

# RECICLADO EN FRÍO IN SITU DE ALTAS PRESTACIONES. EXPERIENCIAS Y RESULTADOS

**ANTONIO PÁEZ DUEÑAS**  
DIRECCIÓN DE TECNOLOGÍA.  
REPSOL. MADRID

**MERCEDES AYALA CANALES**  
DIRECCIÓN DE TECNOLOGÍA.  
REPSOL. MADRID

**JACINTO LUIS GARCÍA SANTIAGO**  
SACYR TECNOLOGÍA. MADRID

**FRANCISCO GUIADO MATEO**  
SACYR TECNOLOGÍA. MADRID



---

# RECICLADO EN FRÍO IN SITU DE ALTAS PRESTACIONES. EXPERIENCIAS Y RESULTADOS

---

## RESUMEN

**E**n los últimos tiempos ha existido un incremento espectacular del reciclado en frío de carreteras agotadas. Sin embargo, uno de los inconvenientes de esta tecnología es su curado lento, que hace necesario dilatar los tiempos antes de la puesta en obra de las capas superiores.

En este trabajo se presenta un nuevo procedimiento que viene a paliar esta limitación. Utilizando emulsiones sobreestabilizadas de rejuvenecedores de base bituminosa y diversos aditivos, es posible disminuir estos tiempos a veinticuatro/ cuarenta y ocho horas. Dichas mezclas desarrollan resistencias elevadas en tiempos muy cortos y sus propiedades finales presentan tanto módulos adecuados como buena resistencia a la fatiga.

Los así productos desarrollados se han validado en dos tramos de autopista en una zona del norte de España.

## INTRODUCCIÓN

El reciclado de los firmes de carreteras es una técnica que se inició en Estados Unidos en los años cincuenta y que ha estado presente en la Península Ibérica desde los años ochenta.

El reciclado de pavimentos envejecidos y su utilización en capas de base presenta las siguientes características:

- Economía de energía y materiales.
- Se consiguen mejoras estructurales o de regularidad manteniendo la rasante.
- Permite la rehabilitación estructural de carriles individuales.
- Conservación medioambiental.

Las primeras obras de esta técnica se realizaron en caliente utilizando tecnología desarrollada por Repsol. Esta Tecnología sufrió una ralentización en su uso debido al reciclado en frío.

El reciclado en frío con emulsión de rejuvenecedores es una técnica más reciente ya que data de principios de los noventa. Actualmente está volviendo la Tecnología en caliente y se están empezando a realizar actuaciones con altas tasas de pavimento envejecido, mientras que en el Reciclado en Frío se está evolucionando hacia sistemas de Altas Prestaciones, en que se alcanza la cohesión en mucho menores tiempos.

Mientras que los reciclados en caliente presentan la limitación de que es necesario su transporte a

central con el encarecimiento consiguiente, los reciclados en frío necesitan un tiempo de curado para alcanzar sus propiedades finales.

En los últimos años se han desarrollado y comercializado sistemas mixtos emulsión/cemento con el objetivo de mejorar las propiedades finales de los reciclados. Sin embargo, no se ha conseguido disminuir apreciablemente los tiempos de curado.

A lo largo de los últimos cinco años, en Repsol se han investigado sistemas de mezclas en frío que pudieran acercar el comportamiento de las mezclas en frío al de las mezclas en caliente:

- Módulos suficientemente altos.
- Buen comportamiento a la fatiga.
- Propiedades finales en tiempos suficientemente bajos.

Fruto de esas investigaciones se descubrieron unos aditivos que, añadidos al sistema, permitan unos tiempos de curado relativamente cortos.

El descubrimiento realizado puede ser aplicado a cualquier tipo de mezclas bituminosas en frío.

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos con la aplicación del sistema emulsión de rejuvenecedor/cemento aditivo descubierto..

### SISTEMA EN FRÍO. TEORÍA

Como se ha dicho anteriormente, el sistema está constituido por una emulsión de rejuvenecedor, cemento y una aditivo que acelera el curado del cemento.

El cemento se introduce en el sistema para aumentar el módulo de la mezcla. El objetivo final del proceso es que la mezcla reciclada presente módulos cercanos a los de una mezcla bituminosa en caliente, huyendo de módulos cercanos a sistemas hidráulicos. Tanto su naturaleza como el porcentaje se estudian para alcanzar este objetivo.

La emulsión bituminosa provee tanto de parte del agua que hace fraguar el cemento como del ligante bituminoso. El ligante bituminoso tiene el objetivo de dotar a la mezcla final de un buen comportamiento a la fatiga.

