

Estado del arte del reciclado en frío de firmes *in situ* en España¹



State-of-the-art of On-site Cold Recycling in Spain

Jesús Díaz Minguela

*Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Director de IECA Tecnología*

Juan José Potti

*Doctor en Ingeniería Química
Presidente Ejecutivo de la Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas (ASEFMA)*

Julio José Vaquero García

*Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos del Estado.
Presidente del Comité de Firmes. ATC*

Resumen

Este artículo describe las razones que han favorecido el desarrollo de esta técnica en España, aportando información sobre las categorías de tráfico, las especificaciones de los materiales y de las secciones estructurales contempladas en la reglamentación española, así como los procesos constructivos y las principales características de las obras realizadas desde que en el año 1991 se recicló el primer pavimento en España.

Se han determinado las leyes de fatiga de los materiales reciclados con cemento, la correlación de su resistencia a compresión a 7 días, parámetro habitual de control en obra, con la resistencia a otras edades, así como la resistencia a flexión a largo plazo. Todo ello para optimizar el diseño estructural de los firmes y poder proponer un catálogo de secciones con capas recicladas con cemento.

El reciclado en frío con emulsión es una tecnología que se ha ido desarrollando en base a la experiencia obtenida en España. Las últimas innovaciones se basan en el uso, como ligante, de mezclas de emulsión y cemento en porcentajes similares.

Con una superficie total de más de 35 millones de metros cuadrados de reciclado en España, puede afirmarse que el reciclado *in situ* con cemento o con emulsión son técnicas asentadas, con un amplio rango de experiencias y un buen conocimiento de los procesos constructivos, así como un buen comportamiento hasta la fecha.

Abstract

The different reasons favouring this technique are reported. Information like traffic categories, materials specifications and structural sections included in Spanish practice, are provided on projects, as well as the construction process, and the main characteristics of the different works performed since the first pavement was recycled in Spain in 1991.

The fatigue characterization of materials materials with cement has been determined. The correlation between 7-day compressive strength, which is the usual control parameter at the worksite, and long-term flexural strength has been obtained. All this in order to optimize the structural design of pavements, and to propose a catalogue of structural sections with cement-recycled layers. The cold in-place recycling with emulsion it is a technology evolved with the experience obtained in Spain. Most recent innovations are based in the use of the mix emulsion plus cement as binder.

With a total surface of more than 35 million square metres already recycled in Spain, it can be said that in-place pavement recycling with cement or/and emulsion are proven techniques, with a wide range of experience and good knowledge of the building process in Spain, and the performance of which to date has been very good.

¹ Comunicación presentada al XXV Congreso Mundial de la Carretera celebrado en Seúl del 2 al 6 de noviembre de 2015.

Las expresiones reciclado, crecimiento sostenible, medio ambiente nos rodean constantemente, formando parte de nuestra vida diaria. Todo el mundo es consciente de que se recicla el papel, el vidrio, el plástico. El impacto social de las actividades de reciclado en el mundo de las carreteras es mínimo, y es ahí donde hay mucho trabajo por realizar, ya que si la sociedad es consciente del valor de la tecnología del reciclado en las carreteras habrá más presión sobre los gestores de las infraestructuras para incluir estas tecnologías como habituales y no eventuales.

Los materiales procedentes del fresado de capas de mezclas bituminosas degradadas constituyen un 10 % de los residuos procedentes de la construcción y de la demolición (RCD), que son la mayor fuente de residuos inertes en nuestro país. Su producción anual en España se estima en torno a 62,50 kg/hab, lo que representa una cantidad cercana a 2,5 millones de toneladas al año, de las cuales se recicla en la actualidad poco más del 10 %: lo que deja de manifiesto que aún estamos muy lejos de aprovechar los recursos que nos ofrece la propia carretera, pues el agotamiento de un firme no implica el agotamiento de los materiales que lo componen.

El fuerte impulso en el marco legal europeo de las políticas de sostenibilidad, innovación y eficiencia, junto a la necesidad de rehabilitación de las infraestructuras viarias (cuyo nivel de degradación ha aumentado como fruto de una larga crisis económica y la consiguiente disminución de los recursos dedicados a conservación) marcan el futuro inmediato de las técnicas de reciclado, que comenzaron a utilizarse en España hace más de 20 años.

Buscando nuevos procedimientos sostenibles para mejorar la capacidad estructural de las carreteras fatigadas (que permitieran aprovechar los áridos existentes en la carretera y abaratar costes) se empezaron a reutilizar y mejorar en España las capas del firme ya existentes, mediante su disgregación del mismo y la adición de un ligante hidrocarbonado o de un conglomerante hidráulico, en función de la técnica utilizada.

Se puede considerar el reciclado como una técnica moderna por la que se logra transformar un firme degradado en una nueva capa de notable capacidad estructural aprovechando los materiales existentes en la propia carretera, que han perdido algunas de sus propiedades iniciales (resistencia, cohesión, textura, geometría, etc.) como consecuencia de su uso y envejecimiento, pero que tienen el potencial de ser reutilizados para integrar nuevas capas del firme.

Puede realizarse en frío o en caliente, según la temperatura de la mezcla, y a su vez en central o *in situ*, según el lugar donde ésta se realice. El reciclado en frío *in situ* puede a su vez llevarse a cabo con cemento, con emulsión o con una combinación de ambos materiales según el objetivo perseguido. Esta capa reciclada tendrá diferente espesor, bien se recicle con emulsión (6 a 15 cm), bien con cemento (20 a 35 cm) o bien con ambos conglomerantes (15 a 18 cm).



Figura 1. Equipos reciclando con cemento un carril de vehículos pesados de una autovía

El reciclado *in situ* consiste en reutilizar los materiales existentes mediante su disgregación en una cierta profundidad y en la adición (en unas determinadas proporciones obtenidas mediante ensayos previos) de cemento o emulsión, agua y a veces áridos o algún aditivo. Esta mezcla se compacta y cura adecuadamente, y constituye la capa de mayor resistencia estructural, que resuelve los problemas existentes en el firme, extendiendo posteriormente sobre ella una capa de rodadura que aporta las características superficiales finales de la vía.

Desde los años 90, la opción del reciclado *in situ* para el acondicionamiento de carreteras ha resurgido con fuerza y se ha desarrollado con éxito debido sobre todo a tres factores:

- Un mejor conocimiento de las características mecánicas de los materiales tratados y de su comportamiento en el conjunto del firme.
- El empleo de nuevos equipos de mayor potencia, rendimiento y profundidad de trabajo que proporcionan, además, una mayor calidad del producto final.
- La creciente conciencia ecológica, que ha impulsado esta técnica por los beneficios ambientales que aporta ante la sobreexplotación de los yacimientos de áridos existentes y la dificultad de abrir nuevas explotaciones. ¿Quién conoce que las carreteras se reciclan, aprovechando al 100 % los materiales existentes?

