junio 1998
Longitud: 59,6 km
Superficie: 327 800 m² (ancho de reciclado: 5,5 m)
Tráfico: T4 (IMDP: 20)
Sección existente: --
Firme existente: DTS sobre macadam recebado con ZA en algunos sitios
Problemas observados: Firme antiguo muy deformado y deteriorado superficialmente
Firme nuevo: Reciclado en 20 cm + lechada bicapa
Corrector granulométrico: No
Espesor reciclado: 20 cm
% cemento y tipo: 2,5 % CEM II-A 32,5
Ensayos previos:

Granulometría previa al reciclado

Tamices UNE	75	63	50	40	25	20	11,5	10
% que pasa	100	98,1	71,2	37,5	12,5	8,3	2,6	1,1

Resistencia a compresión a 7 días

Cemento (%)	Resistencia (MPa)
2,0	2,0
3,0	2,5
4,0	3,2

Resistencia a compresión (7/28/90 d): 3,1 / 4,1 / 5,6 MPa
Resistencia en obra (7/28/90 días): --
Resistencia de testigos (edad): --
Densidad/Humedad en obra: 2,12 t/m³ – 4,3%
Densidad de testigos: --
Equipo de dosificación: Distribuidor de lechada Wirtgen WM 400
Equipo de reciclado: Recicladora Wirtgen WR 2500
Ancho de reciclado/nº de pasadas: 5 m / 2
Equipo de refino: Motoniveladora CAT 12 G
Equipo de compactación: Rodillo monocilíndrico 17 t + rodillo 13 t
Rendimiento medio: 7.000 m²/día
Rendimiento máximo: 10.000 m²/día
Equipo de prefisuración: No
Distancia entre juntas: ---
Capa de protección: Emulsión ECR = de curado + slurry bicapa
Paso inmediato del tráfico: Sí
Período sin capa superior: 1-2 semanas
Auscultación del firme: --
Comportamiento: El firme reciclado se comporta correctamente, si bien, al continuar los deslizamientos de la plataforma, aparecieron grietas en el mismo (año 1999)
Observaciones:

OBRA Nº 9 | TRAMO: SG-241/SG-242, DE SEPÚLVEDA A SACRAMENIA (SEGOVIA) (CASTILLA Y LEÓN)









Administración: Junta de Castilla y León
Contratista: PROBISA
Fecha realización: 25/5/1998 - 3/7/1998
Longitud: 14,5 km
Superficie: 82 650 m^2
Tráfico: SG-241: T4 (218 vehículos, 12% pesados)
SG-242: T4 (123 vehículos, 24% pesados)
Sección existente: 4,5 / 5 m
Firme existente: Macadam en base y tratamiento superficial en rodadura.
Problemas observados: Deformaciones de firme transversales y longitudinales, deflexiones importantes.
Firme nuevo: 25 cm reciclado + 10 cm MBF + LB4 (5,60/6 m)
Espesor reciclado: 25 cm (15 cm de firme existente y 10 cm de zahorra artificial)
Corrector granulométrico: Zahorra artificial ZA(25) (Ver observaciones)
% cemento y tipo: 2,1 %, CEM II/B-M 32,5 UNE 301:96
Ensayos previos:

Granulometría

Tamices UNE	80	63	50	40	25	20	12,5	10	5	2,5	1,25	0,63	0,32	0,16	0,08
Firme existente (10 muestras)	100	96	88,6	74,5	56,1	50,6	40,7	37,0	28,9	24,2	20,1	17,7	14,1	11,2	9,29
Zahorra artificial				100	99	97	87	78	54	39	28	22	18	15	12,3
Zahorra artificial + firme	100	96,75	93	84,5	73	68,75	58,75	53,25	38,5	29,75	23	19	15,5	12,5	10,25

Plasticidad

	LL	LP	IP	Equivalente arena
Zahorra artificial	no plástico	no plástico	no plástico	32
Firme existente (10 muestras)	20,32	14,36	5,96	22,3

Estudio de la fórmula de trabajo (medias de 4 tramos)

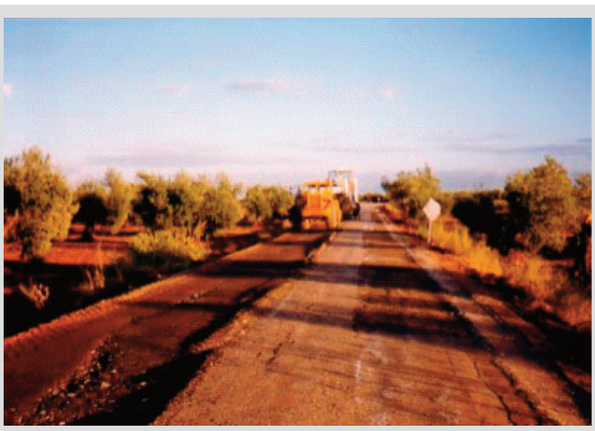
Cemento (%)	Proctor Modificado		Resistencia a compresión a 7 días (MPa)
	Humedad óptima (%)	Densidad máxima (t/m^3)	
2	5,28	2,13	2,27
3	_	_	3,22
4	_	_	3,85

Resistencia a compresión (7/28/90 d): 2,37 / - / - MPa
Resistencia en obra (3 y 7 días): 1,36 / 2,07 MPa
Resistencia de testigos (edad): --
Densidad/Humedad en obra: 2,11 t / m^3 (desviación típica 0,04 en 143 muestras) / -
Densidad de testigos: --
Equipo de dosificación: Distribuidor de lechada Wirtgen WM 400
Equipo de extendido: Extensión de zahorra en capa de 10 cm con extendedora

Equipo de reciclado:	Recicladora Wirtgen 2100 DCR con regla precompactadora
Ancho de reciclado/nº de pasadas:	2,1 m/3
Equipo de refino:	Motoniveladora
Equipo de compactación:	Rodillo liso CC-501 + rodillo de neumáticos CCR-21-35
Rendimiento medio:	2.755 m^2/día
Rendimiento máximo:	4.500 m^2/día
Equipo de prefisuración:	No
Distancia entre juntas:	
Capa de protección:	Riego de curado con emulsión EAR-1 y arena de cubrición
Paso inmediato del tráfico:	Tráfico desviado por rutas alternativas
Período sin capa superior:	7 días
Auscultación del firme:	Deflectógrafo Lacroix + perfilógrafo
Comportamiento:	Bueno
Observaciones:	La zahorra artificial ZA(25) se extendió para obtener un espesor mínimo de 25 cm de capa tratada.

OBRA Nº 10 | TRAMO: CTRA. DE ACEUCHAL A VILLAFRANCA DE LOS BARROS (BADAJOZ)







Administración:	Diputación de Badajoz. Departamento de Obras Públicas
Contratista:	JOCA y Juan Nicolás Gómez e Hijos, UTE (Recicla Soltec)
Fecha de realización:	18/9/98 a 8/10/98
Longitud:	11,5 km
Superficie:	75.000 m^2
Trafico:	T4
Sección existente:	5,5 m
Firme existente:	DTS y capas de MBF sobre macadam muy deteriorado
Problemas observados:	Ausencia de cunetas en muchos puntos. La anchura de 6.5 m se obtuvo añadiendo a la carretera existente unas cuñas de 0,5 m por cada lado, muy difíciles de compactar.
Firme nuevo:	18 cm suelocemento in situ + 3 cm MB alto módulo
Espesor reciclado:	18 cm
Corrector granulométrico:	
% cemento y tipo:	3,0 %, CEM IV/B32,5
Ensayos previos:	Granulometría, dosificación de cemento, rotura de probetas, etc.
Resistencia en obra (3 y 7 días):	--
Resistencia de testigos (edad):	--
Densidad/Humedad en obra:	--
Densidad de testigos:	--
Equipo de dosificación:	Distribuidor de lechada Wirtgen WM 400
Equipo de reciclado:	Recicladora Wirtgen 2500
Ancho de reciclado/nº de pasadas:	6,5 m/3
Equipo de refino:	Motoniveladora CAT 12 G
Equipo de compactación:	2 rodillos monocilíndricos de 13,5 t
Rendimiento medio:	5.300 m^2/día
Rendimiento máximo:	9.300 m^2/día
Equipo de prefisuración:	No
Distancia entre juntas:	
Capa de protección:	Riego de curado con emulsión ECR-0
Paso inmediato del tráfico:	Sí
Período sin capa superior:	7 días
Auscultación del firme:	
Comportamiento:	Correcto (según manual año 1999)
Observaciones:	

OBRA Nº 11 | TRAMO: AV-114, DE SAN PEDRO DEL ARROYO A MUÑICO (ÁVILA) (CASTILLA Y LEÓN)







Administración: Junta de Castilla y León
Contratista: PROBISA
Fecha realización: 4/11/1998 - 20/11/1998
Longitud: 17.700 m
Superficie: 88.500 m²
Tráfico: T4 (IMD: 309, 22% pesados)
Sección existente: 5,00 m pavimentados sin arcenes
Firme existente: 23-30 cm macadam + riego superficial
Firme nuevo: 30 cm reciclado + 5 cm MBF con betún modificado
Problemas observados: Pérdida de capacidad estructural por problemas de drenaje
Espesor reciclado: 30 cm
% cemento y tipo: 3,1 % CEM II/B - CEM V 32,5 R

Granulometría

Tamices UNE	80	50	40	25	20	10	5	2,0	0,40	0,08
Firme existente (20 muestras)	100,0	69,3	52,9	28,2	25,9	19,0	16,9	14,7	6,8	3,2

Estudio de la fórmula de trabajo (medias de 4 tramos)

Cemento (%)	Proctor Modificado		Resistencia a compresión (MPa)	
	Humedad óptima (%)	Densidad máxima (t/m³)	3 días	7 días
2	8,0	2,09	0,92	1,34
3	8,3	2,10	1,35	1,89
4	8,3	2,11	1,87	2,38

Ensayos previos:
Resistencia a compresión (7/28/90 d): 2,0 MPa a 7 días
Resistencia en obra (3/7 días): 1,45 / 1,94 MPa
Resistencia de testigos (edad): --
Densidad/Humedad en obra: 2,10 t/m³ / 8,3%
Equipo de dosificación: 2 distribuidores de lechada (Wirtgen WM 400 y Wirtgen WM1000) Una en cada fase.
Equipo de reciclado: 2 recicladoras (Wirtgen WR 2500 y Wirtgen 2100 DCR). Una en cada fase.
Ancho de reciclado/nº de pasadas: -- / 2
Equipo de refino: Motoniveladora
Equipo de compactación: Rodillo vibrante mixto
Rendimiento medio: 800 m²/h
Rendimiento máximo: --
Capa de protección: Riego de curado ECR-1 y sellado con arena
Paso inmediato del tráfico: Sí
Período sin capa superior: --
Auscultación del firme: --
Comportamiento: --
Observaciones: --

OBRA Nº 12 | TRAMO: P-953, DE BECERRIL DE CAMPOS A FUENTES DE NAVA (CRUCE CON P-940) (PALENCIA) (CASTILLA Y LEÓN)









Administración:	Junta de Castilla y León
Contratista:	UTE ZARZUELA, + ECSA (el reciclado lo hizo ASFALTÉCNICA)
Fecha realización:	agosto de 1999
Longitud:	11,6 km
Superficie:	70.000 m^2
Tráfico:	
Sección existente	6 m
Firme existente:	Tratamiento superficial + Macadam
Firme nuevo:	5 cm MBC S + 30 cm reciclado
Problemas observados:	
Corrector granulométrico	
Espesor reciclado:	30 cm
% cemento y tipo:	3,3% CEM IV/B 32,5
Ensayos previos:	Granulometrías y estudio de la fórmula de trabajo
Resistencia en obra (7/28/90 días):	
Resistencia de testigos (edad):	
Densidad/Humedad Proctor:	
Densidad/Humedad en obra:	
Densidad de testigos:	
Equipo de dosificación:	Lechada cemento con Wirtgen WM400
Equipo de reciclado:	Recicladora Wirtgen WR 2500
Ancho de reciclado/nºpasada	2,40 / 3
Equipo de refino:	Motoniveladora
Equipo de compactación:	Rodillo mixto HAMM 19,5t.
Rendimiento medio:	
Rendimiento máximo:	
Equipo de prefisuración:	No
Distancia entre juntas:	
Capa de protección:	Riego curado ECR-1
Paso inmediato de tráfico:	No
Período sin capa superior:	15 días
Auscultación del firme:	
Comportamiento:	
Observaciones (en 2018):	Esta carretera ha sufrido un saneo posterior (estaba mal) y extendido de un refuerzo de 5 cm MBC (ahora está muy bien).