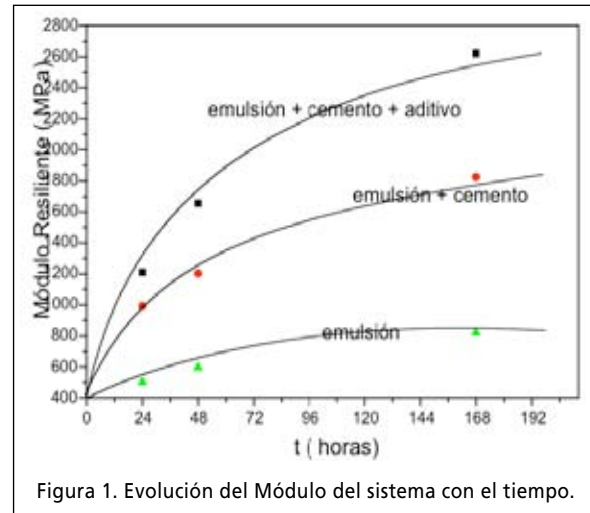


Figura 1. Evolución del Módulo del sistema con el tiempo.

Para cada porcentaje de cemento de la mezcla existe una relación óptima de betún que conduce a un módulo cercano al de las mezclas en caliente. Dependiendo de la relación betún residual/cemento así será el comportamiento a fatiga.

Como ejemplo de lo indicado anteriormente en la siguiente figura se presentan diferentes rectas obtenidas mediante simulación con el programa Alize. Para cada porcentaje de betún de la mezcla existe un óptimo de cemento representado en la figura por X1, X2, X3...

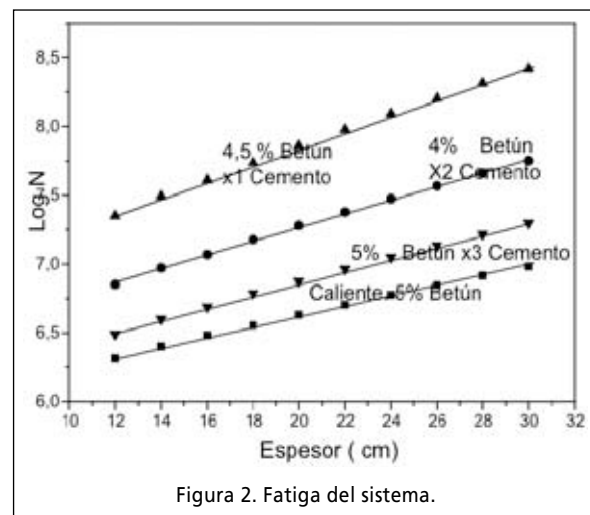


Figura 2. Fatiga del sistema.

Estas rectas permiten interpretar resultados de fatiga de tal forma que para cada espesor existe un número de ciclos teórico en que se alcanza un agotamiento por fatiga.

Como puede observarse, existe un par óptimo betún/cemento donde la fatiga es menor ( en este caso 4,5%, X1). De todas formas en todos los casos, los pares cemento betún residual presentan un mejor comportamiento a fatiga que la mezcla en caliente aunque todas las mezclas tienen el mismo módulo.

El tercer componente que se optimiza es el agua. Es necesario que el sistema tenga suficiente agua para que se realice un 100% de envuelta y se produzca la cristalización del cemento.

Por último, es necesario optimizar el aditivo para que se produzca un curado final de la mezcla en un tiempo razonablemente bajo.

## APLICACIÓN AL RECICLADO

La teoría expuesta en el apartado anterior, puede aplicarse la reciclado en frío con sistemas de curado rápido. El objetivo del tratamiento es poder aplicar una capa de mezcla bituminosa en caliente a las 24-48 horas de haber realizado el reciclado.

Al tratarse de un sistema en frío puede aplicarse la tecnología de Repsol de emulsiones con rejuvenecedores, con lo que se consigue un ahorro importante de materiales.

Un rejuvenecedor es un producto que aporta los componentes que se han perdido del betún como consecuencia de su envejecimiento, devolviéndole sus características originales ( físicas y químicas) perdidas. Se trata de productos hechos a medida de las circunstancias concretas de cada proyecto y de la fórmula de trabajo seleccionada.

El sistema propuesto frente al tradicional de reciclado en caliente presenta una ventaja económica evidente derivada de las siguientes circunstancias:

1. Se realiza in situ con lo que no es necesario transportar el material fresado a una planta para fabricar la mezcla en caliente y el transporte desde la Planta a la Obra de la mezcla regenerada.
2. Se aprovecha todo el material fresado, y no es necesario el aporte de nuevo componente mineral.