El objetivo fundamental del reciclado de una carretera es recuperar o 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: menor susceptibilidad al agua y mayor resistencia a la erosión.
- Protección de la explanada y de las capas inferiores del firme, cuyas características son a veces deficientes.

Rutas Técnica

1. Reseña histórica

La primera rehabilitación con cemento en España se llevó a cabo en el año 1992 [1] en una carretera convencional de calzada única de dos carriles, en una longitud de aproximadamente 12 km y una superficie de unos 100 000 m²; desde entonces el número de actuaciones que se han llevado a cabo ha sido muy importante, tal y como se aprecia en la Figura 2, de manera que la superficie total de carreteras recicladas *in situ* con cemento en España hasta principios del año 2015 es de unos 27,2 millones de metros cuadrados, equivalentes a unos 3750 km de carreteras recicladas. A estas experiencias se suman los reciclados con emulsión de las carreteras, que comenzaron a emplearse hace aproximadamente unos dieciséis años.

Por otro lado, la normativa española [2] recomienda el estudio de soluciones de reciclado de firmes cuando la superficie de actuación sea superior a 70 000 m², o cuando la solución de rehabilitación consista en el fresado y reposición de la mezcla deteriorada en más de un 25 % de la superficie a tratar, con el posterior extendido de una capa de refuerzo de mezcla bituminosa, lo que sin duda ha favorecido el desarrollo de estas técnicas.

2. Ventajas del reciclado

Las ventajas que presentan las técnicas de reciclado *in situ* son inherentes a su principal característica: el empleo de los materiales existentes en la carretera. Por lo tanto, se puede hablar de ventajas:

- Ambientales, al evitar la extracción de nuevos áridos y el vertido de los materiales fresados o demolidos.
- Energéticas, al efectuar un menor consumo de energía en el proceso: lo que reduce, en consecuencia, la emisión de contaminantes (CO₂, óxidos de azufre y nitrógeno) asociados a la combustión de combustibles fósiles.
- Operativas y de seguridad, al reducir la perturbación al tráfico durante la construcción, ya que una sola máquina, en una sola pasada, ejecuta el fresado del firme deteriorado, la mezcla con el ligante o el conglomerante, y la puesta en obra de la mezcla final. Se aumenta, de este modo, la seguridad del tráfico y de los operarios, y se reducen las molestias y daño causado a la vía, por el peso y tránsito de la maquinaria de obra.
- Técnicas, el no tener que modificar la rasante existente y poder tratar un solo carril (el más deteriorado), y al poder colocar las capas superiores del firme sobre una base estable y no deteriorada consiguiendo, finalmente, una mayor vida útil.
- Económicas, al reducir el consumo de materiales en el proceso, evitar los costes de su transporte y reducir los tiempos de afección a la vía en la que se esté trabajando. En resumen, el reciclado es un método de construcción



Figura 3. Reciclado *in situ* con cemento con dos equipos trabajando en paralelo

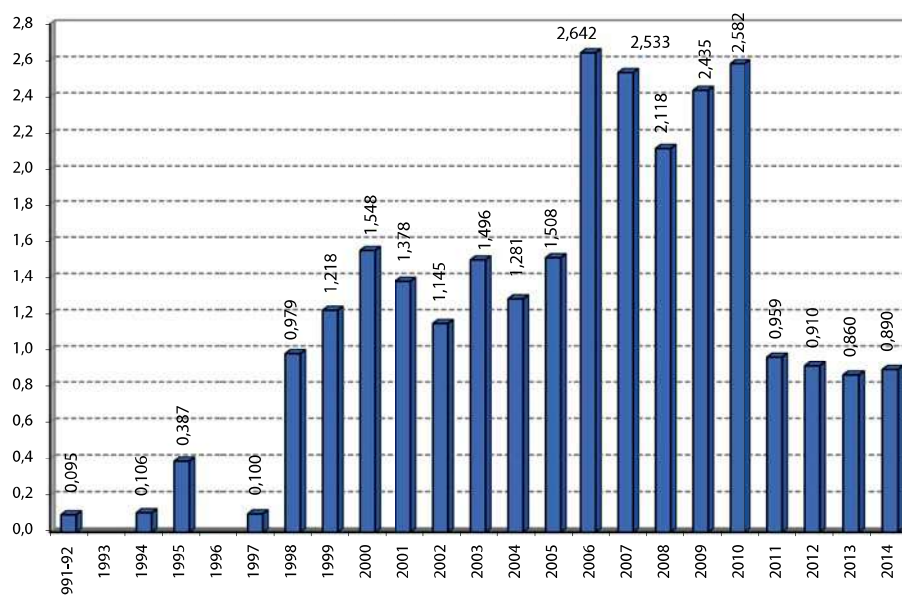


Figura 2. Evolución de la superficie reciclada *in situ* con cemento (1991-2014) en millones de metros cuadrados

eficiente, en cuanto al empleo de recursos y de energía, que contribuye a preservar el medio ambiente; y al mismo tiempo económico, al reutilizar todos los materiales y reducir los costes del transporte.

3. Normativa y diseño

3.1. Reciclado *in situ* con cemento

En el año 1999 el Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) publica el "Manual de Firms Reciclados *in situ* con Cemento" [3], donde se recogen todos los aspectos relacionados con el reciclado, tanto en lo referente a los estudios necesarios y desarrollo del proyecto, como a su realización (equipos, ejecución de las obras, control de calidad, etc.), además de incluir un estudio de costes.

Actualmente, la secciones de firms rehabilitados mediante la técnica del reciclado *in situ* con cemento están normalizadas en la normativa autonómica "Recomendaciones de la Junta de Castilla y León" [4], permitiéndose en otros casos un estudio analítico de la estructura del firme reciclado; tomando para ello las categorías de tráfico pesado establecidas por la normativa de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, con las subdivisiones correspondientes, (ver Tabla 1) y adoptando para los materiales las características indicadas en el artículo 21 "Reciclado *in situ* con cemento de capas de firme" del Pliego General PG-4, de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento [5] (ver Tabla 2).

