

# EXPERIENCIAS TÉCNICAS DEL RECICLADO IN SITU CON EMULSIÓN ASFÁLTICA DE LA CAPA DE BASE DE LA CARRETERA N-VI

*Pérez Pérez, I; Universidade de Coruña; ETSI de Caminos, Canales y Puertos, 15071 A Coruña; Tel: 981/167000; FAX: 981/167170; e-mail: iperez@udc.es*

*Corraliza Tejada, S; ECOASFALT, SA.; Director Técnico; C/ Alcalá 81, 2º A, 28009 Madrid; Tel: 91/5757230; Fax: 91/7810576; e-mail: scorraliza@ecoasfalt.es*

*García Cordovilla, C; Ministerio de Fomento; Demarcación de Carreteras del Estado en Galicia. Unidad de Lugo; Tel: 982/216312; email: cgcordovilla@fomento.es*

## 1. INTRODUCCIÓN

Existe una clara conciencia entre administraciones y constructores de carreteras de que cada vez habrá que destinar más inversiones a la rehabilitación de carreteras. Una técnica de gran futuro es la rehabilitación de firmes mediante el reciclado in situ en frío con emulsión.

Se considera el reciclado en frío de una capa asfáltica al proceso de mejora o rehabilitación de una capa de mezcla asfáltica antigua mediante disgregación, aportación y mezcla íntima con una emulsión bituminosa. La nueva mezcla tiene que ser homogénea y tratable para su extensión, nivelación y compactación en obra. En algunos casos se aportan otros elementos tales como árido virgen, aditivos que mejoren la cohesión y rotura de la emulsión. También pueden añadirse agentes que rejuvenecen o modifican el ligante.

La ventaja de este sistema radica en numerosos factores. Pueden citarse el ahorro en consumo de áridos, el aprovechamiento de los ligantes antiguos. También se reduce el impacto ambiental con la economía de áridos, que proceden de explotaciones muy agresivas con el entorno, de ligantes y combustibles, que producen gases y humos en los procesos de calentamiento. Otra ventaja del reciclado en frío de capas antiguas del firme radica en que no se degrada, en ninguna cuantía la calidad del ligante asfáltico existente en el pavimento antiguo, ni de manera obvia el propio de la emulsión, al eliminarse todo calentamiento peligroso.

Todos estos ahorros en el coste de la rehabilitación permiten su inversión en la seguridad vial de la carretera.

El objetivo de esta comunicación es difundir las experiencias técnicas de la ejecución de un reciclado in situ con emulsión de la capa de base de la carretera **N-VI** en la provincia de Lugo.

## 2. GENERALIDADES

Como se ha dicho, la carretera objeto de este estudio es la **N-VI** Madrid a La Coruña p.k. 515,9 al p.k. 546,4 tramo comprendido entre Rabade y el límite de la provincia de A Coruña. Dicha carretera ha sido sometida a numerosas actuaciones de rehabilitación del firme. En el momento de hacer la rehabilitación la sección de la carretera era bastante homogénea ya que correspondía fundamentalmente a un firme semirrígido compuesto por un pavimento de mezcla bituminosa en caliente de 20 cm de espesor, una capa de base de grava cemento de 18 cm de espesor y una subbase de material granular de 15 cm, todo ello descansando sobre una explanada formada por suelos adecuados y seleccionados tipo A1.

Para el estudio y proyecto del reciclado del firme semirrígido en el tramo de carretera considerado, se ha efectuado aplicando la vigente Norma 6.3.-IC de Refuerzo de firmes, aprobada por OM de 26 de marzo de 1.980, las Normas 6.1 y 2 IC de Secciones de Firmes, la Orden Circular 323/97 para el Proyecto de las actuaciones de Rehabilitación estructural de firmes con pavimento bituminosa y las recomendaciones de Tecnología sobre reciclado de firmes.