Por otro lado, el sistema permite la extensión a las 24-48 horas de la capa superior con lo que se neutraliza la ventaja de la mezcla en caliente.

## Pruebas de puesta en obra

El sistema propuesto se ha probado por primera vez en dos tramos de ensayo de la autopista Aucalsa de la concesionaria Itinere.

Las pruebas se realizaron en Octubre del 2005 y en Julio del 2006.

## COMPORTAMIENTO EN LABORATORIO

### Resultados de la mezcla reciclada.

A partir de los resultados de la extracción se diseñó una emulsión ECL2 fabricada con betún rejuvenecedor. Las propiedades de la emulsión se indican en la Tabla III.

Viscosidad a 25°C SSF	22
Ligante (%)	62
Agua (%)	38
Fluidificante (%)	0
Penetración	285
Anillo y Bola	35
Ductilidad	> 100

Tabla III. Resultados del análisis de la emulsión utilizada.

Con la emulsión desarrollada se fabricaron probetas con las que se realizó la medida del módulo Resi-

liente en función del tiempo utilizando para ello una máquina Nottingham Asphalt Tester. Para realizar el ensayo las probetas se curaron a 20°C con la humedad del laboratorio. Un ejemplo de los resultados obtenidos se recoge en la Figura 3.

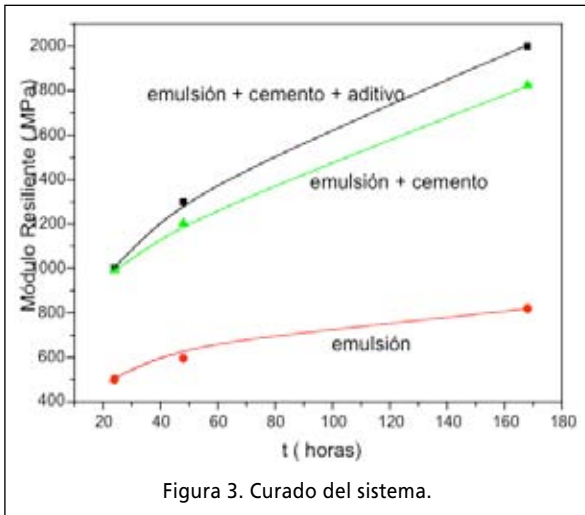


Figura 3. Curado del sistema.

Como puede observarse, tanto las velocidades de curado como las propiedades finales dependen del sistema que se utilice. Mientras que con el sistema reciclado/emulsión se obtienen unos Módulos Resilientes de unos 800 MPa a las 168, con el sistema emulsión/cemento se llega a los 1800 MPa y con el sistema emulsión/cemento/aditivo a los 2400 MPa.

Como se verá posteriormente, con un Módulo Resiliente de unos 1200 MPa el sistema ha alcanzado un nivel de curado suficiente como para que se pueda colocar una capa de mezcla en caliente a las 24 horas.

### Prueba de puesta en obra

#### ESTUDIO SOBRE TEMPERATURAS DE COMPACTACION

Previamente a las pruebas de Puesta en Obra se realizó un estudio en Laboratorio sobre la temperatura mínima de compactación que haga para evitar problemas en servicio por baja compactación. Para ello se fabricaron probetas de reciclado en frío a las temperaturas establecidas (10, 20, 30 y 40 °C) utilizando la prensa giratoria. Con mol-

des de 150±0,1 mm perforados. Las cantidades de mezcla utilizadas eran las precisas para obtener probetas de altura adecuada.

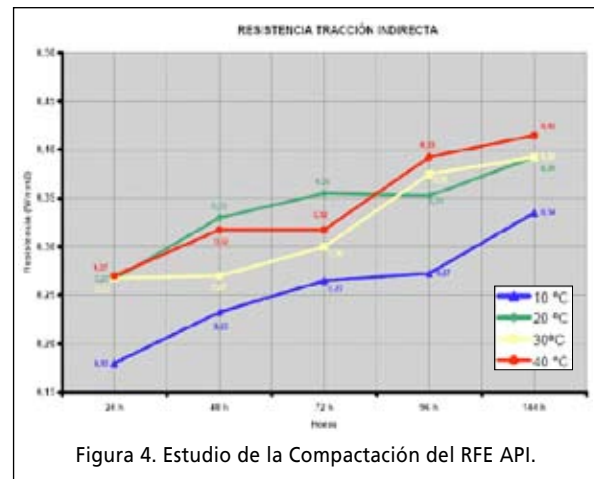


Figura 4. Estudio de la Compactación del RFE API.