En el año 2011, Díaz Minguela [6] presentó su tesis doctoral dedicada al estudio del comportamiento de los firms reciclados *in situ* con cemento, realizando un total de 350 ensayos, muchos de ellos en prensa dinámica con probetas prismáticas de 15x15x60 cm. Las conclusiones obtenidas fueron las siguientes:

- La variabilidad de las características del material requiere que la dotación de cemento supere siempre un valor mínimo (superior al 3 %) para asegurar cierta homogeneidad y cumplir las resistencias exigidas a lo largo de toda la obra. Además, se debe ser generoso en la dosificación puesto que dotaciones muy estrictas suelen generar problemas posteriores (cualquier incremento de finos provoca una caída de resistencias y problemas mucho más costosos de resolver *a posteriori*).
- Se ha constatado la relación directa entre la resistencia a compresión y la densidad del material, aunque no se puede establecer una ecuación única debido a la variabilidad de las características del material reciclado, que depende de varios parámetros como la granulometría, el contenido de finos o el porcentaje de partículas con envoltura bituminosa. Esta relación se tiene también entre la resistencia a tracción indirecta y la densidad, pero no ha quedado determinada con la resistencia a flexotracción.
- Según la normativa española, la calidad del material reciclado se controla en obra por medio de su resistencia a compresión a la edad de 7 días, mientras que su comportamiento se define a través de su resistencia a flexotracción a largo plazo. Las características mecánicas del material reciclado estudiado permiten establecer las

Tabla 1. Categorías de tráfico pesado [2]

Tráfico pesado	T00	T0	T1	T2	T31	T32	T41	T42
IMD _p (*)	≥ 4000	3999 a 2000	1999 a 800	799 a 200	199 a 100	99 a 50	49 a 25	< 25

(*) IMD_p = Intensidad media diaria de vehículos pesados en el carril de proyecto y año de puesta en servicio.

Tabla 2. Principales prescripciones para el reciclado de firms *in situ* con cemento [5]

Prescripción		Norma	Valor
Tamaño máximo		UNE-EN 933-1	≤ 80 mm
Pase tamiz UNE 4 mm		UNE-EN 933-1	≥ 30 % (si no corrector ZA)
Materia orgánica		UNE 103204	< 1 %
Contenido sulfatos SO ₃		UNE-EN 1744-1	< 1 %
Plasticidad		UNE 103103 y 103104	IP < 15 y LL < 35
Mínimo contenido de cemento			3 %
Resistencia a compresión a 7 días		UNE-EN 13286-41	≥ 2,5 MPa
Densidad mínima <i>in situ</i>		UNE-EN 13286-2	97 % D _{máx} Proctor modificado
Plazo de trabajabilidad (*)	ancho completo	UNE-EN 13286-45	≥ 2 horas
	por bandas		≥ 3 horas
	con tráfico		≥ 4 horas

(*) Si temperatura > 30° obligatorio uso retardador de fraguado.

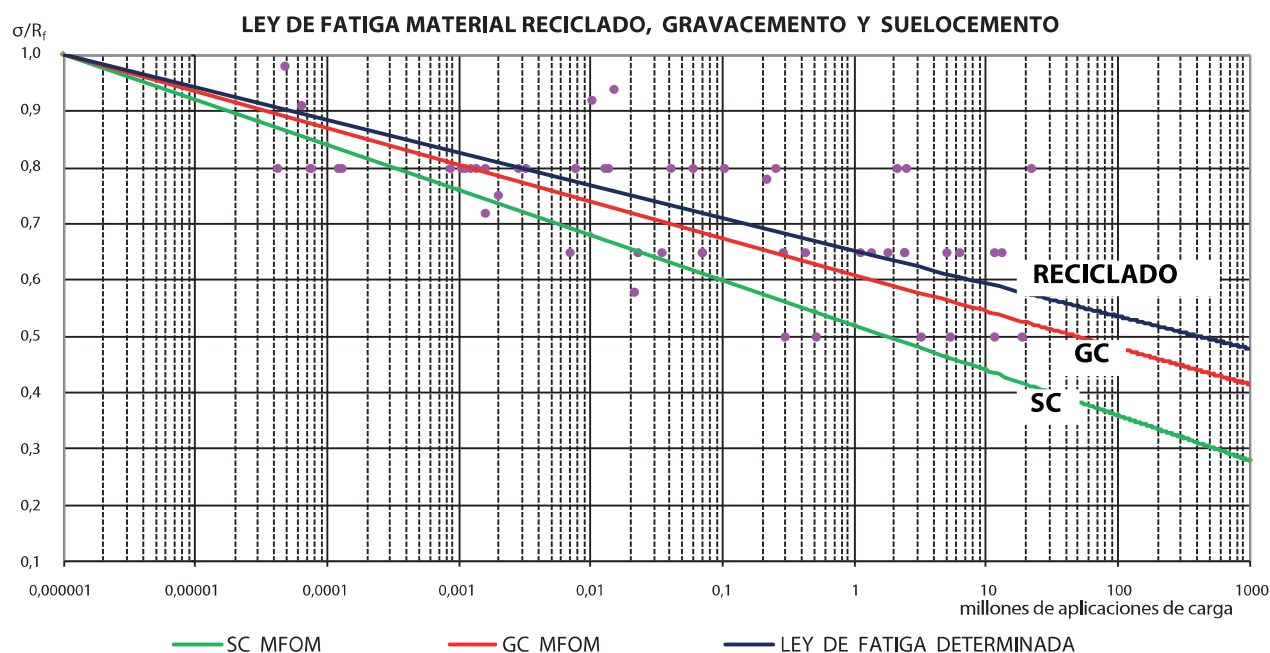


Figura 4. Leyes de fatiga de suelocemento, gravacemento y material reciclado [6]

siguientes correlaciones, que deben considerarse únicamente para estimar órdenes de magnitud:

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

$$R_{ti,90d} = 2 R_{ti,7d} \quad (2)$$

$$R_{f,90d} = 2 R_{f,7d} \quad (3)$$

$$R_{C,LP} = 1,8 \text{ a } 2,0 R_{C,7d} \quad (4)$$

$$R_{ti,90d} = 0,1 R_{C,90d} = 0,15 R_{C,7d} \quad (5)$$

$$R_{f,LP} = \frac{1}{0,442802 + \frac{2,822844}{R_{C,7d}}} \quad (6)$$

siendo R_C la resistencia a compresión, R_{ti} la resistencia a tracción indirecta y R_f la resistencia a flexotracción, siempre a la edad indicada (7d= 7 días, 90d= 90 días, LP= largo plazo).

En la mencionada tesis se determinó la ley de fatiga del material reciclado con cemento, que responde a la expresión:

$$\frac{\sigma}{R_f} = 1 - 0,058 \cdot \log N \quad (7)$$

en la que σ es la tensión a flexotracción que provoca la rotura después de un número N de aplicaciones de carga tipo; y R_f la resistencia a flexotracción a largo plazo del material (que en el reciclado estudiado en la tesis ha resultado ser 0,69 MPa).