Tal y como establece la Norma, se ha procedido a una "inspección visual" del tramo observándose zonas con desperfectos superficiales, que en general no afectan a la resistencia estructural del firme, y zonas con desperfectos generalizados indicativos de agotamiento estructural. Todos estos datos resumen de deterioros de los pavimentos (grietas, zonas cuarteadas, baches, blandones, etc.),

son fruto de la vigilancia e inspección periódica realizada por el personal encargado de la conservación de carreteras y figuran almacenados en la Unidad de Carreteras de Lugo.

### 3. DIMENSIONAMIENTO

En fecha mayo 2.001, se realizó por la empresa responsable de la conservación integral, a solicitud de la Administración un estudio de deflexiones. Como parte de dicho estudio se obtuvieron, además, gráficos-resumen del tramo de la **N-VI**, en donde se reflejan los valores de la textura, roderas, pendientes, radio de curvatura y fisuras. Además, toda esta información se ha cumplimentado mediante la auscultación con **CURVIÁMETRO MT-15**, que proporciona el estado estructural del firme, y mediante diversas catas y testigos extraídos en diferentes puntos de la carretera.

#### 3.1 Datos de Tráfico y categoría de tráfico

Se parte de los datos facilitados por la Unidad de Carreteras, tanto de la estación permanente **E/154** como de la secundaria **LU 13/2**, correspondientes al año 1.999. Los datos fueron posteriormente corregidos:

<u>E/154</u>	<u>LU 13/2</u>
IMD (1999) = 1.084	IMD (1999) = 1.113
% Pesados = 12 %	% Pesados = 10 %
IMDp=130	IMDp=111

Para hallar la categoría de tráfico, según los criterios fijados en las Normas 6.1 y 6.2 IC y la norma 6.3 IC., se admitió una tasa de crecimiento anual de tráfico pesado durante el período de proyecto es del 4% y en calzadas de dos carriles y doble sentido de circulación, coincide sobre el carril de proyecto el 50% del total de vehículos pesados. Por lo tanto, considerando un período de proyecto de 10 años y tomando como origen el año 1.999, se obtuvo, en el año 2009, una **IMDp** de 96 vehículos pesados; es decir, una categoría de tráfico **T3**.

#### 3.2 Deflexiones de cálculo

La deflexión de cálculo ( $d_{kc}$ ), se obtuvo mediante la aplicación a la deflexión característica ( $d_k$ ) los coeficientes correctores relacionados con el método de medida utilizado (curviámetro **MT-15**, en este caso), y con las condiciones de humedad de la carretera y de la temperatura del pavimento en el momento de la toma de datos. De esta manera se utilizaron las fórmulas siguientes:

$$d_{kc} = C_h \cdot C_t \cdot d_k \quad d_k = m + 2s$$

$$m = \frac{\sum d_i}{n} \quad s = \frac{\sum (d_i - m)^2}{n - 1}$$

$d_i$  = deflexión patrón en  $i$   
 $n$  = número de puntos medidos  
 $C_h$  = corrección por humedad  
 $C_t$  = corrección por temperatura

Para la correlación con la deflexión patrón se tomó el valor **VB = 1,4 C**. Siendo **VB** igual a la deflexión patrón medida con la viga *Benkelman* y **C** siendo igual a la deflexión patrón medida con curviámetro **MT-15**. Por otro lado, se obtuvo un valor de **Ch** igual a 1,15 asumiendo las hipótesis siguientes: Explanada con suelos seleccionados y adecuados (A1); buenas condiciones de drenaje y período intermedio (mes de mayo). Por el otro lado, se obtuvo un valor de  $C_t$  igual a 0,97 asumiendo las hipótesis siguientes: pavimento fisurado y fresado en las zonas deterioradas; temperatura media del pavimento = 25° C; espesor de mezcla bituminosa = 12 cm. (>10 cm.).

