

# Procedimiento para el estudio y proyecto del reciclado en frío con emulsión basado en el seguimiento y análisis de diferentes obras.

Ing. Rodrigo Miró Recasens  
Universidad Politécnica de Catalunya  
España.

## INTRODUCCIÓN

La reutilización de los materiales bituminosos procedentes de pavimentos envejecidos no puede considerarse como una técnica nueva en la conservación y rehabilitación de los firmes de carreteras, ya que su empleo, de forma más o menos generalizada, arranca en 1973 como consecuencia de la crisis del petróleo. El reciclado en frío in situ como alternativa al fresado y reposición convencional, presenta una serie de ventajas técnicas, económicas y ambientales sobradamente conocidas.

Al restituir la cohesión y la resistencia de las capas asfálticas cuarteadas, fisuradas y envejecidas por el tráfico y los agentes atmosféricos, se transforma una capa de material más o menos suelto, de baja capacidad de soporte, susceptible a la acción del agua, en una capa continua, dotada de un mayor módulo, insensible al agua, que en definitiva mejora considerablemente la capacidad estructural del firme.

Por otra parte, esta técnica permite llevar a cabo la rehabilitación del firme con un menor gasto económico y de recursos naturales. El reutilizar los materiales existentes en el firme para su refuerzo y rehabilitación supone el no usar nuevos áridos y reducir el porcentaje de ligante empleado. Además, no es necesaria la extracción de áridos de graveras, ni la explotación de canteras; se eliminan los vertederos, al no tener que escarificar y retirar parte del firme, y no se produce contaminación por humos ni gases

tóxicos. Es, por tanto, una de las técnicas de conservación de carreteras más respetuosa con el medio ambiente.

Por todo ello, la utilización del reciclado en frío en España ha ido creciendo, especialmente a partir de 1990, siendo el reciclado con emulsión el más extendido, con  $2.4 \cdot 10^6$  m<sup>2</sup> de superficie reciclada hasta la fecha, seguido del reciclado con cemento, con unos  $0.8 \cdot 10^6$  m<sup>2</sup>. Sin embargo, estas mismas actuaciones han puesto de manifiesto ciertos aspectos y limitaciones que impiden que el reciclado en frío pueda considerarse, hoy por hoy, una técnica de rehabilitación desarrollada y

empleo de esta técnica.

En esta ponencia se recogen los resultados de un estudio sobre el reciclado en frío de pavimentos asfálticos, realizado en el Laboratorio de Caminos del Departamento de Infraestructura del Transporte y Territorio de la Universidad Politécnica de Cataluña, a partir del seguimiento de alguna de las actuaciones llevadas a cabo en Cataluña (España).

Con esta base de partida se han analizado, en primer lugar, los problemas que representa la metodología habitualmente utilizada en el diseño de las mezclas

Tabla 1: Resistencias a compresión simple exigidas (Fernández del Campo, 1997)

RESISTENCIA MÍNIMA			
TRÁFICO	EN SECO (kN)	TRAS INMERSIÓN (kN)	CONSERVADA (%)
T0 - T1	18.0	15.0	75
T2	15.0	13.0	75
T3	12.0	10.0	60
T4	9.0	7.5	50

consolidada.

La utilización de criterios de diseño de la mezcla reciclada poco definidos, la ausencia de criterios de control de ejecución así como de especificaciones sobre el producto final, y el desconocimiento de la evolución del comportamiento del material con el tiempo, han rodeado al reciclado en frío de una cierta inseguridad técnica, provocando un cierto recelo por parte de las Administraciones de carreteras frente al

reciclado en frío; y el efecto de la densidad y del tiempo; y de las condiciones de curado sobre la estabilidad y resistencia mecánica de la mezcla. En segundo lugar, se han comparado estos valores con los obtenidos en obra; con el fin de establecer un proceso de dosificación en laboratorio, más afín con las características de la mezcla conseguidas en obra, y definir unos criterios de control sobre el producto final que asegure la calidad del mismo, estableciendo una nueva metodología de diseño y control de la mezcla reciclada,

compatible y complementaria con la actualmente utilizada.