OBRA Nº 13 | TRAMO: BU-400 (ANTIGUA BU-401) DE CASTROJERIZ A VILLAQUIRAN DE LOS INFANTES (BURGOS)(CASTILLA Y LEÓN)







Administración:	Junta de Castilla y León
Contratista:	TEBICON (el reciclado lo hizo ASFALTÉCNICA)
Fecha realización:	julio del 2000
Longitud:	11,6 km
Superficie:	58.000 m^2
Tráfico:	T41 (IMD=491 12%pesados)
Sección existente	5 m (sin ensanche)
Firme existente:	3-4 cm riegos + 27 cm Macadam + terreno plástico
Firme nuevo:	5 cm MBC S + 25 cm reciclado
Problemas observados:	
Corrector granulométrico	No
Espesor reciclado:	25 cm
% cemento y tipo:	3,3% CEM IV/B 32,5
Ensayos previos:	Índice de Plasticidad=0-8,9, Materia Orgánica=0,12-1,5%, Equivalente de arena=22-50, Granulometrías y estudio de la fórmula de trabajo
Resistencia en obra (7/28/90 días):	_/2,4-2,7/- /-
Resistencia de testigos (edad):	
Densidad/Humedad Proctor:	Dmax=2,14 y 2,11 t/m^3 / Hopt=6,9 y7,6%
Densidad/Humedad en obra:	D=96-101% 88% en zonas
Densidad de testigos:	
Equipo de dosificación:	
Equipo de reciclado:	Recicladora Wirtgen WR 2500
Ancho de reciclado/nºpasada	2,40
Equipo de refino:	Motoniveladora
Equipo de compactación:	1 rodillo mixto (4 pasadas + 1 sin vibrar)
Rendimiento medio:	
Rendimiento máximo:	
Equipo de prefisuración:	No
Distancia entre juntas:	
Capa de protección:	Riego curado ECR-1
Paso inmediato de tráfico:	No
Período sin capa superior:	15 días
Auscultación del firme:	
Comportamiento:	
Observaciones:	

OBRA Nº 14 | TRAMO: P-940, DE MAZARIEGOS A FUENTES DE NAVA (CRUCE CON P-953) (PALENCIA)(CASTILLA Y LEÓN)







Administración:	Junta de Castilla y León
Contratista:	PROBISA
Fecha realización:	Septiembre-octubre de 2000
Longitud:	8,4 km
Superficie:	46.200 m^2
Tráfico:	
Sección existente	5,5 m
Firme existente:	Tratamiento superficial + Macadam
Firme nuevo:	5 cm MBC + 20 cm reciclado
Problemas observados:	
Corrector granulométrico	No
Espesor reciclado:	20 cm
% cemento y tipo:	3% CEM IV/B 32,5
Ensayos previos:	Índice de Plasticidad=5,1, Materia Orgánica=1,6 Granulometrías y estudio de la fórmula de trabajo
Resistencia en obra (7/28/90 días):	_/ 1,96 /_
Resistencia de testigos (edad):	
Densidad/Humedad Proctor:	Dmax=2,12 t/m3 Hopt=7,3%
Densidad/Humedad en obra:	D=1,98 (93,2%) / 8% (108%)
Densidad de testigos:	
Equipo de dosificación:	Lechada cemento con Wirtgen WM400
Equipo de reciclado:	Recicladora Wirtgen WR 2500
Ancho de reciclado/nºpasada	2,40
Equipo de refino:	Motoniveladora
Equipo de compactación:	1 rodillo mixto DYNAPAC 12 t.
Rendimiento medio:	
Rendimiento máximo:	
Equipo de prefisuración:	No
Distancia entre juntas:	
Capa de protección:	Riego curado ECR-1
Paso inmediato de tráfico:	No
Período sin capa superior:	15 días
Auscultación del firme:	
Comportamiento:	En 2005 empiezan a salir fisuras longitudinales. En 2017, se recicla de nuevo un tramo. El resto se refuerza con mezcla bituminosa MBC tras el sellado y el ensanche con reciclado in situ (lagunas en Nava).
Observaciones:	En 2018 se encuentra bien.

OBRA Nº 15 | TRAMO: P-963, DE P-961 A CERVATOS DE LA CUEZ CRUCE CON N-120) (PALENCIA) (CASTILLA Y LEÓN)









Administración:	Junta de Castilla y León
Contratista:	PROBISA
Fecha realización:	Octubre- noviembre de 2000
Longitud:	15,88 km
Superficie:	
Tráfico:	
Sección existente	5,4 m
Firme existente:	Tratamiento superficial + Macadam
Firme nuevo:	5 cm MBC + 20 cm reciclado
Problemas observados:	
Corrector granulométrico	No
Espesor reciclado:	20 cm
% cemento y tipo:	3,02% CEM IV/B 32,5
Ensayos previos:	Granulometrías y estudio de la fórmula de trabajo
Resistencia en obra (7/28/90 días):	_/ 2,53 /_
Resistencia de testigos (edad):	
Densidad/Humedad Proctor:	Dmax=2,2 t/m^3 Hopt=6,3%
Densidad/Humedad en obra:	D=2,15 (98%) / 6,1% (97%)
Densidad de testigos:	
Equipo de dosificación:	Lechada cemento con Wirtgen WM400
Equipo de reciclado:	Recicladora Wirtgen WR 2500
Ancho de reciclado/nºpasada	2,40
Equipo de refino:	Motoniveladora
Equipo de compactación:	1 rodillo mixto DYNAPAC 12 t.
Rendimiento medio:	
Rendimiento máximo:	
Equipo de prefisuración:	No
Distancia entre juntas:	
Capa de protección:	Riego curado ECR-1
Paso inmediato de tráfico:	No
Período sin capa superior:	15 días
Auscultación del firme:	
Comportamiento:	Muy buen comportamiento en 18 años. Está muy bien los altos (zona de Páramo) y algo bacheado las zonas de Vega (donde la explanada es mucho peor).
Observaciones:	

OBRA Nº 16 | TRAMO: P-984, DE N-611 A SAN CEBRIAN DE CAMPOS (PALENCIA) (CASTILLA Y LEÓN)





Administración:	Junta de Castilla y León
Contratista:	PROBISA
Fecha realización:	noviembre de 2000
Longitud:	9,2 km
Superficie:	
Tráfico:	
Sección existente:	5,2 m
Firme existente:	Tratamiento superficial + Macadam
Firme nuevo:	5 cm MBC + 20 cm reciclado
Problemas observados:	
Corrector granulométrico:	No
Espesor reciclado:	20 cm
% cemento y tipo:	3,13% CEM IV/B 32,5
Ensayos previos:	Granulometrías y estudio de la fórmula de trabajo
Resistencia en obra (7/28/90 días):	_/ 2,55 /_
Resistencia de testigos (edad):	
Densidad/Humedad Proctor:	Dmax=2,11 t/m3 Hopt=7,1%
Densidad/Humedad en obra:	D=2,09 (99%) / 6,8% (96%)
Densidad de testigos:	
Equipo de dosificación:	Lechada cemento con Wirtgen WM400
Equipo de reciclado:	Recicladora Wirtgen WR 2500
Ancho de reciclado/nºpasada	2,40
Equipo de refino:	Motoniveladora
Equipo de compactación:	1 rodillo mixto DYNAPAC 12 t.
Rendimiento medio:	
Rendimiento máximo:	
Equipo de prefisuración:	No
Distancia entre juntas:	
Capa de protección:	Riego curado ECR-1
Paso inmediato de tráfico:	No
Período sin capa superior:	15 días
Auscultación del firme:	
Comportamiento:	Buen comportamiento durante 15 años. En 2015 se ensancha y mejora el firme con mezcla bituminosa.
Observaciones:	

OBRA Nº 17 | TRAMO: P-411, DE VALDEMORILLOS (CRUCE CON P-410) A TORQUEMADA (PALENCIA) (CASTILLA Y LEÓN)





Administración:	Junta de Castilla y León
Contratista:	CAMPEZO (Recicla PROBISA)
Fecha realización:	noviembre de 2000
Longitud:	9,2 km
Superficie:	
Tráfico:	
Sección existente	5,1 m
Firme existente:	Tratamiento superficial + Macadam
Firme nuevo:	5 cm MBC + 20 cm reciclado
Problemas observados:	
Corrector granulométrico	No
Espesor reciclado:	20 cm
% cemento y tipo:	5,33% CEM II/A-L 32,5
Ensayos previos:	Granulometrías y estudio de la fórmula de trabajo
Resistencia en obra (7/28/90 días):	__/ 2,84 /_
Resistencia de testigos (edad):	
Densidad/Humedad Proctor:	Dmax=2,03 t/m^3 Hopt=8,2%
Densidad/Humedad en obra:	D=2,08 (102%) / 8,7% (106%)
Densidad de testigos:	
Equipo de dosificación:	Lechada cemento con Wirtgen WM400
Equipo de reciclado:	Recicladora Wirtgen WR 2500
Ancho de reciclado/nºpasada	2,40
Equipo de refino:	Motoniveladora
Equipo de compactación:	1 rodillo mixto DYNAPAC 12 t.
Rendimiento medio:	
Rendimiento máximo:	
Equipo de prefisuración:	No
Distancia entre juntas:	
Capa de protección:	Riego curado ECR-1
Paso inmediato de tráfico:	No
Período sin capa superior:	15 días
Auscultación del firme:	
Comportamiento:	Mal comportamiento por existencia de yesos en el suelo inferior. Se producen baches y blandones. La experiencia aconseja no reciclar aquellas zonas de la explanada con índices de plasticidad muy altos sin un tratamiento previo.
Observaciones:	

OBRA Nº 18 | TRAMO: P-921 DE TORREMORMOJÓN A AMPUDIA Y P-943 DE AMPUDIA A VALORIA DE ALCOR (PALENCIA) (CASTILLA Y LEÓN)







Administración:	Junta de Castilla y León
Contratista:	CAMPEZO (Recicla PROBISA)
Fecha realización:	agosto de 2001
Longitud:	7,932 km
Superficie:	
Tráfico:	T41 (IMD=134 25%pesados)
Sección existente	4,7 - 5,20 m. Se ensancha todo a 5,20 m
Firme existente:	Tratamiento superficial + Macadam
Firme nuevo:	5 cm MBC + 22 cm reciclado
Problemas observados:	
Corrector granulométrico	No
Espesor reciclado:	22 cm
% cemento y tipo:	4% CEM IV/B 32,5
Ensayos previos:	Granulometrías y estudio de la fórmula de trabajo_
Resistencia en obra (7/28/90 días):	
Resistencia de testigos (edad):	
Densidad/Humedad Proctor:	Dmax=2,1 t/m^3 Hopt=8,1%
Densidad/Humedad en obra:	
Densidad de testigos:	
Equipo de dosificación:	Lechada cemento con Wirtgen WM1000
Equipo de reciclado:	Recicladora Wirtgen WR 2500
Ancho de reciclado/nºpasada	2,40
Equipo de refino:	Motoniveladora
Equipo de compactación:	1 rodillo mixto DYNAPAC 15 t.
Rendimiento medio:	
Rendimiento máximo:	
Equipo de prefisuración:	No
Distancia entre juntas:	
Capa de protección:	Riego curado ECR-1
Paso inmediato de tráfico:	No
Período sin capa superior:	15 días
Auscultación del firme:	
Comportamiento:	
Observaciones:	Tiene muy poco tráfico, pero está bien. Solo está mal donde mana agua en la carretera. Cumplió su cometido tras 17 años en un estado más que aceptable.