Figura 5. Propuesta de secciones de firme reciclado con cemento [6]

Explanada	Categoría de tráfico pesado (IMDp)								
	T00	T0	T1	T21	T22	T31	T32	T41	T42
	≥ 4000	3999 a 2000	1999 a 800	799 a 400	399 a 200	199 a 100	99 a 50	49 a 25	24 a 0
De calidad contrastada CBR>12 MPa									
De baja calidad CBR>5 MPa	a	a							

(*) Esta capa puede ser sustituida por un doble tratamiento superficial

■ Mezcla bituminosa ■ Reciclado in situ con cemento



Figura 6. Rodillo compactando el carril reciclado de vehículos pesados de una autovía

La menor pendiente de la ley de fatiga y el módulo más reducido del material reciclado respecto de otras mezclas con cemento, aseguran un mejor comportamiento a fatiga, con una mayor deformación elástica recuperable debido al conjunto de finos que forman el mortero bituminoso. No obstante, al igual que en los materiales tratados con cemento, pequeñas disminuciones del espesor de la capa incrementan la relación σ/R_f y suponen importantes reducciones de la vida en servicio del firme.

En base a los estudios efectuados, Díaz Minguela propone un catálogo de secciones de firme reciclado con cemento, cuyos espesores varían en función de la calidad de la explanada y que prácticamente coinciden con las secciones normalizadas en la Comunidad Autónoma de Castilla y León (ver Figura 5).

Aunque para completar el cuadro se incluyen secciones con reciclado para categorías de tráfico T00 y T0 (más de 2000 vehículos pesados/carril/día) con gruesas capas bituminosas de cobertura, el proceso lógico que se realiza en España en estos casos consiste en fresar algunas de las capas bituminosas existentes, reciclar con cemento las capas inferiores (que suelen ser materiales granulares, suelocemento o gravacemento, en ocasiones con parte de capas bituminosas) y reponer las capas bituminosas retiradas empleando para ello el material fresado que es reciclado en caliente en central. Esta solución, de la que se disponen más de 10 años de experiencia, se está llevando a cabo en la rehabilitación de los carriles para tráfico pesado de muchas autovías y autopistas españolas.

Además del diseño expuesto, para realizar el reciclado *in situ* con cemento de la carretera primero hay que recoger información de la misma (espesor de las capas, ensanches realizados, tráfico, etc.), realizar una inspección visual del pavimento existente, obtener muestras en el espesor que está previsto tratar (extracción de testigos y realización de calicatas) y estudiar la fórmula de trabajo, que se deberá corroborar en el tramo de prueba. En los siguientes apartados se tratan estos temas, de aplicación en cualquier tipo de reciclado.

3.2. Reciclado *in situ* con emulsión

Como en todas las tecnologías innovadoras, el marco normativo se suele quedar desfasado de los avances tecnológicos y de la realidad en las obras. Así, desde el año 1997 se ha trabajado sin normativa alguna, a excepción de la "Guía para el dimensionamiento de firmes reciclados *in situ* en frío" [7] (de carácter informativo); y no es hasta el año 2002 en el que se publica la primera normativa sobre reciclado de firmes [5]. La normativa española vigente sobre reciclado *in situ* con emulsión, a nivel estatal, queda recogida en el artículo 20 del Pliego PG4 [5], y en la norma 6.3-IC, de Rehabilitación de firmes [2]. En las Comunidades Autónomas de Andalucía y Castilla y León son la "Instrucción para el Diseño de Firmes" [8] y las "Recomendaciones de proyecto y construcción de firmes y pavimentos" [4] las que contemplan las operaciones de reciclado en frío; y se encuentran en la misma línea de prescripciones que la normativa estatal, si bien contemplan otros tipos adicionales de reciclado en función de los espesores. Y es que, sin duda, algo está cambiando desde hace unos años en todas las Administraciones, tanto nacionales, como europeas, donde se impone la construcción sostenible de infraestructuras del transporte, garantizando, además, una buena ejecución. Desde un punto de vista normativo, dentro del continente europeo podemos encontrar guías técnicas sobre esta técnica como, por ejemplo, en Francia [9], Italia o Suecia, por mencionar alguna de ellas.

A la hora de abordar la rehabilitación de una carretera agotada existen muchas posibilidades. Sin embargo hay dos cuestiones claves que siempre se deben plantear:

- ¿Qué ha fallado en la carretera?
- ¿Qué quiere el Gestor de la misma?

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

Las opciones de rehabilitación tradicionales son el refuerzo convencional y el fresado seguido de reposición (y normalmente, también de refuerzo). Además se puede plantear la solución de una o varias capas de refuerzo posterior al reciclado, dependiendo de las condiciones del tráfico o de las deflexiones obtenidas. Sin embargo, presenta, como cualquier otra técnica, algunas limitaciones entre las que se pueden señalar las siguientes:

- No todos los materiales son susceptibles de ser reciclados de forma efectiva y económica. Cualquier operación de reciclado, al igual que cualquier otra técnica de conservación, requiere un estudio previo de las secciones y de los materiales.
- El reciclado no permite solucionar algunos tipos de problema habituales en los firmes, como los asociados a mala

calidad de la explanada o de capas profundas. Tampoco es fácil solucionar problemas de deformaciones plásticas; si es posible, suele requerir el empleo adicional de árido para corregir la granulometría de la mezcla existente.

- Si el firme que se pretende rehabilitar es muy heterogéneo, en cuanto al espesor y tipo de las mezclas que componen el paquete bituminoso, el reciclado *in situ* con emulsión puede no estar recomendado: porque debería realizarse según una tramificación muy compleja y cada tramo necesitaría una fórmula de trabajo diferente o, en el mejor de los casos, cambiar solamente el espesor de la capa reciclada, con lo que cualquier otra solución de rehabilitación del firme resulta más competitiva técnica y económicamente. Este es el caso del reciclado en ciudades donde, además, existen tapas de registro y canalizaciones subterráneas (en ocasiones rellenas con hormigón hasta muy pocos centímetros de la cota de rasante) que imposibilitan esta solución.
- Tampoco es recomendable reciclar pavimentos que contengan geotextiles, porque su disgregación es complicada y pueden aparecer trozos de geotextil en la superficie que se desprenderán muy fácilmente. Además, suelen estar impregnados con altas dotaciones de betún modificado, con lo que el ligante que compone las capas a reciclar se encuentra distribuido heterogéneamente en el espesor a tratar.

El dimensionamiento de cualquier estructura, y en particular, de los firmes, es siempre complejo. Esta afirmación es especialmente válida en el caso de las secciones recicladas, ya que en muchos casos no se conoce con exactitud la composición del firme a tratar en toda la extensión del tramo, por lo que es muy común encontrar zonas poco homogéneas.