## PROCEDIMIENTO DE DOSIFICACIÓN Y DE CONTROL DE LA MEZCLA RECICLADA.

El procedimiento habitualmente utilizado para la dosificación de la mezcla reciclada

sea igual al contenido de humedad Proctor. Si la envuelta es buena, se fabrican probetas para el ensayo de inmersión-compresión, recogido en la norma española NLT-162/84, variando el porcentaje de emulsión por encima y por debajo del inicialmente fijado, manteniendo constantes los fluidos

Tabla 2: Ensayo de inmersión-compresión (Laboratorio Repsol, 1996)

ENSAYO DE INMERSIÓN - COMPRESIÓN				
% EMULSIÓN	1.5	2.0	2.5	3.0
% AGUA PRE-ENVUELTA	3.13	2.94	2.75	2.56
DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	2.41	2.41	2.42	2.44
Rs (Kp/cm <sup>2</sup> )	40.8	40.2	38.7	35.8
Rh (Kp/cm <sup>2</sup> )	29.2	28.3	29.7	31.3
Rcons (%)	72	70	77	87

está basado en el ensayo Proctor para la determinación de los fluidos óptimos de compactación y en el ensayo de inmersión-compresión para la caracterización mecánica de la mezcla y la selección del contenido de emulsión.

Después de caracterizar el material fresado procedente del pavimento envejecido (granulometrías del material fresado y del árido extraído, porcentaje y características del betún original), se determina el porcentaje óptimo de humedad de compactación mediante el ensayo de compactación Proctor Modificado. A continuación, se realiza un ensayo de envuelta con un porcentaje inicial de emulsión y agua, tal que la suma de ambos

de compactación. Después de mantener las probetas en estufa a 60°C durante 72 horas, se ensayan a compresión simple determinando la resistencia en seco y tras inmersión en agua (1 día a 60°C).

El porcentaje mínimo de emulsión se fija en función de la resistencia a compresión simple, que debe ser superior a 1500 kgf, y de la resistencia conservada, igual o superior al 75%, siendo recomendable no bajar del 2% de betún residual sobre árido aunque la resistencia conservada sea superior al 75%, ya que las posibles diferencias de homogeneidad en el fresado producidas en el transcurso de la obra podrían ocasionar desprendimientos

superficiales en las zonas con mayor cantidad de finos. Aunque se han venido utilizando estos criterios, avalados por la experiencia, no existe ninguna especificación sobre ellos, planteándose en los últimos años diferentes valores en función de la categoría de tráfico, así como exigencias sobre el valor de la resistencia tras inmersión, tabla 1.

En la tabla 2 se recogen los resultados del ensayo de inmersión-compresión que se realizó para determinar el contenido de emulsión a emplear en el reciclado de las capas asfálticas de la Carretera C-147 tramo Sort-Esterri d'Aneu, en la provin. de Lérida. La emulsión seleccionada, tipo ECL-2, estaba fabricada a partir de un betún con rejuvenecedor, de una penetración de 290, fijándose en un 2.75% el contenido de emulsión y en un 2.65% el de agua de pre-envuelta.

El primer problema que se plantea al utilizar este procedimiento es que el porcentaje de emulsión se selecciona sobre un material distinto, mucho más compacto, como se verá más adelante, al que se va a conseguir en obra y que quizá, con los mismos criterios, pero sobre un material más similar al real, podrían obtenerse resultados diferentes.

La densidad real obtenida a partir de testigos, extraídos al mes de la ejecución de la obra, fue de 2.27 g/cm<sup>3</sup>, del orden del 93% de la obtenida en laboratorio sobre las probetas de inmersión-compresión, 2.43 g/cm<sup>3</sup>, cuando se utiliza la compactación estática de 17000 kg especificada en la norma.