OBRA Nº 19 | TRAMO: CL-517, VITIGUDINO-LA FREGENEDA PK 66+700 A 110+150 (SALAMANCA) (CASTILLA Y LEÓN)









Administración:	Junta de Castilla y León
Contratista:	HERGONSA (Recicla SOLTEC)
Fecha realización:	Septiembre-noviembre de 2001
Longitud:	43,450 km PK 66+700 a 110+150 (reciclados 19,2 km reales)
Superficie:	
Tráfico:	T31, T32 y T41 (IMD=134 25%pesados)
Sección existente	7/9 en 1.920 m y 6/8 m en el resto del tramo.
Firme existente:	Calzada: 11-19 cm MBC + 11-20 cm Macadam y en Arcenes: 10-12 cm MBC + 20-25 cm ZA contaminada.
Firme nuevo:	T31: 12 cm MBC + 30 cm reciclado T32: 10 cm MBC + 30 cm reciclado T41: 8 cm MBC + 30 cm reciclado
Problemas observados:	
Corrector granulométrico	No
Espesor reciclado:	30 cm
% cemento y tipo:	5% CEM IV/B 32,5
Ensayos previos:	Macadam No plástico y ZA Índice de Plasticidad=5,9, Materia Orgánica=0 Granulometrías y estudio de la fórmula de trabajo
Resistencia en obra (7/28/90 días):	---
Resistencia de testigos (edad):	_ / 1,75-2,26 ZA y 2,82-4,88 Mac /_
Densidad/Humedad Proctor:	Dmax=2,06 t/m^3 Hopt=7,9%
Densidad/Humedad en obra:	D obra= 97 -103%
Densidad de testigos:	
Equipo de dosificación:	Lechada cemento con Wirtgen WM 1000
Equipo de reciclado:	Recicladora Wirtgen WR 2500
Ancho de reciclado/nºpasada	2,40
Equipo de refino:	Motoniveladora
Equipo de compactación:	1 rodillo HAM 17 t. (4 pasadas)
Rendimiento medio:	
Rendimiento máximo:	
Equipo de prefisuración:	No
Distancia entre juntas:	
Capa de protección:	Riego curado ECR-1 + gravilla 3-6
Paso inmediato de tráfico:	Si
Período sin capa superior:	7-20 días
Auscultación del firme:	
Comportamiento:	
Observaciones:	

OBRA Nº 20 | TRAMO: ACCESO AL ARENAL (ÁVILA) (CASTILLA Y LEÓN)









Administración:	Junta de Castilla y León
Contratista:	PCA
Fecha realización:	Octubre de 2002
Longitud:	11,44 km
Superficie:	
Tráfico:	T42
Sección existente	5 m con tramos en tierra y otros en Tratamientos superficiales
Firme existente:	DTS + 12 cm arena+ 15-20 piedra
Firme nuevo:	5 cm MBC + 25 cm reciclado (15 cm ZA aportada en zonas)
Problemas observados:	
Corrector granulométrico	15 cm ZA en algunos tramos
Espesor reciclado:	25 cm
% cemento y tipo:	5% CEM IV/B 32,5 N
Ensayos previos:	Material no plástico. Equivalente de arena=25-60. Pase por 10/0,4/0,08 es 100/42-48/19-25.

Granulometría

Tamices UNE	10	0,4	0,08
Material a reciclar	100	42-48	19-25

Resistencia en obra (7/28/90 días):	Además se estudió la fórmula de trabajo
Resistencia de testigos (edad):	
Densidad/Humedad Proctor:	
Densidad/Humedad en obra:	Dmax=1,93 t/m^3 Hopt=10,2%
Densidad de testigos:	
Equipo de dosificación:	Lechada cemento con Wirtgen WM 1000
Equipo de reciclado:	Recicladora Wirtgen WR 2500
Ancho de reciclado/nºpasada	5 / 3 en determinadas zonas 2 pasadas
Equipo de refino:	Motoniveladora
Equipo de compactación:	1 rodillo
Rendimiento medio:	
Rendimiento máximo:	
Equipo de prefisuración:	No
Distancia entre juntas:	
Capa de protección:	Riego curado ECR-1 + gravilla 3-6
Paso inmediato de tráfico:	No
Período sin capa superior:	7-20 días
Auscultación del firme:	
Comportamiento:	
Observaciones:	

OBRA Nº 21 | TRAMO: CRTA. A-222 DE VENTAS DE MUNIESA A CORTES DE ARAGÓN (ZARAGOZA) (ARAGÓN)









Administración:	Diputación General de Aragón
Contratista:	Vidal O y S, (recicla SOLTEC)
Fecha realización:	Oct 2002
Longitud:	
Superficie:	54.000 m^2
Tráfico:	T41
Sección existente:	7/9 m ancho
Firme existente:	DTS + 25 cm Zahorra artificial
Firme nuevo:	5 cm MBC + 22 cm reciclado firme existente
Problemas observados:	Envejecimiento general
Corrector granulométrico:	No
Espesor reciclado:	22 cm
% cemento y tipo:	3%
Ensayos previos:	Granulometrías, plasticidad y estudio de la fórmula de trabajo

Resistencia en obra (7/28/90 días):	--- / -- / -- MPa
Resistencia de testigos (edad):	
Densidad/Humedad en obra:	--
Densidad de testigos:	-- t/m^3
Equipo de dosificación:	Lechada de cemento Wirtgen WM1000
Equipo de reciclado:	Recicladora Wirtgen WR 2500
Ancho de reciclado/nº de pasadas:	--
Equipo de refino:	Motoniveladora
Equipo de compactación:	1 rodillo vibrante mixto Dynapac
Rendimiento medio:	
Rendimiento máximo:	
Equipo de prefisuración:	No
Distancia entre juntas:	
Capa de protección:	Riego de curado con emulsión
Paso inmediato del tráfico:	Sí
Período sin capa superior:	
Auscultación del firme:	
Comportamiento:	
Observaciones:	Se rectificó la rasante de la plataforma antes de reciclar

OBRA Nº 22 | TRAMO: CL-622, DE SANTA MARÍA DEL PÁRAMO A LA BAÑEZA (LEÓN) (CASTILLA Y LEÓN)









Administración:	Junta de Castilla y León
Contratista:	Construcciones SIERRA
Fecha realización:	Septiembre – octubre de 2003
Longitud:	11,510 km
Superficie:	107.000 m^2
Tráfico:	T22 (IMD=3.911 15% pesados)
Sección existente	6/8,30 m (reciclados 9,30). Se ensancha con suelo seleccionado
Firme existente:	10-12cm MB + 14-30cm Macadam (25cm ZA+25cm ZN en bordes) + suelo plástico
Firme nuevo:	12 cm MBC + 35 cm reciclado
Problemas observados:	
Corrector granulométrico	
Espesor reciclado:	35 cm
% cemento y tipo:	4% CEM II/B-M 32,5 R
Ensayos previos:	Índice de plasticidad =3-10 / 2-3 (en calzada/ensanche), Materia Orgánica=0 Granulometrías y estudio de la fórmula de trabajo
Resistencia en obra (7/28/90 días):	_ / 20,8-47,7 calzada 17-39 ensanches /_
Resistencia de testigos (edad):	
Densidad/Humedad Proctor:	Dmax=2,17 t/m^3 Hopt=6,6%
Densidad/Humedad en obra:	Dobra=97-102% salvo zonas
Densidad de testigos:	
Equipo de dosificación:	2 repartidores de lechada de cemento Wirtgen WM 1000
Equipo de reciclado:	2 Recicladoras Wirtgen WR 2500
Ancho de reciclado/nºpasada	
Equipo de refino:	Motoniveladora
Equipo de compactación:	1 rodillo HAM 24 t.
Rendimiento medio:	
Rendimiento máximo:	
Equipo de prefisuración:	No
Distancia entre juntas:	
Capa de protección:	Riego curado ECR-1 + gravilla 3-6
Paso inmediato de tráfico:	No
Período sin capa superior:	10-20 días
Auscultación del firme:	Muy buen IRI
Comportamiento:	En 2018 tras 15 años se observan fisuras en la capa de rodadura de MBC. Un refuerzo de capa delgada salvaría el firme durante mucho tiempo.
Observaciones:	

OBRA Nº 23 | TRAMO: N-632A DE LAS DUEÑAS A CANERO (ASTURIAS)









Administración: Ministerio de Fomento
Contratista: Auxiliar de Obras VD, S.L.
Fecha realización: febrero de 2004
Longitud: más de 10 km
Superficie:
Tráfico: T3 (IMD: 1195, 120 =10% pesados)
Sección existente: 6 m ancho
Firme existente: 10-15 cm MB + 15-30 cm Macadam + Arcilla amarillenta
Firme nuevo: 10 cm MBC S-12 + 25 cm reciclados
Problemas observados: Gran pérdida de capacidad estructural por problemas de drenaje
Corrector granulométrico: No
Espesor reciclado: 25 cm
% cemento y tipo: % II/C-35 A (28 kg/m^2)
Ensayos previos:

Se hicieron 9 Granulometrías

Tamices UNE	40	25	20	8	5	2	0,50	0,25	0,063
PK 137+800 MD (1 de 8)	100	96	77	52	37	23	17	13	5

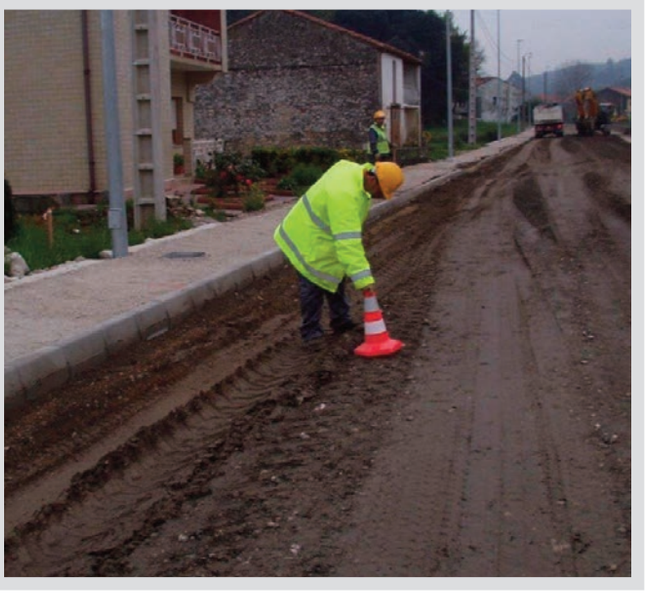
Plasticidad y estudio de la fórmula de trabajo