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

Otra posibilidad es utilizar un procedimiento analítico de cálculo. Generalmente se utilizan los modelos de respuesta basados en el modelo elástico multicapa, complementado con un análisis del comportamiento a fatiga de la estructura. La dificultad principal radica en la determinación de los módulos de cada capa y de las correspondientes leyes de fatiga. Las determinaciones de módulo dinámico en capas de reciclado con emulsión suelen realizarse con equipo Cooper y mediante el ensayo de tracción indirecta. Es frecuente admitir un módulo (que está del lado de la seguridad) de 2500 MPa. Sin embargo, este módulo



Figura 7. Reciclado de una carretera local

penaliza mucho el comportamiento de la capa reciclada. De la experiencia se desprende que los módulos alcanzados con este tipo de mezclas evolucionan con el tiempo, pudiendo llegar sin problemas a los 4000 MPa [10 y 11].

Cuando se recurre a secciones-tipo las principales consideraciones que se tienen en cuenta son las siguientes [2]:

- Asignar un coeficiente de equivalencia al material reciclado respecto a una mezcla.
- Para tráficos T1 el material reciclado se debe recrecer con al menos 8 cm de mezclas bituminosas.
- Para tráficos de categoría inferior a T1 se requiere la aplicación de una mezcla bituminosa densa o semi-densa (para tráficos T4 la experiencia demuestra que la aplicación sobre el reciclado de una lechada bituminosa o de riegos con gravilla es suficiente).

Para un dimensionamiento correcto del firme (tanto por el método de secciones tipo como por un método analítico) es necesario disponer de datos de deflexiones del firme y la sección real del firme. La sistemática descrita a continuación tiene lugar una vez que se ha determinado que la mejor opción de rehabilitación para la vía es un reciclado en frío con emulsión. Antes de llevarla a cabo es conveniente conocer el período de proyecto, el tráfico, el historial del firme a reciclar, la geometría actual y futura de la vía, la posibilidad de una aportación de materiales, el nivel de propiedades funcionales esperado, el presupuesto para la ejecución de los trabajos y la posterior conservación de la vía, el comportamiento del pavimento actual, la capa o capas a situar sobre el reciclado, la disponibilidad de materiales y equipos y, por último, la época en la que se ejecutarán los trabajos.

3.2.1. Reconocimiento del firme

Primero se necesita llevar a cabo una inspección visual del pavimento existente (para cualquier tipo de reciclado), por parte de personas expertas, tomando nota de lo siguiente:

- Tipo, gravedad y tramificación de los deterioros, distinguiendo entre los superficiales, los estructurales localizados y los estructurales generalizados.



Figura 8. Pavimento antes y después de reciclar con emulsión

- Zonas localizadas con deterioros que puedan necesitar un tratamiento específico.
- Problemas relacionados con la presencia de bordillos, arquetas, obras de fábrica, estructuras y accesos.
- Problemas relacionados con el drenaje.
- Trazado de la vía y relieve del terreno.
- Zonas donde se puedan estacionar los equipos de construcción.

Después, la fase de toma de muestras (extracción de testigos, de realización de calicatas o de obtención de material fresado, etc.) es crítica, no sólo desde el punto de vista del reconocimiento de la sección del firme a reciclar, sino como paso previo para establecer la estrategia

de tramitaciones más adecuada para la ejecución de las obras.

3.2.2. Fórmula de trabajo

Las muestras obtenidas se ensayan en laboratorio a fin de definir las características de los materiales a reciclar en cuanto a granulometría del fresado, contenido de betún y características del mismo. Es crítico obtener muestras representativas del pavimento a reciclar, tanto en homogeneidad de los materiales como en similitud respecto al tamaño de fresado obtenido durante el proceso de reciclado.

Tabla 3. Husos granulométricos para reciclados *in situ* con emulsión [5]

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

Tabla 4. Valores mínimos de resistencias en inmersión-compresión (NLT-162) [12]

Categoría del tráfico pesado	En seco (MPa)	Tras inmersión (MPa)	Conservada (%)
T1 (sólo capas de base) y T2	3	2,5	75
T3, T4 y arcenes	2,5	2	70

Tabla 5. Ejemplo de secciones de firmes existentes en calzadas recicladas con cemento

Carretera	N-431	N-630 (Ruta de la plata)	AV-902	SG-241
Provincia	Huelva	Varias	Ávila	Segovia
Tipo de firme	semirrígido	semiflexible	flexible	flexible
Sección tipo	10-15 cm MBC 18 cm ZA 15 cm ZN	2,5-9 cm MBF 11-20 cm MBC 25 cm ZA o macadam	5 cm MBC 30 cm macadam	TS 15 cm macadam

MBC = mezcla bituminosa en caliente

MBF = mezcla bituminosa en frío

TS = tratamiento superficial

ZA = zahorra artificial (material granular machacado)

ZN = zahorra natural (material granular)

Rutas Técnica

La emulsión para reciclado en frío debe cumplir los siguientes requerimientos básicos:

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

Las emulsiones que se utilizan en los reciclados son ca-tiónicas y de rotura lenta para, entre otros motivos, permitir la manejabilidad de la mezcla hasta el momento de la compactación. Para mejorar la cohesión inicial de la mezcla es muy común el uso de cemento en pequeñas cantidades. El papel que desempeña es triple:

- modifica bruscamente el pH de la fase acuosa, provocando el inicio de la rotura de la emulsión y facilitando la toma de cohesión inicial;
- añade un material con alta capacidad de absorción de agua, reduciendo la consistencia final de la mezcla y obteniendo altas resistencias conservadas; y
- mejora la susceptibilidad a la acción del agua.

Finalmente, el contenido de agua total (determinado por la fórmula de trabajo) se obtiene de la suma de la humedad natural de los áridos, del agua emulsionante y del agua de aportación para lograr una correcta envuelta árido-ligante.

3.2.3. Diseño de la fórmula de proyecto

La fórmula de proyecto es la indicación básica para el Director de la Obra. Para su determinación es fundamental que los materiales utilizados sean lo más representativos posibles, no sólo respecto de su procedencia sino también del proceso de fresado al que van a ser sometidos. Para conocer con exactitud qué efecto va a tener el fresado en las características de los materiales sobre los que va a actuar (disgregación de los que presenten cohesión, degradación de los materiales, etc.) es muy conveniente, antes de iniciar la obra, realizar unos tramos de prueba con el equipo que se vaya a utilizar.