Consecuentemente, las propiedades de la mezcla fabricada en laboratorio pueden ser sensiblemente diferentes a las que tendrá la mezcla realmente ejecutada. La figura 1 muestra la variación de las resistencias a compresión de las probetas de mezcla reciclada con la energía de compactación utilizada, observándose que las densidades más similares a las obtenidas en obra (2.27

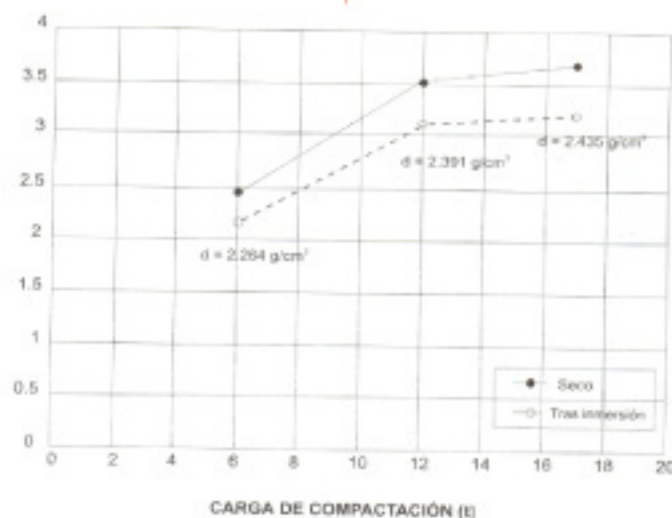


Figura 1. Variación de la resistencia a compresión con la carga de compactación.

$\text{g/cm}^3$  sobre testigos) se alcanzan con la compactación a 6000 kg. Por otra parte, las propiedades mecánicas de la mezcla reciclada, evaluadas sobre probetas fabricadas con esta compactación, son similares a las que realmente alcanza la mezcla puesta en obra, obtenidas a partir

compresión.

Por otra parte, la técnica del reciclado en frío in situ presenta un inconveniente adicional; la dificultad de controlar la densidad en obra. Normalmente se utiliza el aparato nuclear; sin embargo, con este procedimiento, la lectura de la humedad

proceso más o menos difícil en función de las condiciones climáticas, espesor de la capa ejecutada y estado del soporte sobre el que apoya.

A modo de ejemplo, se representa en la figura 4 la evolución con el tiempo de las densidades secas, medidas in situ, en la carretera C-1410, tramo Cardona-Solsona, junto con las obtenidas a partir de los testigos extraídos de la capa reciclada. Así, la densidad seca obtenida in situ varía desde los  $1.860 \text{ g/cm}^3$ , tras finalizar la compactación de la capa, hasta los  $1.942 \text{ g/cm}^3$  a los 40 días, valor aún distante de los  $2.119 \text{ g/cm}^3$  obtenidos sobre testigos extraídos entre 1 y 2 meses después de su ejecución, o de los  $2.280 \text{ g/cm}^3$  de la fórmula de trabajo en este caso.

Además de la densidad alcanzada en la compactación, debe controlarse la ejecución y homogeneidad del producto fresado, puesto que puede influir sobre la compactación y estabilidad de la mezcla reciclada; la calidad de la envuelta, ya que ésta debe realizarse antes de que la emulsión rompa para envolver bien todo el material, y una mala envuelta puede significar una menor cohesión y resistencia de la mezcla fabricada, y la

Tabla 3. Propiedades mecánicas de la mezcla reciclada evaluadas sobre probetas y sobre testigos

PROPIEDAD	PROBETAS 6 t, 3 días, 60°C	TESTIGOS	
		6 meses	18 meses
DENSIDAD ( $\text{g/cm}^3$ )	2.23-2.27	2.27	2.31
MODULO COMPRESION a 10 Hz (MPa)	4606	4553*	5369*
MODULO RESILIENTE a 0.5 Hz (MPa)	5512	3819	5620
RESIST. TRACCION INDIRECTA a 5 °C (MPa)	1.3	1.2	1.4

\* Sobre el conjunto de las capas asfálticas

de los testigos extraídos, tabla 3.