Resistencia en obra (7/28/90 días): --- / -- / -- MPa
Resistencia de testigos (edad):
Densidad/Humedad en obra: --
Densidad de testigos: -- t/m^3
Equipo de dosificación: Repartidor de lechada de cemento Wirtgen WM 1000
Equipo de reciclado: Recicladora Wirtgen WR 2500
Ancho de reciclado/nº de pasadas: --
Equipo de refino: Motoniveladora
Equipo de compactación: 1 rodillo vibrante mixto
Rendimiento medio: 900 m^2/h
Rendimiento máximo: 1.500 m^2/h
Equipo de prefisuración: Olivia
Distancia entre juntas: 3-5 m
Capa de protección: Riego de curado con emulsión ECL-1 (0,4 kg/m2) y sellado con gravilla.
Paso inmediato del tráfico: Sí
Período sin capa superior: 1 día
Auscultación del firme: Deflectómetro de impacto DYNATEST HWD 8081
Comportamiento: Bueno
Observaciones:

OBRA Nº 24 | TRAMO: DE REVILLA A PUENTE DE ARCE (CANTABRIA)









Administración:	Gobierno de Cantabria
Contratista:	Ascan, (recicla SOLTEC)
Fecha realización:	Marzo 2004
Longitud:	7 km
Superficie:	58.000 m^2
Tráfico:	T31
Sección existente:	7/9 m ancho
Firme existente	8-14 cm MBC deteriorado +20 -30 cm Zahorra artificial/Macadam o material granular
Firme nuevo:	4+ 5 cm MBC + 30 cm reciclado firme existente
Problemas observados:	Envejecimiento general. Deflexiones muy elevadas.
Corrector granulométrico:	No
Espesor reciclado:	30 cm
% cemento y tipo:	6% de CEM II/B-V 32,5 R
Ensayos previos:	Granulometrías, plasticidad y estudio de la fórmula de trabajo
Resistencia en obra (7/28/90 días):	4,0 / -- / 7,0 MPa
Resistencia de testigos (edad):	
Densidad/Humedad en obra:	2,1 t/m^3 / 6%
Densidad de testigos:	-- t/m^3
Equipo de dosificación:	Lechada de cemento Wirtgen WM1000
Equipo de reciclado:	Recicladora Wirtgen WR 2500
Ancho de reciclado/nº de pasadas:	--
Equipo de refino:	Motoniveladora
Equipo de compactación:	1 rodillo vibrante mixto
Rendimiento medio:	
Rendimiento máximo:	
Equipo de prefisuración:	Equipo CRAFT que inyecta emulsión
Distancia entre juntas:	3 m
Capa de protección:	Riego de curado con emulsión
Paso inmediato del tráfico:	Sí
Período sin capa superior:	
Auscultación del firme:	
Comportamiento:	Muy bueno en 2018
Observaciones:	Mezcla bituminosa fabricada con betún-caucho

OBRA Nº 25 | TRAMO: LE-510 Y ZA-510, DE VALENCIA DE DON JUAN A FUENTES DE ROPEL (LEÓN Y ZAMORA)







Administración: Junta de Castilla y León
Contratista:
Fecha realización: junio de 2004
Longitud: 31,8 (LE-510) + 7 km (ZA-510)
Superficie:
Tráfico: T41 (Valencia de Don Juan – Villafer) y T42 (Villafer – Fuentes de Ropel)
Sección existente
Firme existente: 6 m (Valencia de Don Juan – Villafer) – variable (5 m el resto)
Firme nuevo: 3 cm riegos + 4 cm gravillas + 16 cm macadam
8 cm MBC + 30 cm reciclado (Valencia de Don Juan-Villafer) y
Problemas observados: 5 cm MBC + 22 cm reciclado (resto LE-510 y ZA-510).
Corrector granulométrico
Espesor reciclado: En el proyecto había caliza 0-5 como corrector, pero no se añadió.
30 cm (Valencia de Don Juan-Villafer), 22 cm (Villafer- Fuentes de
% cemento y tipo: Ropel),
Ensayos previos: 4,5% CEM IV/B (V) -32,5N
No plástico y suelo con Índice de plasticidad=8,6
Granulometrías y el estudio de la fórmula de trabajo con cemento ESP VI-1 32,5 N

% cemento	Resistencia 7 días	R media
3	1,2 / 1,2 / 1,2	1,2
4	2,2 / 2,4 / 2,3	2,3
5	2,3 / 2,3 / 2,5	2,4

Resistencia en obra (7/28/90 días):
Resistencia de testigos (edad):
Densidad/Humedad Proctor: Dmax=2,16 t/m3 Hopt=6,6%
Densidad/Humedad en obra:
Densidad de testigos:
Equipo de dosificación: Lechada cemento con Wirtgen WM1000
Equipo de reciclado: Recicladora Wirtgen WR 2500
Ancho de reciclado/nºpasada 6-5 m / 3
Equipo de refino: Motoniveladora
Equipo de compactación: 1 rodillo mixto
Rendimiento medio:
Rendimiento máximo:
Equipo de prefisuración: No
Distancia entre juntas:
Capa de protección: Riego curado EAR-1 + 4 l/m2 de arena 3-6 de protección al tráfico
Paso inmediato de tráfico: Si
Período sin capa superior:
Auscultación del firme: Deflexiones
Comportamiento:
Observaciones:

OBRA Nº 26 | TRAMO: VÍA DE SERVICIO PERIMETRAL DEL AEROPUERTO DE PAMPLONA (NAVARRA)







Administración:	Aena
Contratista:	Comsa, (recicla SOLTEC)
Fecha realización:	Mayo 2005
Longitud:	
Superficie:	11.000 m^2
Tráfico:	T42
Sección existente:	6 m ancho
Firme existente:	MBC deteriorado + 25 cm Zahorra artificial
Firme nuevo:	5 cm MBC + 25 cm reciclado firme existente
Problemas observados:	Envejecimiento general
Corrector granulométrico:	No
Espesor reciclado:	25 cm
% cemento y tipo:	3%
Ensayos previos:	Granulometrías, plasticidad y estudio de la fórmula de trabajo
Resistencia en obra (7/28/90 días):	--- / -- / -- MPa
Resistencia de testigos (edad):	
Densidad/Humedad en obra:	--
Densidad de testigos:	-- t/m^3
Equipo de dosificación:	Lechada de cemento Wirtgen WM1000
Equipo de reciclado:	Recicladora Wirtgen WR 2500
Ancho de reciclado/nº de pasadas:	--
Equipo de refino:	Motoniveladora
Equipo de compactación:	1 rodillo vibrante mixto
Rendimiento medio:	
Rendimiento máximo:	
Equipo de prefisuración:	No
Distancia entre juntas:	
Capa de protección:	Riego de curado con emulsión
Paso inmediato del tráfico:	Sí
Período sin capa superior:	
Auscultación del firme:	
Comportamiento:	
Observaciones:	Mezcla bituminosa con Asfalto-Goma

OBRA Nº 27 | TRAMO: AV-941, DE VENTA DE RASQUILLA (CRUCE CON N-502) A HOYOS DEL ESPINO (ÁVILA)



Administración:	Junta de Castilla y León
Contratista:	PROBISA
Fecha realización:	septiembre de 2005
Longitud:	4,15 km (de 17,7 km reforzados)
Superficie:	29.465 m^2
Tráfico:	T41 (IMD=1333 con 9% de pesados en 2006)
Sección existente	7 m pavimentados sin arcenes. El ensanche ya está hecho
Firme existente:	9-18 cm MBC + 15 cm Macadam (35 cm ZA en laterales ensanchados)
Firme nuevo:	8 cm MBC + 35 cm reciclado
Problemas observados:	La zahorra artificial estaba defectuosa
Corrector granulométrico	
Espesor reciclado:	35 cm
% cemento y tipo:	3,5 a 4% CEM IV/B 32,5 N
Ensayos previos:	Granulometrías y estudio de la fórmula de trabajo
Resistencia en obra (7/28/90 días):	
Resistencia de testigos (edad):	
Densidad/Humedad Proctor:	Dmax=2,0 t/m^3 Hopt=4,4%
Densidad/Humedad en obra:	
Densidad de testigos:	
Equipo de dosificación:	Lechada cemento con Wirtgen WM1000
Equipo de reciclado:	Recicladora Wirtgen WR 2500
Ancho de reciclado/nºpasadas	
Equipo de refino:	Motoniveladora
Equipo de compactación:	1 rodillo mixto (5 pasadas)
Rendimiento medio:	800 m^2/hora
Rendimiento máximo:	
Equipo de prefisuración:	No
Distancia entre juntas:	Riego curado EAR-1 + 4 l/m^2 de arena 3-6 de protección al tráfico
Capa de protección:	Si
Paso inmediato de tráfico:	
Período sin capa superior:	
Auscultación del firme:	
Comportamiento:	Muy buen comportamiento en estos años, aunque tiene muy poco tráfico
Observaciones:	

OBRA Nº 28 | TRAMO: DE ARZUA A PORTODEMOUROS (ORENSE) (GALICIA)









Administración: Xunta de Galicia
Contratista: Bruesa Construcción, S.A., (recicla SOLTEC)
Fecha realización: junio 2008
Longitud:
Superficie: 102.000 m^2
Tráfico: T41
Sección existente: 6 m ancho
Firme existente: 5 cm MBC + 25 cm Zahorra artificial
Firme nuevo: 5 cm MBC + 30 cm reciclado firme existente
Problemas observados: Fallo de la zahorra artificial de la cantera colocada
Corrector granulométrico: No
Espesor reciclado: 30 cm
% cemento y tipo: 4%
Ensayos previos: Zahorra: Plasticidad LL=21,2 LP021,1 IP=0,1 y no plástico algunas muestras. Equivalente Arena = 20-38 Desgaste Los Ángeles = 27-38.

Ganulometría

Tamices UNE	40	25	20	8	4	2	0,50	0,25	0,063
Zahorra Artificial	100	94,9	86,7	43,9	25,2	17,5	9,2	7,5	5,5
(varias tomas)	100	90-98	78-91	53-59	42-46	32-40	21-27	17-23	12-14

Proctor modificado Dmax=2,21 Hot=5,5%
Plasticidad y estudio de la fórmula de trabajo

Resistencia en obra (7/28/90 días): --- / -- / -- MPa
Resistencia de testigos (edad):
Densidad/Humedad en obra: --
Densidad de testigos: -- t/m^3
Equipo de dosificación: Lechada de cemento Wirtgen WM1000
Equipo de reciclado: Recicladora Wirtgen WR 2500
Ancho de reciclado/nº de pasadas: --
Equipo de refino: Motoniveladora
Equipo de compactación: 1 rodillo vibrante mixto Dynapac
Rendimiento medio:
Rendimiento máximo:
Equipo de prefisuración: No
Distancia entre juntas:
Capa de protección: Riego de curado con emulsión
Paso inmediato del tráfico: Sí
Período sin capa superior:
Auscultación del firme:
Comportamiento:
Observaciones: Se trataba de recuperar un firme de zahorra artificial de la cantera de Portodemouros (algo plástica) y una capa de mezcla bituminosa recién extendida.

OBRA Nº 29 | TRAMO: ACCESO A LAGUNA DE NEGRILLOS (LEÓN) (CASTILLA Y LEÓN)









Administración:	Junta de Castilla y León
Contratista:	CYMOTSA (recicla SOLTEC)
Fecha realización:	Junio 2008
Longitud:	
Superficie:	27.500 m^2
Tráfico:	T42
Sección existente:	5 m ancho
Firme existente:	5 cm MBC sobre zahorra artificial 30 cm reciclado con 4 % de cemento + 5 cm MBC
Problemas observados:	La zahorra artificial colocada era muy plástica y estaba muy húmeda.
Corrector granulométrico:	No
Espesor reciclado:	30 cm
% cemento y tipo:	4 %
Ensayos previos:	Granulometrías, plasticidad y estudio de la fórmula de trabajo
Resistencia en obra (7/28/90 días):	--- / -- / -- MPa
Resistencia de testigos (edad):	
Densidad/Humedad en obra:	--
Densidad de testigos:	-- t/m^3
Equipo de dosificación:	Distribuidor de cemento por vía seca
Equipo de reciclado:	Recicladora Wirtgen 2500 tras una recicladora BOMAG para airear el material y secarlo.
Ancho de reciclado/nº de pasadas:	6 m, 3 pasadas
Equipo de refino:	Motoniveladora
Equipo de compactación:	1 rodillo vibrante mixto Walkia VM186D
Rendimiento medio:	5.000 m^2/día
Rendimiento máximo:	
Equipo de prefisuración:	No
Distancia entre juntas:	
Capa de protección:	Riego de curado con emulsión
Paso inmediato del tráfico:	No
Período sin capa superior:	
Auscultación del firme:	
Comportamiento:	
Observaciones:	Se trataba de recuperar un firme de zahorra artificial muy empapada y algo plástica, deteriorada antes de abrir al tráfico por los vehículos que realizaban la concentración parcelaria.