En la figura 3 se ha representado la variación de la resistencia a Tracción Indirecta de las probetas en función del tiempo de curado y de la Temperatura. Como puede observarse, es necesario una temperatura mínima de 20°C para poder realizar el reciclado con garantías.

### ACTUACIONES REALIZADAS

En la figura 5 se presenta un esquema de la primera actuación realizada.

Existente	Actuación tramo de prueba
R 1995 4 cms	Fresado normal en 6 cms. Reposición con S20
R 1993 5 cms	Fresado como reciclado 20 cms
MBC Iniciales 13 cms	Resto mb vieja 2 cms
Grava cemento 18 cms	
Suelo cemento 20 cms	

Figura 5. Esquema de la actuación.

Como puede observarse, se trata de un tramo en el que se realizaron sendas actuaciones de refuerzo en 1993 y 1995.

El tramo de ensayo se situó sobre el carril lento y el central, con un anchura de tratamiento del RFE de 7 m y 6 m.



Figura 6. Recicladora Wirtgen 2100 DCR.

Las operaciones se iniciaron con el fresado previo del pavimento y la retirada a zona de acopio de los productos fresados en una profundidad de 6 cms de mbc, en una anchura de 7.40 m. Posteriormente se procedió a realizar el RFE en una profundidad de 14 cms. Tras un día de curado, se procedió a la reposición de la rasante mediante el extendido de 6 cms de mezcla bituminosa en caliente tipo S.20.

A las 22 horas se procedió a sacar testigos, observándose que el corte de la pared era perfecto,



Figura 7. Perforación de testigo a las 22 horas.

sin arrancamiento del árido en toda la profundidad de la perforación (14 cms). Este resultado cualitativo contrasta con una experiencia dilatada de reciclado en frío con emulsión en que la extracción de testigos, con broca mayor, de 15 cms de diámetro y a las dos semanas, resultó un intento vano, ya que la propia perforación arrancaba, en vez de cortar, el árido de la pared, desmoronando ésta.

Por lo tanto, podemos decir que le sistema permite la colocación de una mezcla en caliente a las 24 horas, algo impensable con los procedimientos en frío de uso actualmente.

### EVOLUCION POSTERIOR

En la figura 7 puede observarse los resultados obtenidos de Módulo Resiliente de Testigos de la segunda actuación tomados al año de realizarse la misma. Como puede observarse, la dispersión es muy grande, típica de testigos tomados en carretera. Lo que sí se observa es que dichos testigos no se correlacionan con la densidad. Los valores de Módulos varían entre 1000 y 6500 MPa.

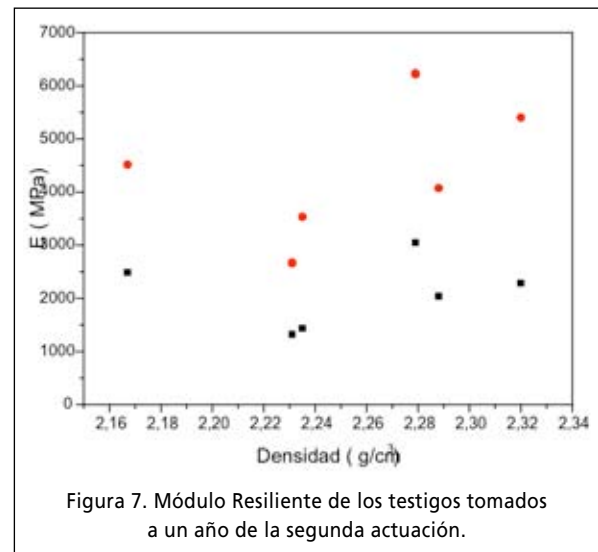


Figura 7. Módulo Resiliente de los testigos tomados a un año de la segunda actuación.

Como puede observarse algunos valores son superiores a 5000 MPa, valores típicos de mezclas en caliente tipo G20 ( los valores suelen variar entre 5000 y 8000 MPa) .



## CONCLUSIONES

1. Se ha desarrollado un sistema en frío emulsión/cemento/aditivo que permite obtener módulos cercanos a los de las mezclas en caliente.
2. Este sistema presenta un comportamiento excelente a la fatiga.
3. De entre las diferentes aplicaciones destaca la del reciclado en frío.
4. Se han realizado dos pruebas de la aplicación del sistema al reciclado en frío han dado excelentes resultados permitiendo la aplicación de una capa superior de mezcla bituminosa en caliente antes de las 24 horas, siempre que la puesta en obra se haya realizado a una temperatura superior a 20°C.
5. En el seguimiento de testigos al año de la puesta en Obra se han encontrado valores típicos de mezclas G20.