El segundo problema que presenta este procedimiento de dosificación es que la resistencia a compresión se evalúa para un período y condiciones de curado preestablecidos, sin que se conozca al grado de resistencia que se alcanzará tanto inmediatamente después de la ejecución, valor este muy importante ya que la capa de mezcla reciclada se abre al tráfico una vez finalizada la compactación, como al final del período de maduración, una vez eliminado el exceso de agua procedente de

rotura de la emulsión. La figura 2 y 3 ponen de manifiesto que las resistencias obtenidas sobre probetas curadas en estufa a  $60^\circ\text{C}$  durante 3 días, están bastante por encima de las obtenidas a muy corto plazo y bastante por debajo de las obtenidas a más largo plazo cuando las probetas se curan a temperatura ambiente.

Además, las densidades medidas in situ con el equipo nuclear evolucionan con el tiempo a medida que se va perdiendo el agua procedente de la rotura de la emulsión, por evaporación o filtración,

podría no ser fiable, dado que tanto el betún existente en la antigua mezcla como el añadido a través de la emulsión, pueden ser medidos como agua. Por tanto, las densidades secas obtenidas mediante el nuclear serán inferiores a las reales, estando entre el 88 y 90%, según los casos, de las obtenidas a partir de testigos, tabla 4.

En tercer lugar, el ensayo de inmersión-compresión es útil para poner de manifiesto el efecto del agua sobre la mezcla, adhesividad, pero tiene escasa validez para caracterizarla mecánicamente. No es, desde luego, el ensayo más apropiado para determinar la cohesión dúctil y tenaz proporcionada al fresado por la emulsión bituminosa; un aumento del contenido de emulsión suele producir una disminución de la resistencia a

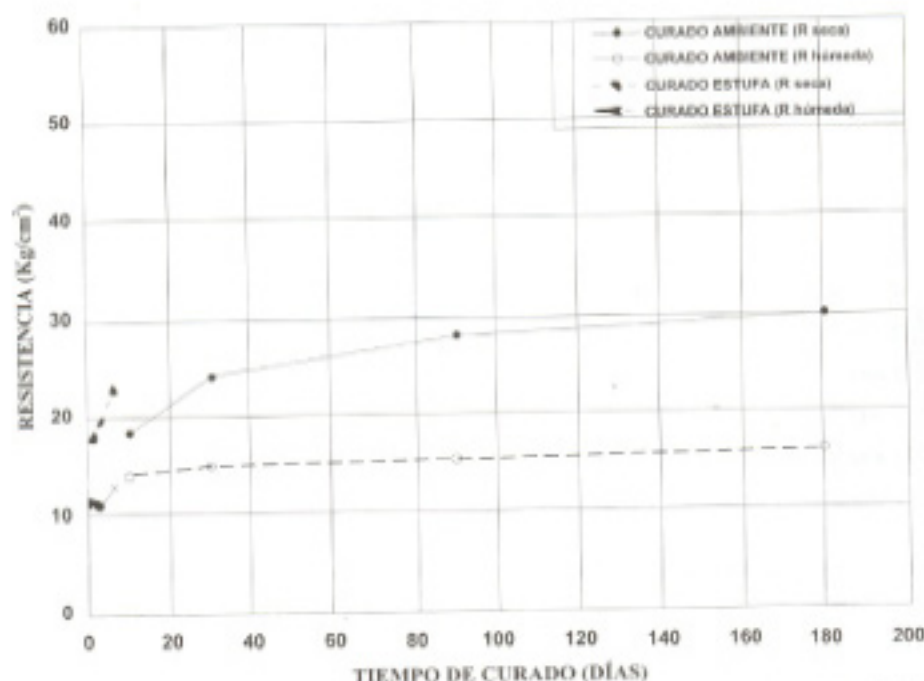


Figura 2. Resistencia a compresión en seco y tras inmersión. Compactación 6 t.

mezcla ejecutada, aunque sobre ésta resulta difícil realizar todo tipo de ensayos dado su baja consistencia y resistencia inicial.