OBRA Nº 30 | TRAMO: ACCESO AL TEIDE (TENERIFE) (CANARIAS)









Administración:	Cabildo Insular de Tenerife
Contratista:	Ute Tenasfaltos + Señalizaciones Villar, (recicla SOLTEC)
Fecha realización:	Agosto 2008
Longitud:	
Superficie:	42.000 m^2
Tráfico:	Ligero + autobuses de turismo de subida al Teide que hubo que mantener durante la obra.
Sección existente:	6 m
Firme existente:	Zahorra – macadam + TTS
Firme nuevo:	30 cm Suelocemento in situ + MBC
Problemas observados:	
Corrector granulométrico:	
Espesor reciclado:	30 cm
% cemento y tipo:	3%
Ensayos previos:	Plasticidad, Granulometrías, Proctor modificado y estudio de la fórmula de trabajo
Resistencia en obra (7/28/90 días):	--- / -- / -- MPa
Resistencia de testigos (edad):	
Densidad/Humedad en obra:	
Densidad de testigos:	- t/m^3
Equipo de dosificación:	Lechada de cemento Wirtgen WM1000
Equipo de reciclado:	Recicladora Wirtgen WR 2500
Ancho de reciclado/nº de pasadas:	6 m. 3 pasadas
Equipo de refino:	Motoniveladora
Equipo de compactación:	Rodillo de tierras 15 T
Rendimiento medio:	5.000 m^2/día
Rendimiento máximo:	
Equipo de prefisuración:	No
Distancia entre juntas:	
Capa de protección:	Riego de curado con emulsión
Paso inmediato del tráfico:	Sí, después de la capa de MBC
Período sin capa superior:	Inmediato
Auscultación del firme:	
Comportamiento:	
Observaciones:	Se reciclaron 2/3 de la anchura y se asfaltó para poder dejar paso a las guaguas en la subida al Teide. La bajada la hacían por otro lado. Después se recicló el otro tercio.

OBRA Nº 31 | TRAMO: RAMALES DE LA CARRETERA DE LOS PANTANOS: P210, P212, P213, P216 Y P217 (PALENCIA) (CASTILLA Y LEÓN)







Administración:	Junta de Castilla y León
Contratista:	PAS (Recicla ECOASFALT)
Fecha realización:	Julio- agosto de 2008
Longitud:	16,48 km
Superficie:	74.197 m^2
Tráfico:	T41 y T42 (varios tráficos)
Sección existente	4,5 m + una variante reciclando
Firme existente:	DTS + 13 cm Macadam calizo
Firme nuevo:	5 cm MBC + 20 cm reciclado
Problemas observados:	
Corrector granulométrico	Se añade zahorra artificial en un 25%.
Espesor reciclado:	20 cm
% cemento y tipo:	4% de Cemento VI 32,5N
Ensayos previos:	Zahorra Artificial No Plástica, Equivalente de arena =26. Los Ángeles =37, Cras d fractura =40%, Índice de lajas =10, Granulometrías y estudio de la fórmula de trabajo

Resistencia en obra (3/7/28 días):			
	P-212 pk 1+500 MI_ 3,78/ 4,37 / 5,04 _	D=2,11 t/m^3	H=5,9%
	P-212 pk 2+900 MI 1,61/ 1,55 / 2,17	D=2,07 t/m^3	H=6,7%
	P-213 pk 0+500 MI_ 2,05/ 2,1 / 2,28 _	D=2,10 t/m^3	H=4,4%
	P-213 pk 2+200 MD_ 1,99/ 2,13 / 2,75	D=2,21 t/m^3	H=4,4%
	P-213 pk 3+475 MI 3,59/ 3,82 / 4,73	D=2,26 t/m^3	H=5,3%
	P-216 pk 1+050 MI 2,73/ 3,33 / 4,88	D=2,14 t/m^3	H=6,4%
	P-216 pk 2+300 MD 3,74/ 5,16 / 6,03	D=2,24 t/m^3	H=5,1%
	P-217 pk 0+700 MI 1,27/ 1,46 / 1,82	D=2,09 t/m^3	H=4,8%
	P-217 pk 2+600 MI 1,79/ 3,06 / 4,02	D=2,09 t/m^3	H=5,3%
	P-217 pk 4+300 MI_ 4,66/ 4,30 / 7,36	D=2,16 t/m^3	H=5,5%

Resistencia de testigos (edad):	
Densidad/Humedad Proctor:	Dmax=2,23 t/m^3 Hopt=6,4%
Densidad/Humedad en obra:	98-105% Dmax
Densidad de testigos:	
Equipo de dosificación:	Lechada cemento con Wirtgen WM1000
Equipo de reciclado:	Recicladoras Wirtgen WR 2500
Ancho de reciclado/nºpasada	
Equipo de refino:	Motoniveladora
Equipo de compactación:	1 rodillo mixto
Rendimiento medio:	
Rendimiento máximo:	
Equipo de prefisuración:	No
Distancia entre juntas:	
Capa de protección:	Riego curado ECR-1 + árido protección
Paso inmediato de tráfico:	
Período sin capa superior:	
Auscultación del firme:	
Comportamiento:	Muy buen comportamiento en estos años, aunque tiene muy poco tráfico.
Observaciones:	

OBRA Nº 32 | TRAMO: BI-2543, DE DIMA A OTXANDIO (VIZCAYA) (PAÍS VASCO)







Administración:	(Diputación Foral de Vizcaya
Contratista:	Asfaltia (Subcontrata a Asfaltécnica SA)
Fecha realización:	Septiembre 2008
Longitud:	10 km
Superficie:	70.000 m^2
Tráfico:	T31
Sección existente:	7 m
Firme existente:	
Firme nuevo:	11 cm MBC + 32 cm reciclado con cemento
Problemas observados:	
Corrector granulométrico:	No
Espesor reciclado:	32 cm
% cemento y tipo:	6% CEM II/A-M(V) 42,5 R
Ensayos previos:	10 Catas/Granulometrías/Límites de Atterberg/Materia orgánica
Resistencia en obra (7/28/90 días):	6,5 N/mm^2
Resistencia de testigos (edad):	--
Densidad/Humedad en obra:	2,1 t/m^3 y 6%
Densidad de testigos:	-- t/m^3
Equipo de dosificación:	Dosificador de lechada Wirtgen VM-1000
Equipo de reciclado:	Recicladora Wirtgen WR 2500
Ancho de reciclado/nº de pasadas:	--
Equipo de refino:	Motoniveladora
Equipo de compactación:	Compactador HAMM 20t
Rendimiento medio:	
Rendimiento máximo:	
Equipo de prefisuración:	Miniretro con cuchilla
Distancia entre juntas:	3 m
Capa de protección:	Sí. Tratamiento superficial con engravillado
Paso inmediato del tráfico:	Sí
Período sin capa superior:	Más de 1 mes
Auscultación del firme:	No
Comportamiento:	Muy bueno (en el año 2018)
Observaciones:	

OBRA Nº 33 | TRAMO: CARRETERA A TXANKA/ORIO (GUIPUZCOA) (PAÍS VASCO)





Administración:	BIDEGI (Diputación Foral de Guipúzcoa)
Contratista:	Asfaltos ORSA
Fecha realización:	Marzo 2011
Longitud:	1 km
Superficie:	7.000 m^2
Tráfico:	T2 (IMD < 400 pesados/carril/día)
Sección existente:	7 m
Firme existente:	6-13 cm MBC + 20-28 cm ZA + Explanada
Firme nuevo:	8 cm MBC + 34 cm reciclado con cemento
Problemas observados:	Agotamiento estructural de las MBC
Corrector granulométrico:	No
Espesor reciclado:	34 cm
% cemento y tipo:	5% CEM II/A-L 42,5 R
Ensayos previos:	10 Catas/Granulometrías/Límites de Atterberg/Materia orgánica
Resistencia en obra (7/28/90 días):	7,0 N/mm^2
Resistencia de testigos (edad):	> 5,0 N/mm^2 (7/10/11/16 días)
Densidad/Humedad en obra:	2,2 t/m^3 / 6%
Densidad de testigos:	-- t/m^3
Equipo de dosificación:	Vía seca con Streumaster RW12000
Equipo de reciclado:	Recicladora Wirtgen 2400
Ancho de reciclado/nº de pasadas:	--
Equipo de refino:	Motoniveladora
Equipo de compactación:	1 rodillo mixto 16t
Rendimiento medio:	
Rendimiento máximo:	
Equipo de prefisuración:	Equipo CRAFT con riego de emulsión
Distancia entre juntas:	3 m
Capa de protección:	Riego de curado
Paso inmediato del tráfico:	Sí
Período sin capa superior:	1 semana
Auscultación del firme:	No
Comportamiento:	Muy bueno (en el año 2018)
Observaciones:	Doble mezclado del cemento con un 60% en el 1º mezclado y un 40% en el 2º mezclado. Se extraen 22 testigos de los cuales 21 tienen espesores entre 31 y 40 cm.

OBRA Nº 34 | TRAMO: AUTOVÍA A231, DE LEÓN A BURGOS, REHABILITACIÓN EN LA PROVINCIA DE PALENCIA (CASTILLA Y LEÓN)









Administración: Junta de Castilla y León
Contratista: SACYR
Fecha realización: Julio de 2012
Longitud: 54,5 km
Superficie: 190.750 m^2
Tráfico: T0 - T1 (IMD=6512 con 32,4% pesados en 2007)
Sección existente 10 m plataforma se recicla carril derecho (3,5 m)
Firme existente: 18 cm MBC + 25 cm SC + E3
Firme nuevo: 4 cm BBTM 11B BM3c + 12 cm MB reciclados en planta + 31-32 cm reciclados con cemento (25 cm suelocemento + 1 capa bituminosa en tramos) aunque se cambió por tramos.
Problemas observados: Roturas y fisuración con salida de finos
Corrector granulométrico No
Espesor reciclado: 31-32 cm
% cemento y tipo: 4% de CEM II/B (M) 32,5 R
Ensayos previos: Granulometrías y estudio de la fórmula de trabajo (se exige una Rc=3 MPa).