Sobre los requisitos exigidos en el Pliego español [5] a los materiales reciclados merece la pena hacer algunos comentarios. A nivel de material fresado, se establecen unos husos granulométricos (Tabla 3) cuyo cumplimiento no es crítico siempre que se tengan las siguientes precauciones:

- Que las granulometrías resultantes sean continuas y tengan suficiente cantidad de fresado en los tamices inferiores a 4-8 mm.
- Que no haya excesivo rechazo por el tamiz de 25 mm. En este sentido, la experiencia demuestra que en carreteras muy fatigadas, si el reciclado es de menor espesor



Figura 9. Reciclado *in situ* con cemento manteniendo el paso del tráfico

(tipo RE2) el fresado es más grueso que cuando se realiza a mayor profundidad. La razón de este fenómeno hay que atribuirlo al despegue entre capas de mezcla bituminosa, fenómeno muy habitual en las carreteras con fatiga pronunciada.

Un segundo aspecto a tener en cuenta con las fórmulas de trabajo es que el cumplimiento de los criterios de resistencia a compresión de la Tabla 4 no siempre garantiza un buen comportamiento del reciclado. La razón de esta falta de "fiabilidad" del ensayo radica en que las densidades obtenidas en el mismo son muy superiores a las obtenidas en obra. Por esta razón, tal vez, sería necesario en futuras actualizaciones de las normas buscar condiciones de ensayo más próximas a la realidad.

4. Características técnicas de los tramos reciclados

Debido al elevado número de carreteras recicladas en España, superior a 400 tramos, las características de éstos son de lo más variadas [13 y 14], tanto en lo que a tráfico soportados, tipologías de secciones y anchuras de la sección transversal se refiere.

El tráfico que circula por las carreteras recicladas con cemento varía desde las categorías más pesadas (de más de 1000 camiones/carril/día), como los tramos de la carretera N 630, Ruta de la Plata o los carriles para vehículos pesados reciclados en varias autovías, hasta las categorías más ligeras, como muchos de los tramos realizados en la provincia de Palencia, con intensidades de tráfico inferiores a 25 camiones/carril/día. El ancho de reciclado es también muy variable, dependiendo lógicamente de la categoría de la carretera, con secciones transversales que van desde 10 m hasta los 4,5 m de las carreteras secundarias (lo que permite realizar el reciclado con solo dos franjas de trabajo) e incluso los 3,5 m que se reciclan del carril para vehículos pesados en las autovías.



Figura 10. Reciclado de una carretera

De manera general, y sobre todo en las carreteras de tráfico reducido, los materiales reciclados suelen ser mezclas bituminosas o, en el caso de reciclado con cemento, estas mezclas o tratamientos superficiales junto con las capas granulares de base. En el caso de rehabilitación del carril para vehículos pesados de las autovías, el material reciclado suele ser una capa de mezcla bituminosa y la capa de base granular o de suelocemento (se fresan previamente las demás capas bituminosas).

Al comienzo de la técnica de reciclado con cemento la ausencia de un catálogo de secciones y de una normativa al respecto se solucionó mediante el empleo de métodos analíticos de dimensionamiento adaptados a cada caso concreto, lo que dio como resultado una gran diversidad de soluciones, con espesores de reciclado variables entre 20 y 35 cm, y espesores de mezclas bituminosas comprendidos entre 5 y 16 cm. La tendencia actual es proyectar con las secciones expuestas en el apartado 3.

En algunas obras de reciclado se ha efectuado la aportación de una arena o de un material granular como corrector granulométrico, como por ejemplo en secciones con una base de macadam sin recebar y con una granulometría muy discontinua. En otras ocasiones, esta aportación de material sobre la carretera deteriorada se ha utilizado para mejorar la rasante, obtener el peralte de las curvas o lograr el espesor de firme suficiente para reciclar.

En cuanto a la maquinaria utilizada, ésta ha sido muy diversa durante los primeros años de experiencia (equipo francés ARC-700, Caterpillar RM-350, Wirtgen 2000 DC junto con un mezclador Raco-250 y Wirtgen 2100 DCR); pero finalmente se ha impuesto el empleo de las recicladoras WR 2500 de Wirtgen, de las que se dispone un elevado número en nuestro país. La tipología de equipos utilizados para la distribución del conglomerante (cemento) ha sido también muy variada, habiéndose impuesto con el tiempo el empleo de distribuidores de lechada (el modelo más común es el Wirtgen WM 1000), por ser más precisa la dosificación de conglomerante en comparación con la dosi-



Figura 11. Nivelación de una carretera reciclada

ficación en polvo, sin tener las limitaciones de ejecución y de seguridad de estos últimos.

En el caso de reciclado con cemento el equipo de compactación suele estar formado por un único rodillo mixto de unas 16-20 t de peso total y una carga estática sobre generatriz de 0,5 kN/cm o superior, aunque en algunas obras se utilizan dos equipos: un rodillo tándem vibratorio y un rodillo de neumáticos de unas 20-25 t (>3 t por rueda). El rodillo mixto o tándem da una o dos pasadas detrás del equipo de reciclado, realizándose posteriormente la pre-fisuración del material (realización de juntas en fresco) si se considera necesaria, y un refino con motoniveladora para lograr una regularidad superficial aceptable. Posteriormente, se termina el proceso de compactación con 3-4 pasadas dobles con el mismo rodillo, u otro menos pesado, hasta alcanzar la densidad prescrita (por lo general superior al 97 % de la densidad máxima obtenida en el ensayo Proctor modificado según norma UNE-EN 13286-2).

La formación de juntas en fresco para controlar la reflexión de fisuras en la superficie se suele realizar en zonas en las que existen fuertes gradientes térmicos, se ha diseñado un reciclado con un elevado contenido de cemento o existe una alta intensidad de tráfico pesado. En los restantes casos (zonas costeras o vías con IMDP inferior a 200 camiones/carril/día) no se han observado problemas relevantes por reflexión de fisuras.

Los rendimientos medios obtenidos llegan hasta los 8000 m² por día (unos 900 m²/h), alcanzando rendimientos máximos de 1500 m²/h, aunque estos valores se reducen a medias de 5000 m²/día cuando la planificación de la obra se complica por la necesidad de mantener el tráfico circulante, hay problemas con el suministro o la anchura de la calzada obliga a muchas franjas solapadas y, por tanto, a muchas maniobras de los equipos.

Muchos de los reciclados con cemento de carreteras de baja intensidad de tráfico se han llevado a cabo sin tráfico, desviando el mismo por otras rutas alternativas; pero también hay un gran número de casos en los que el reciclado

Rutas Técnica

se ha realizado por franjas, dando paso inmediato al tráfico o permitiendo su circulación. 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 la puesta en obra de la capa superior de mezcla bituminosa es muy variable de unas obras a otras, pudiendo transcurrir de 1 a 2 semanas, en el caso de los reciclados con cemento, hasta los 3 ó 4 meses en casos extremos de reciclados con emulsión bituminosa.