Finalmente, con los valores de todos estos coeficientes, aplicados a las deflexiones patrón proporcionadas por el curviámetro en cada km de la carretera, se ha obtenido la deflexión máxima en el carril, la deflexión característica ( $d_k$ ), y la deflexión de cálculo ( $d_{kc}$ ) para cada sub-tramo estudiado.

#### 3.3 Dimensionamiento y solución adoptada

A la vista de los resultados obtenidos en el listado de las deflexiones del cálculo  $d_{kc}$ , y teniendo en cuenta la inspección visual y auscultación de la carretera, se dimensionó el firme de acuerdo con las especificaciones de la OC 323/97 T. Así, para un tráfico **T3** y un tipo de firme semirrígido se propone en las zonas más deterioradas -con las máximas deflexiones- un espesor de mezcla bituminosa de 12 cm. Dicho espesor se repartió, por un lado, en un fresado y en una posterior reposición del aglomerado de 8 cm, y, por el otro, en un refuerzo general posterior con mezcla bituminosa en caliente de 4 cm. Es importante clarificar que al calcular la equivalencia del espesor de reciclado en referencia al espesor de fresado y posterior refuerzo con Mezcla Bituminosa en Caliente (MBC) se supone un coeficiente de 0,80. Por lo tanto, dado el mal estado de gran parte de los tramos observados, tanto visualmente como a través del deflectograma, se procede al fresado y reciclado del aglomerado existente mediante un espesor equivalente de 10 cm en todas aquellas zonas deterioradas, para después poderle aplicar el refuerzo de 4 cm de MBC D-12, sobrepasando al espesor total mínimo de 12 cm, de acuerdo con la OC 323/97 T.

#### **4. DOSIFICACIÓN Y FÓRMULA DE TRABAJO**

##### **4.1 Estudio previo de los materiales**

###### ***Emulsión bituminosa***

Se utilizó una emulsión bituminosa catiónica de rotura lenta **ECL-2**. Se comprobó que la emulsión proporcionaba una buena adhesividad activa y pasiva del ligante residual con el árido. En este sentido, los ensayos de estabilidad después de inmersión en agua dieron una buena medida indirecta de esta adherencia. La penetración del betún residual es de 130-200 décimas de mm con el fin de compensar el endurecimiento del ligante envejecido del firme antiguo. No se utilizó ningún agente rejuvenecedor. Por otra parte, la emulsión seleccionada es lo suficientemente lenta para envolver los elementos finos del árido. Las características principales de esta emulsión se especifican en la tabla 1.

###### ***Material fresado***

El material fresado fue el proveniente de la mezcla bituminosa en caliente correspondiente a los diez centímetros superiores del pavimento actualmente en servicio. Dicho fresado fue llevado a cabo con la misma máquina utilizada posteriormente en la ejecución del reciclado. Al realizar el análisis granulométrico de acuerdo a la norma UNE-EN 933-1 se comprobó que la granulometría del material estaba inscrita dentro del huso granulométrico **RE2** especificado por la OC 8/2001 para espesores de reciclado comprendidos entre seis y diez centímetros (Figura 1). Posteriormente, se hizo una extracción del ligante de acuerdo a la norma NLT 165 obteniéndose un porcentaje de betún en la mezcla fresada del 3% y un porcentaje de betún sobre áridos del 3.1%. También, se hizo el análisis granulométrico del árido después de extraer el betún (Figura 1).

##### **4.2 Estudio de la mezcla y obtención de la fórmula de trabajo**

La muestra fresada de la mezcla bituminosa se transportó al laboratorio donde realizó un ensayo de compactación Proctor Modificado según la norma NLT 108, con el fin de fijar el contenido óptimo de fluidos para la compactación del material reciclado. En este sentido, tal y como se puede observar en la figura 2 -donde está reflejada la ley de densidad-humedad correspondiente- la densidad seca máxima obtenida fue de 2.01 g/cm<sup>3</sup> para una humedad óptima del 5.39 %. Por lo tanto, en principio, se fijó un porcentaje de óptimos de fluidos del 5.40%.