% cemento	Densidad (g/cm^3)	Humedad (%)	Resistencia 3 días	Resistencia 5 días
3,5	2,08	8,8	3,13	3,77
4,0	2,06	8,7	4,2	4,95
4,5	2,07	8,8	4,47	5,44

Resistencia en obra (3/7/28/90 días): 2,6 / 3,2 / 4,1
Resistencia de testigos (edad): No hay testigos
Densidad/Humedad Proctor: con 4% cemento: Dmax. = 2,08 g/cm^3 Hopt = 8,6 %
Densidad/Humedad en obra: muy variable entre densidades de 2,0 a 2,1 g/cm^3 según la humedad
Densidad de testigos:
Equipo de dosificación: Lechada cemento con Wirtgen WM1000
Equipo de reciclado: Recicladora Wirtgen WR 2500
Ancho de reciclado/nºpasada: 3,5 m / 2
Equipo de refino: Motoniveladora
Equipo de compactación: 1 rodillo vibratorio Dynapac + 1 neumáticos Corinsa
Rendimiento medio:
Rendimiento máximo:
Equipo de prefisuración: Si, con celosía bastidor rodante que corta e inyecta emulsión
Distancia entre juntas: 3 m
Capa de protección: Riego curado ECR-1
Paso inmediato de tráfico: No
Período sin capa superior: 5 días
Auscultación del firme: Deflexiones, IRI y CRT (ver a continuación).
Comportamiento: Muy bien tras 6,5 años con intenso tráfico. La regularidad y aspectos concernientes al firme son magníficos.

Observaciones:

Autovía A-231 Auscultación Sentido ascendente (año 2009)					
PK INICIAL	PK FINAL	LONGITUD (m)	DEFLEXIÓN (mm/100)	IRI (mm/m)	CRT (%)
54,980	59,085	4.105	32,10	1,0	67
59,085	68,795	9.710	23,00	1,7	68
68,795	73,825	5.030	42,50	1,6	73
73,825	77,750	3.925	47,20	1,9	67
77,750	85,635	7.885	31,10	1,7	71
85,635	90,465	4.830	74,00	2,3	59
90,465	94,665	4.200	81,20	2,7	61
94,665	97,065	2.400	50,70	1,9	65
97,065	100,000	2.935	38,80	2,1	70
100,000	102,110	2.110	27,80	1,2	70
102,110	104,860	2.750	20,10	1,2	70
104,860	107,935	3.075	36,70	2,5	67
107,935	109,020	1.085	65,70	2,1	59
109,020	113,170	4.150	32,70	1,9	64
Autovía A-231 Auscultación Sentido descendente					
55,000	34,005	20.995,00	49,70	1,7	72
68,675	55,000	13.675,00	27,70	1,8	64
68,790	68,675	115,00	0,00	1,5	72
73,345	68,790	4.555,00	28,20	1,9	70
85,580	73,345	12.235,00	28,50	1,5	70
90,035	85,580	4.455,00	85,60	2,4	61
94,375	90,035	4.340,00	57,20	2,2	67
102,130	94,375	7.755,00	34,20	1,8	69
107,780	102,130	5.650,00	21,60	2,4	68
108,925	107,780	1.145,00	69,40	1,9	56
113,190	108,925	4.265,00	40,70	1,6	60

OBRA Nº 35 | TRAMO: SO-615, DE AUSEJO A PARAJE DE RECELADA (SORIA) (CASTILLA Y LEÓN)









Administración:	Junta de Castilla y León
Contratista:	UTE Soria (Extraco – Misturas – Batán Arenal). Recicla: CEMEX - Ecoasfalt
Fecha realización:	27 mayo – 26 julio de 2013
Longitud:	15,8 km
Superficie:	115.000 m^2
Tráfico:	
Sección existente:	
Firme existente:	7 m + bermas
Firme nuevo:	Macadam sobre explanada, riegos y mezclas espesor variable. Tramos sin variante: 15 cm MBC + 25-35 cm reciclado Tramos variantes: 15 cm MBC + 27/30 cm SC + 25 cm S-EST3
Problemas observados:	Firme muy deteriorado, blandones, piel de cocodrilo severa.
Corrector granulométrico:	No
Espesor reciclado:	25-35 cm
% cemento y tipo:	3% CEM IV/B (V) 32,5 N
Ensayos previos:	Granulometrías, plasticidad y estudio de la fórmula de trabajo Densidades = 2100 kg/m3 – 2200 kg/m3
Resistencia en obra (7/28/90 días):	--
Resistencia de testigos (edad):	--
Densidad/Humedad en obra:	
Densidad de testigos:	
Equipo de dosificación:	Mezcladora de lechada de cemento Wirtgen WM-1000
Equipo de reciclado:	Recicladora Wirtgen WR-2500
Ancho de reciclado/nº de pasadas:	2,4 m
Equipo de refino:	Motoniveladora
Equipo de compactación:	Rodillo 19 t
Rendimiento medio:	5.000 m^2 diarios
Rendimiento máximo:	
Equipo de prefisuración:	No
Distancia entre juntas:	
Capa de protección:	
Paso inmediato del tráfico:	
Período sin capa superior:	
Auscultación del firme:	
Comportamiento:	
Observaciones:	Hay mejora de trazado en planta y rasante. En los tramos con variante se ha ejecutado previamente un suelo estabilizado S-EST3 y sobre el mismo, y en continuidad con el reciclado de los tramos sin variante, se ha ejecutado un suelocemento in situ.

OBRA Nº 36 | TRAMO: CV377, DE BUGARRA A GESTALGAR (VALENCIA) (COMUNIDAD VALENCIANA)







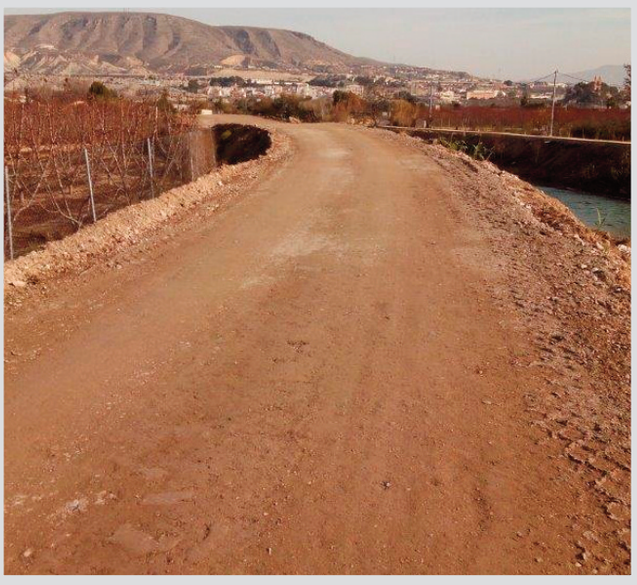


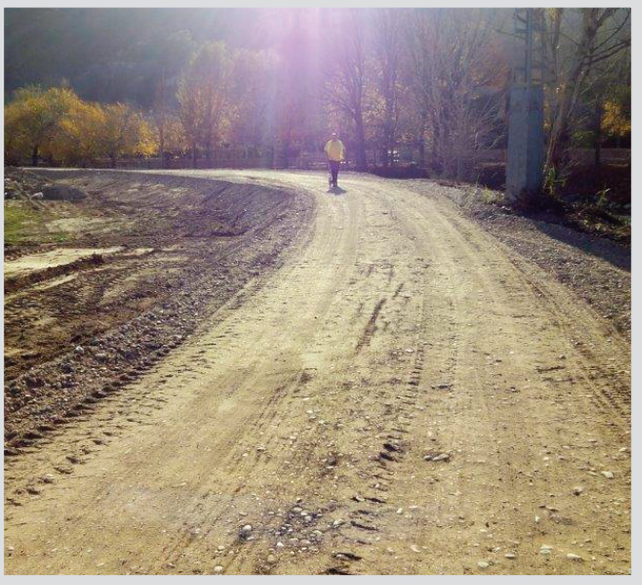
Administración:	Diputación de Valencia
Contratista:	APUC S.L. (reciclado: Triexplanada Europe S.L.)
Fecha realización:	Enero 2016
Longitud:	7 km
Superficie:	
Tráfico:	T42
Sección existente:	menos de 5,50 m ce ancho ampliados a 6/8
Firme existente:	5-10 cm de MBC y DTS + Macadam y zahorra artificial
Firme nuevo:	Estaba previsto 10 cm MBC + 25 cm ZA + 25 cm S-EST1. Se dispusieron finalmente 5 cm MBC + 25 cm reciclado
Problemas observados:	Pavimento muy deteriorado. (No hay drenaje longitudinal y el transversal funciona mal).
Corrector granulométrico:	No
Espesor reciclado:	
% cemento y tipo:	3 % (18 k/m2 CEM)
Ensayos previos:	Granulometrías, plasticidad y estudio de la fórmula de trabajo Proctor modificado: 7,6 % de humedad – 2,3 T/m^3
Resistencia en obra (7/28/90 días):	--
Resistencia de testigos (edad):	--
Densidad/Humedad en obra:	
Densidad de testigos:	
Equipo de dosificación:	Mezcladora de lechada de cemento Wirtgen WM-1000
Equipo de reciclado:	Recicladora Wirtgen WR-2500
Ancho de reciclado/nº de pasadas:	2,4 m
Equipo de refino:	Motoniveladora
Equipo de compactación:	Rodillo Hamm 19 t
Rendimiento medio:	
Rendimiento máximo:	
Equipo de prefisuración:	Si
Distancia entre juntas:	
Capa de protección:	
Paso inmediato del tráfico:	
Período sin capa superior:	
Auscultación del firme:	
Comportamiento:	
Observaciones:	Se trata de una modificación del firme previsto de zahorra artificial a reciclado.

OBRA Nº 37 | TRAMO: ACTUACIÓN DE RECUPERACIÓN AMBIENTAL DEL RÍO SEGURA EN CIEZA (MURCIA) (MURCIA)









Administración:	ACUAMED
Contratista:	TRAGSA (Recicla SOLTEC)
Fecha realización:	14 de Diciembre de 2015 – 4 de Febrero de 2016
Longitud:	-
Superficie:	16.000 m^2
Tráfico:	Local
Sección existente:	-
Firme existente:	Zahorra
Firme nuevo:	25 cm de suelo estabilizado
Problemas observados:	-
Corrector granulométrico:	-
Espesor reciclado:	25 cm
% cemento y tipo:	3% / 32.5
Ensayos previos:	-
Resistencia en obra (7/28/90 días):	-
Resistencia de testigos (edad):	-
Densidad/Humedad en obra:	2.2 / -
Densidad de testigos:	-
Equipo de dosificación:	Via seca, Streu Master RW 12.000
Equipo de reciclado:	Recicladora WR 2500
Ancho de reciclado/nº de pasadas:	4.5 / 2
Equipo de refino:	Motoniveladora y Rodillo
Equipo de compactación:	Rodillo de tierras
Rendimiento medio:	5.000 m2/día
Rendimiento máximo:	-
Equipo de prefisuración:	-
Distancia entre juntas:	-
Capa de protección:	-
Paso inmediato del tráfico:	Si
Período sin capa superior:	-
Auscultación del firme:	-
Comportamiento:	Satisfactorio
Observaciones:	Se trata de un reciclado o estabilización del suelo de un camino en Cieza para evitar erosiones.