## METODOLOGÍA DE DISEÑO PROPUESTA.

Como ya se indicó anteriormente, el ensayo de compresión presenta ciertos inconvenientes que no lo hacen muy adecuado para la caracterización y dosificación de estas mezclas. En primer lugar, las densidades de las probetas son bastante más altas que las que pueden alcanzarse en obra, tras compactar este tipo de material, y las resistencias a compresión van disminuyendo a medida que se aumenta el porcentaje de emulsión, lo que parece, en cierto sentido, contradictorio, ya que la emulsión es el instrumento que debe cohesionar la mezcla, por lo que cuanto mayor fuera el contenido de emulsión utilizado, la cohesión de la mezcla debería ir aumentando hasta que la cantidad fuera excesiva y provocara un efecto contrario al deseado. En otras palabras, al ir aumentando el porcentaje de emulsión la cohesión de la mezcla irá aumentando hasta un cierto máximo. Por tanto, la resistencia a compresión no parece reflejar esta propiedad.

En segundo lugar, es difícil poder llegar a establecer correlaciones entre la resistencia

a compresión de las probetas fabricadas en laboratorio (de 10 cm de altura) y la del material realmente puesto en obra, ya que, con los espesores que se han venido reciclando, es difícil llegar a obtener que, una vez regularizados, tengan altura suficiente para ensayarlos a compresión. Es decir, es difícil poder conocer el valor real de la resistencia a compresión del producto ejecutado y, consecuentemente, es difícil fijar las condiciones de curado en laboratorio que simulen las condiciones reales durante su vida de servicio. Por estos motivos, se plantea la posibilidad de utilizar un parámetro diferente en el diseño y control de la mezcla reciclada en frío, más relacionado con su

comportamiento, y que pueda conocerse realmente a partir del ensayo de testigos extraídos de la mezcla ejecutada en obra.

A la vista de los resultados anteriormente expuestos, se pensó en la resistencia a tracción indirecta, ya que la determinación de esta propiedad presenta una serie de ventajas: la elaboración de las probetas es muy rápida - hay menos material - y siempre podrá determinarse sobre testigos, por lo que podrán correlacionarse los resultados de laboratorio y obra.

Para validar la utilización de este ensayo en la dosificación de la mezcla reciclada con emulsión, se fabricaron series de probetas con la granulometría media del material fresado procedente de la carretera C-147. En la figura 5 se representa la resistencia a tracción indirecta a 5°C, en seco y tras inmersión en agua, (1 día a 60°C), de probetas fabricadas con diferentes contenidos de emulsión, manteniendo constantes los fluidos de compactación, utilizando una compactación estática de 6000 kg, a 1 y 3 días de curado en estufa a 60°C. En ella puede observarse que a los 3 días de curado acelerado se obtienen, con el 3% de emulsión, unas resistencias iguales a las obtenidas sobre testigos extraídos entre 16 y 18 meses, lo que viene a indicar que este procedimiento es capaz de reproducir el comportamiento real del material puesto en obra, valorando una