5. Comportamiento de las carreteras recicladas

Tras 23 años de experiencia en el reciclado de carreteras con cemento en España se puede afirmar que su comportamiento estructural es muy bueno. Si la primera carretera reciclada con cemento fue una carretera nacional de elevado tráfico pesado (más de 600 camiones/carril/día), las siguientes fueron carreteras secundarias de tráfico reducido (50 a 100 camiones/carril/día), obteniéndose en ambos casos muy buenos resultados. No obstante, los reducidos espesores de las capas bituminosas de rodadura (5 cm) utilizados en los primeros reciclados, obligaron a disponer refuerzos posteriores.

En la actualidad, el empleo de secciones recicladas con cemento que responden al catálogo expuesto, con espesores reciclados entre 25 y 35 cm y coberturas bituminosas de 5 a 16 cm de espesor, hace que las carreteras recicladas estén teniendo un magnífico comportamiento. Este buen resultado ha permitido que esta técnica se difunda por todo el territorio nacional, reciclando carreteras de todo tipo y categoría. Así, se han reciclado carreteras de elevado tráfico pesado, como un tramo de la Ruta de la Plata o un gran número de actuaciones en carreteras de baja intensidad de tráfico, al resultar una solución óptima para rehabilitar este tipo de carreteras con un coste muy reducido (entre 40 000 y 80 000 €/km según el ancho de la calzada).

Es en las vías secundarias deterioradas donde el reciclado con cemento se ha revelado como una solución óptima, con espesores de reciclado de 25-30 cm y capas bituminosas de 8-10 cm de espesor. Cabe destacar situaciones excepcionales de zonas que transcurren sobre terrenos arcillosos en las que el buen comportamiento ha logrado que esta técnica se afiance en la región: como en el caso de la provincia de Palencia, donde la mayoría de las carreteras rehabilitadas lo han sido mediante el reciclado con cemento aportando en ocasiones una pequeña capa de suelo granular limpio sobre la carretera, para lograr el espesor necesario de reciclado y no afectar a las capas inferiores de suelos arcillosos que contaminarían el material reciclado.

En cuanto a las necesidades de prefisurar la capa reciclada con cemento, se considera la alternativa no normalizada en España de realizar juntas en fresco en los casos citados de zonas de interior o de montaña en los que se



Figura 12. Recicladora con regla de compactación

dan fuertes gradientes térmicos (tanto estivales, como día-noche) en los que además existe una alta intensidad de tráfico pesado (más de 200 camiones/carril/día). En estos casos, se disponen al menos dos capas de cubierta bituminosa. En una carretera de baja intensidad de tráfico que se ha prefisurado experimentalmente y cubierto con solo 4 cm de mezcla bituminosa, las fisuras han aparecido reflejadas en la superficie pero no han sufrido ninguna evolución, ni deterioro de los bordes, ni entrada de agua que provoque otros defectos: por lo que la carretera permanece en perfecto estado estructural tras más de 21 años en servicio.

Además del éxito de todas estas experiencias de reciclado de firmes con cemento, se ha logrado un elevado conocimiento de la técnica basado en la innovación y el estudio de la tecnología, cuyo conocimiento se ha transmitido a través de un gran número de jornadas técnicas y simposios que han contribuido a su difusión. En general, el comportamiento se puede calificar de muy bueno. Los defectos que se han ido eliminando se debieron en su día a intentar ampliar el ancho de calzada reciclando los bordes con materia vegetal o plástica que contaminaba el reciclado (actualmente se realiza un cajeo, se rellena con material granular y se recicla todo el conjunto, calzada existente más ensanche) o a irregularidades en la rasante cuando se intentaba realizar a posteriori con la motoniveladora (ya hace años que se recupera la rasante y peraltes con material granular sobre la calzada antes de reciclar). La técnica resulta sencilla y el personal, si es profesional, se adapta fácilmente adquiriendo destreza. A las citadas ventajas técnicas y económicas se suman las ambientales, que han logrado que el reciclado de firmes con cemento sea una aplicación contrastada y muy utilizada en España.

En el caso de los reciclados con emulsión la técnica ha ido evolucionando también desde sus inicios, en base a la experiencia obtenida con su utilización. De esta manera, al principio se utilizaban emulsiones de betún blando con el objeto de obtener un ligante final con una penetración intermedia entre la del nuevo ligante y la del envejecido, y



Figura 13. Carretera local empleada para sacar la madera reciclada con cemento

que fuese similar a la penetración de un betún nuevo de los habitualmente utilizados en España para las carreteras. En la actualidad, la experiencia y los análisis efectuados han demostrado que el éxito del reciclado radica en la cohesión del material, y ésta no sólo depende del grado de penetración del betún [10 y 15]. En muchos casos la incorporación de una emulsión no permite disminuir suficientemente la susceptibilidad al agua de la mezcla, y la resistencia conservada suele ser inferior a los valores fijados por las normas. La incorporación de una pequeña cantidad de cemento (0,5-1 % en peso) permite disminuir el contenido de agua de la mezcla y, por lo tanto, aumentar su densidad. La resistencia en seco no aumenta pero la resistencia después de inmersión sí lo hace [10].

El dimensionamiento de firmes considera como hipótesis de trabajo que las diversas capas del firme se encuentran adheridas entre sí. Durante bastantes años no existían evidencias científicas de tal sentido, pero en el Proyecto SCORE [16 y 17] se ha constatado de la validez de esta premisa.

Según la normativa en vigor los espesores recomendados para reciclar *in situ* con emulsión están en el rango 6-12 cm. Desde un punto de vista práctico los espesores pequeños se han mostrado más críticos en las obras, aunque *a priori* parecen más sencillos debido a su teórica mayor facilidad de compactación. La razón de estos problemas radica en el tamaño especialmente grueso de los fresados realizados en firmes muy fisurados. La conclusión obtenida es que los mejores resultados se alcanzan al reciclar en el rango 8-12 cm. En todos los casos, ante la dificultad práctica de obtener muestras del pavimento representativas de las granulometrías que se obtendrán en la obra, se debe realizar un tramo de prueba para determinar el plan de compactación.

En relación a la maquinaria utilizada no ha habido mejoras muy substanciales, aunque sí una especialización de los equipos. En un principio se utilizaron tanto máquinas con regla de compactación incorporada como las que no la llevaban. En los últimos años, el uso de los equipos con regla de compactación es la tónica predominante debido a su mejor calidad de acabado y prestaciones del material reciclado.