OBRA Nº 38 | TRAMO: CM-3105 DE LA RODA A BARRAX (ALBACETE) (CASTILLA-LA MANCHA)





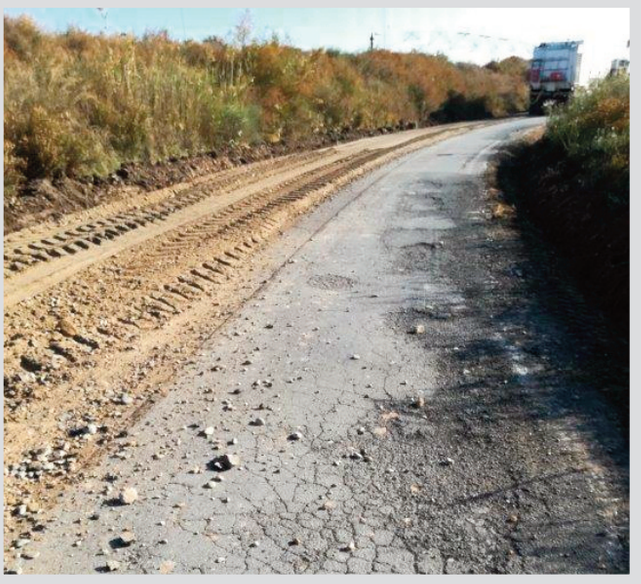


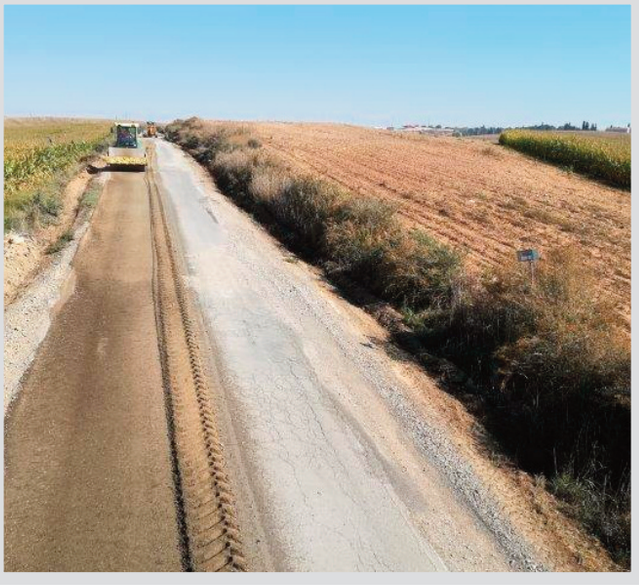


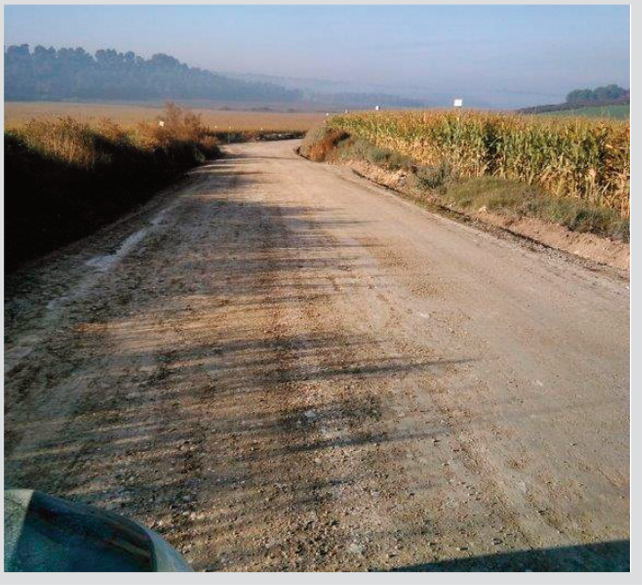
Administración:	Junta de Castilla la Mancha
Contratista:	Alvaro Villaescusa. (Recicla: Triexplanada Europe S.L.)
Fecha realización:	Julio de 2016
Longitud:	18.000 m
Superficie:	124.000 m^2
Tráfico:	T32
Sección existente	Sección central 4 m de ancho, MB 4 cm, macadam bituminoso 8-10 cm y zahorra artificial > 12 cm. Franjas laterales MB 4 cm y zahorra artificial > 25 cm.
Firme existente:	5 m
Firme nuevo:	Sección 6/7 sin bermas. 10 cm MBC + 25 cm reciclado con cemento
Problemas observados:	No detectados. Obras con tráfico cortado.
Corrector granulométrico	No. (Aporte bandas laterales de ensanche, zahorra artificial).
Espesor reciclado:	25 cm.
% cemento y tipo:	Dotación media 4,3% Cemento clase 32,5.
Ensayos previos:	Granulometrías, límites, probetas con rotura a 7 días.
Resistencia en obra (7/28/90 días):	2,68 MPa a 7 días en sección central – 2,49 MPa 7 días en bandas ensanche.
Resistencia de testigos (edad):	
Densidad/Humedad Proctor:	
Densidad/Humedad en obra:	
Densidad de testigos:	
Equipo de dosificación:	Mezcladora de lechada Wirtgen WM-1000
Equipo de reciclado:	Recicladora Wirtgen WR-2500-R
Ancho de reciclado/nºpasada	7 m, 4 pasadas
Equipo de refino:	Motoniveladora
Equipo de compactación:	1 rodillo vibratorio
Rendimiento medio:	6.000 m^2/día
Rendimiento máximo:	8.000 m^2/día
Equipo de prefisuración:	
Distancia entre juntas:	
Capa de protección:	Riego curado ECR-1
Paso inmediato de tráfico:	No, carretera cortada al tráfico
Período sin capa superior:	1 semana
Auscultación del firme:	
Comportamiento:	
Observaciones:	Extendidas bandas de ensanche, recicladas con el tronco existente a ancho completo. Fabricado suelocemento in situ en tramos de variante, en continuidad con el reciclado.

OBRA Nº 39 | TRAMO: CAMINOS DE LA CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO EN GIMENELLS (LÉRIDA) (CATALUÑA)









Administración:	Ministerio de Medio Ambiente
Contratista:	Vidal OyS (Recicla Soltec)
Fecha realización:	Mayo de 2017
Longitud:	Varios tramos, 5 m de anchura
Superficie:	20.000 m^2
Tráfico:	T4
Sección existente	5 m ancho
Firme existente:	Zahorra + capa de MBC muy deteriorada
Firme nuevo:	5 cm MBC + Reciclado 30 cm
Problemas observados:	Humedad excesiva en los bordes
Corrector granulométrico	
Espesor reciclado:	30 cm
% cemento y tipo:	II 32.5
Ensayos previos:	
Resistencia en obra (7/28/90 días):	
Resistencia de testigos (edad):	
Densidad/Humedad Proctor:	
Densidad/Humedad en obra:	
Densidad de testigos:	
Equipo de dosificación:	Lechada cemento con Wirtgen WM1000
Equipo de reciclado:	Recicladora Wirtgen WR 2500
Ancho de reciclado/nºpasada:	
Equipo de refino:	Motoniveladora
Equipo de compactación:	1 rodillo vibratorio
Rendimiento medio:	4.000 m^2/día
Rendimiento máximo:	
Equipo de prefisuración:	No
Distancia entre juntas:	
Capa de protección:	Riego curado ECR-1
Paso inmediato de tráfico:	Sí
Período sin capa superior:	1 semana
Auscultación del firme:	
Comportamiento:	

Observaciones:

OBRA Nº 40 | REPARACIÓN Y MEJORA DEL CAMINO DE EGUINO A ZIORDIA (ÁLAVA) (PAÍS VASCO)









Administración:	Diputación Foral de Alava. Departamento de Agricultura.
Contratista:	Balgorza (Subcontratista SOLTEC)
Fecha realización:	Mayo-Junio 2017
Longitud:	1 km
Superficie:	7.600 m^2
Tráfico:	T42
Sección existente	6 m
Firme existente:	5-10 cm Mezcla Bituminosa/Tratamiento Superficial + 10-20 cm ZA + Explanada arcillosa
Firme nuevo:	10 cm MBC + 30 cm reciclado con cemento
Problemas observados:	--
Corrector granulométrico	No
Espesor reciclado:	30 cm
% cemento y tipo:	5% CEM II/B-L 32,5 R
Ensayos previos:	2 Calicatas/Granulometrías/EA/Límites de Atterberg/Materia orgánica/ Sulfatos/Humedad natural.
Resistencia en obra (7/28/90 días):	2,8 MPa a 7 días.
Resistencia de testigos (edad):	--
Densidad/Humedad Proctor:	
Densidad/Humedad en obra:	2,1 t/m^3 / 9%
Densidad de testigos:	--
Equipo de dosificación:	Streu Master RW 12000 por vía seca
Equipo de reciclado:	Recicladora Bomag Mph
Ancho de reciclado/nºpasada	-/ 2 ó 3
Equipo de refino:	Motoniveladora
Equipo de compactación:	1 rodillo de tierras Bomag
Rendimiento medio:	-- m2/día
Rendimiento máximo:	
Equipo de prefisuración:	No
Distancia entre juntas:	
Capa de protección:	Riego curado ECR-1
Paso inmediato de tráfico:	No, carretera cortada al tráfico 3 días
Período sin capa superior:	1 semana a 1 mes
Auscultación del firme:	No
Comportamiento:	Satisfactorio
Observaciones:	

OBRA Nº 41 | CAMINO DE SERVICIO PARTICULAR EN EL ESCORIAL (MADRID) (COMUNIDAD DE MADRID)









Administración:	Particular
Contratista:	Insaef (recicla Soltec)
Fecha realización:	Junio de 2018
Longitud:	1.500 m
Superficie:	6.000 m^2
Tráfico:	T4
Sección existente	5m,
Firme existente:	Suelo suelto
Firme nuevo:	Suelo-cemento in situ sin protección
Problemas observados:	Afloramientos de Roca granítica, Zahorra suelta, presencia de roderas, pérdida de material.
Corrector granulométrico	15 cm aporte de zahorra
Espesor reciclado:	20 cm
% cemento y tipo:	3 %, II 32,5 de Cemex
Ensayos previos:	
Resistencia en obra (7/28/90 días):	2,5 MPa / - / -
Resistencia de testigos (edad):	
Densidad/Humedad Proctor:	
Densidad/Humedad en obra:	
Densidad de testigos:	
Equipo de dosificación:	Repartidor Strew Master RW12
Equipo de reciclado:	Recicladora Wirtgen WR 2500
Ancho de reciclado/nºpasada	5m, 2 pasadas
Equipo de refino:	Motoniveladora CAT 12
Equipo de compactación:	1 rodillo vibratorio BOMAG
Rendimiento medio:	3.000 m^2/día
Rendimiento máximo:	
Equipo de prefisuración:	No
Distancia entre juntas:	
Capa de protección:	Riego curado ECR-1
Paso inmediato de tráfico:	Si
Período sin capa superior:	
Auscultación del firme:	
Comportamiento:	
Observaciones:	

OBRA Nº 42 | TRAMO: MEJORA DE FIRME Y SEÑALIZACIÓN EN LA SE-4108 (RAMAL DE LA A-8100 A ARAHAL) (ANDALUCÍA)









Administración:	Junta de Andalucía
Contratista:	Eiffage (recicla Soltec)
Fecha realización:	Julio de 2018
Longitud:	11.000 m
Superficie:	66.000 m^2
Tráfico:	T4
Sección existente	Varias capas de aglomerado alternando con ZA y albero
Firme existente:	6 m
Firme nuevo:	5 cm MBC + 30 cm reciclado con cemento
Problemas observados:	Problemas con el paso del tráfico, heterogeneidad en la obra
Corrector granulométrico	30 cm
Espesor reciclado:	3 %, II 32,5
% cemento y tipo:	
Ensayos previos:	Granulometrías, límites, probetas con rotura a 7 días
Resistencia en obra (7/28/90 días):	3,0 MPa / - / -
Resistencia de testigos (edad):	
Densidad/Humedad Proctor:	
Densidad/Humedad en obra:	
Densidad de testigos:	
Equipo de dosificación:	Lechada cemento con Wirtgen WM1000
Equipo de reciclado:	Recicladora Wirtgen WR 2500
Ancho de reciclado/nºpasada	6 m, 3 pasadas
Equipo de refino:	Motoniveladora CAT 12
Equipo de compactación:	1 rodillo vibratorio BOMAG
Rendimiento medio:	5.500 m^2/día
Rendimiento máximo:	7.000 m^2/día
Equipo de prefisuración:	Sí, minipala
Distancia entre juntas:	
Capa de protección:	Riego curado ECR-1
Paso inmediato de tráfico:	No, carretera cortada al tráfico
Período sin capa superior:	1 semana
Auscultación del firme:	
Comportamiento:	
Observaciones:	

A6 ANEJO 6

Bibliografía y referencias

- Reglamentación oficial (española).
- Ministerio de Fomento, Orden Circular 40/2017 sobre reciclado de firmes y pavimentos bituminosos, 2017.
- Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3. Capítulos varios.
- Gobierno del País Vasco. Norma para el dimensionamiento de firmes de la Red de Carreteras del País Vasco. Noviembre, 2012.
- Gobierno de Aragón. Recomendaciones técnicas para el dimensionamiento de firmes de la red autonómica aragonesa. Abril, 2011.
- Generalitat Valenciana, Conselleria de Infraestructuras y Transporte. Norma de secciones de firme de la Comunitat Valenciana. Enero, 2009.
- Ministerio de Fomento. Comisión Permanente del Hormigón, Secretaría general Técnica. Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08. Real Decreto 1247/2008 de 18 de julio.
- Junta de Andalucía. Consejería de Obra Públicas y Transportes. Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía, 2007.
- Junta de Castilla y León. Consejería de Fomento. Recomendaciones de proyecto y construcción de firmes y pavimentos. Valladolid, 2004.
- Ministerio de Fomento. Norma 6.1-I.C. de secciones de firme. Orden Circular 10/2002, de 30 de septiembre, de la Dirección General de Carreteras.