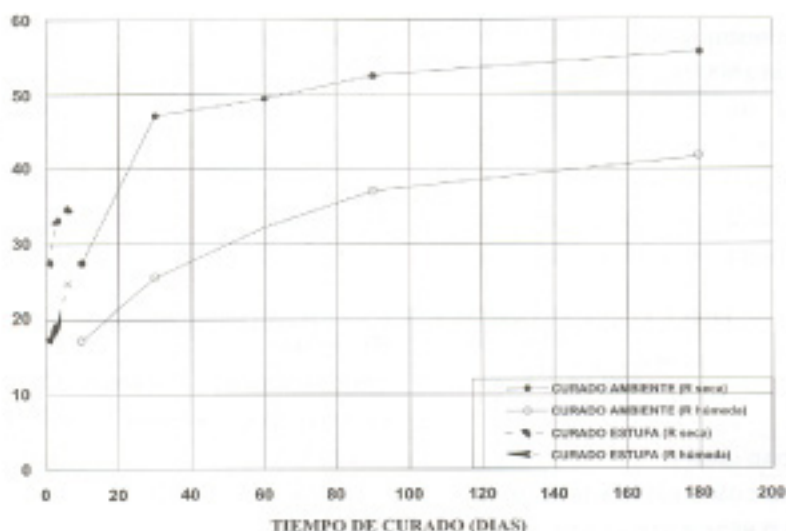


Figura 3. Resistencia a compresión en seco y tras inmersión. Compactación 17 t.

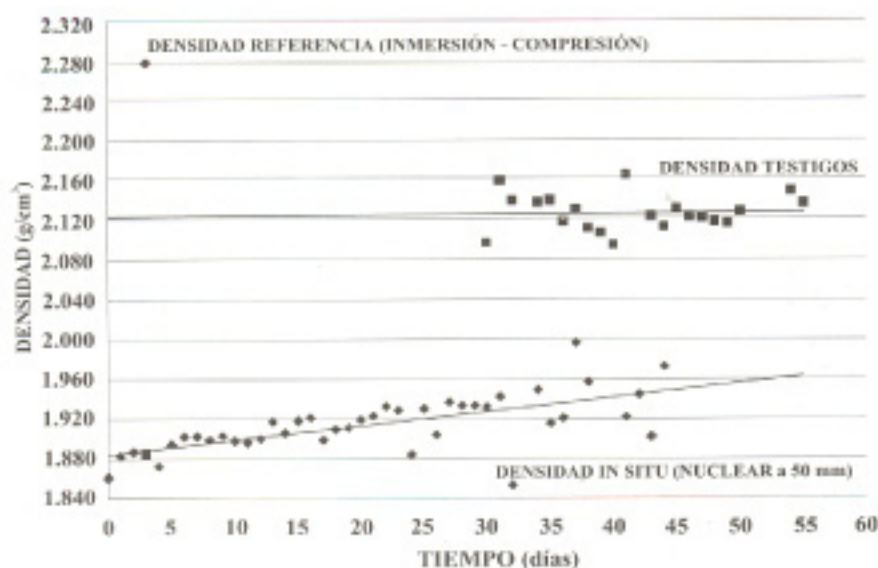


Figura 4. Evolución de las densidades in situ y sobre testigos con el tiempo.

propiedad directamente relacionada con la cohesión de la mezcla. La densidad de estas probetas es de 2.27 g/cm<sup>3</sup>, ligeramente inferior a la de los testigos a esa edad. Por otra parte, la resistencia conservada de las probetas, con ese contenido de emulsión, oscila entre el 77 y 78%.

En base a los resultados obtenidos en las últimas obras de reciclado con emulsión ejecutadas en Cataluña, el porcentaje mínimo de emulsión a utilizar en las mezclas recicladas compactadas estáticamente a 6000 kg, tras 3 días de curado en estufa a 60°C, de 1.0 MPa y una resistencia conservada tras inmersión en agua, 1 día a 60°C, del 75%.

Tabla 4. Densidades obtenidas en distintas obras de reciclado en frío con emulsión

DENSIDADES (g/cm <sup>3</sup> )	OBRA	
	C-147	C-1410
INMERSIÓN - COMPRESIÓN	2.430	2.280
IN SITU (NUCLEAR a 50 mm)	2.024	1.860
TESTIGOS	2.270	2.119
$D_{IN\ SITU}/D_{I-C}$ (%)	83.3	81.6
$D_{TESTIGOS}/D_{I-C}$ (%)	93.4	92.9
$D_{IN\ SITU}/D_{TESTIGOS}$ (%)	89.2	87.8