Desde un punto de vista técnico, los 16 años de experiencia acumulados arrojan un balance francamente positivo, siendo las perspectivas de esta tecnología muy halagüeñas. A este futuro prometedor contribuye decididamente el esfuerzo inversor que algunas empresas y administraciones han realizado en la investigación y desarrollo.

6. Costes

El coste de un reciclado del firme depende de varios factores como son:

- El volumen de material a reciclar y en particular del espesor (a mayor espesor menor rendimiento) y de la superficie (tanto de la forma, pues formas irregulares incrementan el número de maniobras de los equipos y reducen el rendimiento, como del tamaño, pues cuanto mayor sea menor serán los costes fijos por metro cuadrado y el transporte de equipos).
- Las características del firme a reciclar, en cuanto a su nivel de disgregación y dureza, que serán determinantes en el rendimiento de los equipos y en su desgaste.
- El porcentaje de emulsión o cemento, que tiene un doble efecto por el coste del mismo y porque a mayor porcentaje menor rendimiento y mayor número de paradas para cargar el ligante/conglomerante. Por ejem-

plo, en el reciclado con cemento una carga completa del dosificador de lechada puede durar alrededor de media hora, lo que puede suponer 2-3 horas sin reciclar en una jornada de trabajo.

Por supuesto, influyen también los equipos de reciclado utilizados; pero tomando un equipo de tipo medio para calcular un coste orientativo obtenemos, en el caso del reciclado con cemento (rendimiento medio de 5000 m²/día y un coste de cemento en obra de 90 €/t) un valor comprendido entre 2,3 a 3 €/m² (según dosificación) para espesores de reciclado de 20 cm, y de 2,80 a 3,80 €/m² para espesores de 25 cm. Para los reciclados *in situ* con emulsión, los costes se encuentran entre 2,75 y 4 €/m² para espesores de reciclado de 8 a 12 cm.

En cuanto a la comparación de una solución con reciclado frente a otra consistente en el fresado y reposición de los materiales agotados, los ahorros pueden ser muy importantes, dependiendo del nivel de agotamiento de la carretera, pudiendo variar entre un 10 y un 20%, multiplicando en algunos casos por 100 el número de solicitudes que puede soportar la solución final hasta que se produce su fatiga.

7. Conclusiones

El uso más eficiente de los recursos y el respeto del medio ambiente son logros sociales que forman parte de nuestra vida cotidiana. Poco a poco la idea de cuidar nuestro entorno y responsabilizarnos con el uso de los recursos ha calado de forma profunda en nuestra sociedad. En este escenario, la carretera se presenta como un patrimonio que es preciso cuidar y mantener, y que nos ofrece unos materiales que pueden y deben ser reutilizados de la forma más efectiva posible. No hay que olvidar que la red de carreteras es el mayor recurso de material granular que un país puede tener.

Las distintas técnicas de reciclado son vías técnicas adecuadas para llevar a cabo esta labor. En este artículo se han expuesto las que se realizan *in situ*, y la evolución que han experimentado en un país como España, con un red de más de 665 000 km, desde que comenzaron a utilizarse hace ya más de 23 años. Durante este tiempo se ha adquirido la experiencia suficiente para normalizar las actuaciones, en función de los distintos niveles de tráfico y características del firme existente, y optimizar las características y el funcionamiento de los equipos utilizados en el reciclado.

Los resultados obtenidos han sido, en general, muy satisfactorios, tanto por su comportamiento tras su puesta en servicio, como por los ahorros considerables que ha supuesto su utilización: por lo que el futuro de estas técnicas se presenta alentador y pueden dar respuesta a las necesidades de conservación de una red extensa en un país que parece haber superado definitivamente siete años de crisis económica.

8. REFERENCIAS

- Peña Suárez, J.; Retratamiento con cemento de firmes existentes; IV Jornadas sobre Pavimentos de Hormigón; ATC, IECA, Ministerio de Fomento y Principado de Asturias; Oviedo, 1993.
- Ministerio de Fomento; Instrucción de Carreteras - Norma 6.3 IC Rehabilitación de firmes; ORDEN/FOM/3459/2003, de 28 de noviembre.
- Jofré, C.; Kraemer, C. y Díaz-Minguela, J.; Manual de firmes reciclados *in situ* con cemento; Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA); Madrid, 1999.
- Junta de Castilla y León; Recomendaciones de proyecto y construcción de firmes y pavimentos; Valladolid, 2004.
- Ministerio de Fomento; Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-4 Reciclado de firmes; OC 8/2001, de 28 de diciembre.
- Díaz-Minguela, J.; Tesis doctoral - Estudio del comportamiento de los firmes reciclados *in situ* con cemento; Universidad de Burgos, 2011. <http://dspace.ubu.es:8080/tesis/handle/10259/157>
- PROBISA; Guía para el dimensionamiento de firmes reciclados *in situ* en frío; Madrid, 1998.
- Junta de Andalucía; Instrucción para el diseño de firmes de la Red de Carreteras de Andalucía; OC 1/99.
- SETRA; Retraitement en place á froid des anciennes chaussées ; Bagneux, 2003.
- Eckmann, B. et al; Recyclage à froid des matériaux bitumineux – Études de formulation ; Revue Générale de Routes et de l'Aménagement RGRA 851 ; 2006.
- Brosseaud, Y. et al ; Evaluation en laboratoire des propriétés mécaniques des enrobés bitumineux retraités en place par les techniques à froid ; Revue Générale de Routes et de l'Aménagement RGRA 853 ; 2006.
- CEDEX; NLT-162 Efecto del agua sobre la cohesión de las mezclas bituminosas compactadas (ensayo de inmersión-compresión); Madrid, 1984.
- Díaz-Minguela, J.; The state of the art on site pavement recycling with cement in Spain; 2nd International Symposium on Treatment and Recycling of Materials for Transport Infrastructure; París, 2005.
- TREMTI; Varias comunicaciones; 3er Simposio Internacional de tratamiento y reciclado de materiales en obras de infraestructura de transporte; Antigua (Guatemala), 2009.
- Lancaster, I. M. et al; Régénération du bitume dans le recyclage à froid; Revue Générale de Routes et de l'Aménagement RGRA 848 ; 2006.
- Potti, J.J. ; Le Projet SCORE. Bilan Final ; Revue Générale de Routes et de l'Aménagement RGRA 855 ; 2006.
- Lesueur, D. ; Baena, J.M. et al; Éléments de validation in situ du programme SCORE; Revue Générale de Routes et de l'Aménagement RGRA 854 ; 2006.