Bibliografía relacionada

- Diaz Minguela, J. Tesis doctoral El estudio del comportamiento de los firmes reciclados in situ con cemento. Burgos, 2011.
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) e Instituto Español del Cemento y sus aplicaciones (IECA), Manual de firmes con capas tratadas con cemento. Madrid, 2003.

- IECA, Manual de firmes reciclados in situ con cemento. Madrid, 1999.
- Centre d'Information de l'Industrie Cimentière. Matériels spécialisés pour le traitement en place des matériaux de chaussées au ciment et/ou à la chaux. Routes, nº 26, junio 1988. París.
- Ruiz, A: Reciclado de pavimentos. Rutas, núm. 65, marzo - abril 1998 y núm. 66, mayo -junio 1998.
- Fernández del Campo, Juan A. Tratado de estabilización y reciclado de capas de firme con emulsión asfáltica. Asociación Española de la Carretera, Madrid, 1998.
- Del Val, M.A. y Rocci, S. Guía para el dimensionamiento de firmes reciclados in situ en frío. PROBISA, Madrid, 1998
- Asociación Española de la Carretera, AEC. Ponencias del IV Congreso Nacional de Firmes, Segovia, 2 a 5 junio de 1998.
- IECA, Manual de pavimentos de hormigón para vías de baja intensidad de tráfico. Madrid, 1997.
- Asociación Técnica de Carreteras ATC, Ponencias de las VI Jornadas de Conservación de Carreteras Murcia, 4 al 6 de junio de 1997.
- Lefort, M. Le point sur le retraitement en place à froid des anciennes chaussées. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, nº 212, noviembre - diciembre 1997.
- ANCADE, ANTER e IECA. Manual de estabilización de suelos con cemento o cal. Madrid, noviembre 1997.
- INTEVÍA. Curso sobre Reciclado de firmes y pavimentos, 1996.
- CEDEX y ESM. Ponencias de la Jornada sobre Reciclado de Capas de Firme con Emulsión, Madrid, 12 de marzo de 1996.
- Kraemer, C. La reflexión de fisuras de las bases de gravacemento y hormigón compactado: causas y remedios. Rutas, núm. 54, mayo - junio 1996.
- Jofré, C. Balance del empleo de las técnicas de prefisuración de bases tratadas con cemento en España. Rutas, núm. 54, mayo - junio 1996.
- Lefort, M. et al: Traitement des sols en place. Retraitement des anciennes chaussées. Les matériels d'épandage et de malaxage. Bulletin de liaison des LPC, número especial XVIII, París, mayo 1995.

- Jofré, C.: Reciclado con cemento de firmes existentes. Carreteras, núm. 77, mayo - junio 1995.
- Jofré, C. y Vaquero, J. Prefisuración de capas tratadas con cemento. Carreteras, núm 77, mayo - junio 1995.
- Ministère de la Région wallonne, Nivelles (Bélgica). Le retraitement en place des chaussées au moyer de ciment. Code de bonne pratique, 1995.
- A.A. Loudon and Partners, Kloof. Cold deep in place recycling. Technical recommendations and application specifications. República Sudafricana, 1995.
- IECA y Universidad Politécnica de Extremadura. Ponencias de las Jornadas sobre Reciclado con Cemento de Firmes, Cáceres, 13 a 14 de junio de 1995.
- Asociación Técnica de Carreteras, ATC. Ponencias del II Congreso Nacional de Firmes, Valladolid, 3 a 5 de mayo de 1994.
- The performance of roads reconstructed by cold in-situ recycling 1985-1987. General Information Report 17, Energy Efficiency Office, Department of the Environment, Harwell (Oxfordshire, UK), 1994.
- Guide to in-situ deep-lift recycling of granular pavements. Roads and Traffic Authority, New South Wales (Australia), 1994.
- Wirtgen Cold Recycling. Job reports and references about executed jobs. Wirtgen GmbH, Windhagen (Alemania), 1994.
- Centre d'Information de l'Industrie Cimentière. Le retraitement des chaussées en place au ciment. Routes, nº 46, enero 1993. París.
- AIPCR, Chaussées semi-rigides - Semi-rigid pavements. Publicación 08.02.B, París, 1991.
- Del Val, M.A. y Bardesi, A.: "Manual de pavimentos asfálticos para vías de baja intensidad de tráfico. Composan - ESPAS, Madrid, junio 1991.

Normas relacionadas

- AENOR, norma UNE-EN 933-1: 2012 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Métodos del tamizado.

- AENOR, norma UNE-EN 933-2: 1996 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas.
- AENOR, norma UNE-EN 933-2/1M: 1999 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas.
- AENOR, norma UNE-EN 13286-2: 2011 Mezclas de áridos sin ligante y con conglomerante hidráulico. Parte 2: Métodos de ensayo para la determinación en laboratorio de la densidad de referencia y el contenido en agua. Compactación Proctor.
- AENOR, norma UNE-EN 13286-2: 2011/AC: 2012 Mezclas de áridos sin ligante y con conglomerante hidráulico. Parte 2: Métodos de ensayo para la determinación en laboratorio de la densidad de referencia y el contenido en agua. Compactación Proctor.
- AENOR, norma UNE-EN ISO 17892-1: 2015 Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos. Parte 1: Determinación de la humedad
- AENOR, norma UNE 103900 Determinación in situ de la densidad y de la humedad de suelos y materiales granulares por métodos nucleares: pequeñas profundidades.
- AENOR, norma UNE-EN-ISO 9001, Sistemas de gestión de la calidad. Requisitos
- AENOR, norma UNE-EN-ISO 9002, Sistemas de la calidad. modelo para el aseguramiento de la calidad en la producción, la instalación y el servicio posventa.
- AENOR. UNE 80307. "Cementos para usos especiales"
- AENOR. UNE 103103. "Determinación del límite liquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande".
- AENOR. UNE 103104. "Determinación del límite plástico de un suelo".
- AENOR. UNE 103201. "Determinación cualitativa del contenido en sulfatos solubles de un suelo.
- AENOR. UNE 103204. "Determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo por el método del permanganato potásico".
- AENOR. UNE 103406. "Ensayo de colapso en suelos".
- AENOR. UNE 103500. "Geotecnia. Ensayo de compactación. Proctor normal".

- AENOR. UNE 103502. ”Método de ensayo para determinar en laboratorio el índice CBR de un suelo”.
- AENOR. UNE 103503. ”Determinación in situ de la densidad de un suelo por el método de la arena”.
- AENOR. UNE 103601. “Ensayo del hinchamiento libre de un suelo en edómetro”.
- AENOR. UNE 103808. “Ensayo de carga vertical de suelos mediante placa estática”.
- AENOR. UNE 103900 “Determinación in situ de la densidad y de la humedad de suelos y materiales granulares por métodos nucleares: pequeñas profundidades”.
- AENOR. UNE 196-3 “Métodos de ensayos de cementos. Parte 3. Determinación del timpo de fraguado y de la estabilidad de volumen".
- AENOR. UNE-EN 197-1. “Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes”.
- AENOR. UNE-EN 933-1. “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado”.
- AENOR. UNE-EN 933-2. “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las partículas”.
- AENOR. UNE-EN 933-3. “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas".
- AENOR. UNE-EN 933-5. “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 5: Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas de árido grueso”.
- AENOR. UNE-EN 933-8 “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena”.
- AENOR. UNE-EN 933-9. “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo de azul de metileno”.
- AENOR. UNE-EN 934-2. “Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado”.

- AENOR. UNE-EN 1097-2. "Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación".
- AENOR. UNE-EN 10108-1. "Mezclas bituminosas. Especificaciones de materiales. Parte 1: Hormigón bituminoso".
- AENOR. UNE-EN 12350-2. "Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento".
- AENOR. UNE-EN 12350-7. "Ensayos de hormigón fresco. Parte 7: Determinación del contenido de aire. Métodos de presión".
- AENOR. UNE-EN 12390-3. "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas".
- AENOR. UNE-EN 12390-5. "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas".
- AENOR. UNE-EN 12504-1. "Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 1: Testigos. Extracción, examen y ensayo a compresión".
- AENOR. UNE-EN 13286-2. "Mezclas de áridos sin ligante y con conglomerante hidráulico. Parte 2: Métodos de ensayo para la determinación en laboratorio de la densidad de referencia y el contenido en agua. Compactación Proctor".
- AENOR. UNE-EN 13286-41. "Mezclas de áridos sin ligante y con conglomerante hidráulico. Parte 41: Método de ensayo para la determinación de la resistencia a la compresión de las mezclas de áridos con conglomerante hidráulico".
- AENOR. UNE-EN 13286-45. "Mezclas de áridos sin ligante y con conglomerante hidráulico. Parte 45: Método de ensayo para la determinación del periodo de trabajabilidad".
- AENOR. UNE-EN 13286-51. "Mezclas de áridos sin ligante y con conglomerante hidráulico. Parte 51: Métodos de elaboración de probetas de mezclas con conglomerante hidráulico utilizando martillo vibratorio de compactación".
- CEDEX. NLT-103. "Humedad de un suelo por el procedimiento del alcohol". Madrid, 1972.
- CEDEX. NLT-109. "Densidad in situ por el método de la arena". Madrid, 1987.
- CEDEX. NLT-111. "Índice CBR en el laboratorio". Madrid, 1987.

- CEDEX. NLT-114. "Determinación del contenido de sales solubles de los suelos". Madrid, 1999.
- CEDEX. NLT-115. "Contenido de yeso en suelos". Madrid, 1999.
- CEDEX. NLT-254. "Ensayo de colapso de suelos". Madrid, 1999.
- CEDEX. NLT-305. "Resistencia a compresión simple de materiales tratados con conglomerantes hidráulicos". Madrid, 1990.
- CEDEX. NLT-310. "Compactación con martillo vibrante de materiales granulares tratados". Madrid, 1990.
- CEDEX. NLT-311. "Densidad máxima y humedad óptima de compactación, mediante martillo vibrador, de materiales granulares con o sin productos de adición". Madrid, 1996.
- CEDEX. NLT-330. "Cálculo del índice de regularidad internacional, IRI, en pavimentos de carreteras". Madrid, 1998.
- CEDEX. NLT-357. "Ensayo de carga con placa". Madrid, 1998.


IECA
INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO
Y SUS APLICACIONES


anter
ASOCIACIÓN NACIONAL TÉCNICA
DE ESTABILIZADOS DE SUELOS
Y RECICLADO DE FIRMES