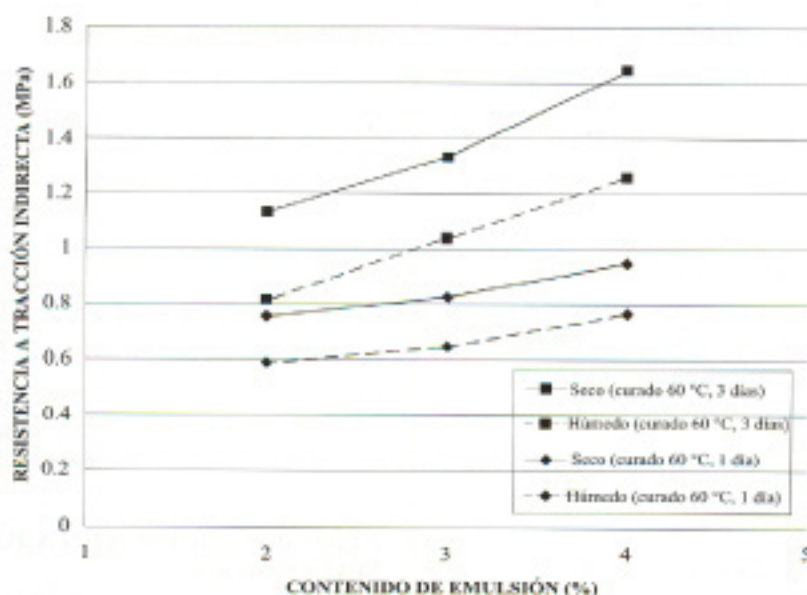


Figura 5. Variación de la resistencia a tracción indirecta a 5°C, en seco y tras inmersión, con el porcentaje de emulsión utilizado.

## CONCLUSIONES

El análisis de la metodología habitualmente utilizada ha puesto de manifiesto algunos problemas, a los que debería darse solución con el fin de obtener en laboratorio un manual más acorde con el conseguido en obra.

La compactación y las condiciones de curado de las mezclas recicladas en frío son determinantes en su comportamiento. Las propiedades mecánicas de la mezcla mejoran sensiblemente al aumentar la compactación y el tiempo de curado.

La metodología habitualmente empleada en España; en el diseño y control de las

mezclas recicladas en frío, basada en el ensayo de inmersión-compresión, parte de una mezcla con una elevada compactación, mayor que la que realmente se podrá alcanzar en obra. Esta metodología puede mejorarse aplicando una carga de compactación para la fabricación de las probetas inferior a la especificada, con objeto de que la densidad obtenida en laboratorio sea más similar a la obtenida en obra. En ese sentido, el valor de 6000 kg parece adecuado.

No obstante, la resistencia a compresión de la mezcla reciclada parece no ser el parámetro más adecuado para caracterizar en laboratorio su comportamiento, ya que

no valora específicamente la cohesión de la mezcla. La resistencia a tracción indirecta parece una propiedad más indicada tanto para diseñar la mezcla, como para controlar su posterior ejecución. El valor recomendado de la resistencia a tracción indirecta, a 5°C, sobre probetas compactadas estáticamente con 6 toneladas, curadas en estufa a 60°C durante tres días y ensayadas en seco debería ser superior a 1.0 MPa, con una resistencia conservada tras inmersión en agua, 1 día a 60°C, del 75%.

## BIBLIOGRAFÍA

- Castillo, S. *Técnicas y metodologías empleadas en el estudio de una mezcla mixta para la rehabilitación de pavimentos reciclados en frío in situ empleando emulsión y cemento. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya, 1999.*
- Fernández del Campo, J. A. *Estabilización y reciclado con emulsión, IV Congreso Nacional de Firmes, pp. 59-65, 1998.*
- Pérez Jiménez, F.E. *Documento de referencia para el reciclado: especificaciones, normativa y recomendaciones. Situación actual y necesidades, IV*