Posteriormente, teniendo en cuenta la información del ensayo Proctor Modificado se elaboró una serie de ocho probetas variando el contenido de ligante de cada una de las mismas, pero manteniendo constante el contenido total de fluidos. A continuación, después de someter las probetas a un proceso de maduración, se obtuvieron las densidades de las mismas para luego ser sometidas a compresión simple de acuerdo con la norma NLT-161 (Ensayo de compresión) (Figura 3). Tal y como especifica la norma NLT-162 (Ensayo de inmersión-compresión), antes de la rotura a compresión simple la mitad de éstas fueron inmersas en agua y la otra mitad se mantuvo en seco. Los requisitos de resistencia a compresión simple que especifica la OC 8/2001 (Ministerio de Fomento, 2001) se muestran en la tabla 3. En el caso que se está analizando -dado que se tiene un tráfico **T3**- se debería obtener como mínimo una resistencia a compresión simple de 2.5 MPa para las probetas en seco y una resistencia mínima tras inmersión de 2.0 MPa. Además, la resistencia conservada debe ser igual o mayor de un 70%. Como puede observar en la figura 3 y en la tabla 3

las resistencias a compresión simple no cumplían los requisitos exigidos en la OC 8/2001 para un tráfico **T3**. Sin embargo, la resistencia conservada dio como resultado un valor igual al 75%, cumpliendo lo indicado en la orden circular.

Por otro lado, la media de la densidad de la serie de estas probetas -fabricadas para realizar el ensayo de inmersión-compresión- fue de 2.32 g/cm<sup>3</sup>. Por todo ello, se decidió realizar una corrección granulométrica con arena caliza proveniente de una cantera situada en las proximidades de la obra (Figura 1). Nuevamente, se realizó el ensayo Proctor Modificado (Figura 2), obteniéndose una densidad seca máxima de 2.2 g/cm<sup>3</sup> para un contenido óptimo de fluidos del 6.5%. Por lo tanto, se tomó un porcentaje óptimo de fluidos del 6.5%.

A continuación, se fabricó una serie de probetas que fueron sometidas al ensayo de inmersión-compresión. Los resultados de estos ensayos están reflejados en la tabla 4. En la figura 3 se aprecia que con esta corrección se produjo un aumento considerable de la resistencia a compresión simple. En la tabla 4 puede observarse que ahora dichas resistencias son superiores a las exigidas para un tráfico **T3**. Asimismo, las resistencias conservadas son notablemente superiores a las exigidas por la orden circular.

La media de la densidad de estas probetas elaboradas con una corrección granulométrica mediante arena caliza fue de 2.34 g/cm<sup>3</sup>. A la vista de estos resultados se decidió tomar un contenido óptimo de ligante **ECL-2** del 3.5% y un contenido de agua del 3.0 % para ser empleados en la ejecución del reciclado en frío in situ. Esta fórmula de proyecto fue aprobada por la dirección de obra.

## 5. EJECUCIÓN DEL RECICLADO

### 5.1 Máquina utilizada en el reciclado

La máquina utilizada en el reciclado fue el modelo **2100 DCR** de la casa alemana **Wirtgen** (Figura 5). Esta es una máquina de gran rendimiento. Cuenta con una regla de extendido que permite realizar trabajos de gran calidad en lo que a regularidad y homogeneidad del material reciclado extendido se refiere. Dicha máquina abarca las funciones de fresado; disgregación y homogeneización del material con aportación de la emulsión y agua; y; reparto transversal del material suelto, nivelación y extensión. Esta fresadora tiene una anchura de fresado de 200 cm y una profundidad de fresado de 22 cm. La máquina actúa sobre el firme con la acción de un tambor transversal giratorio, dotado de picas de acero de gran dureza. La máquina se mueve sobre orugas. La máquina actúa sobre la capa de mezcla bituminosa y traslada mecánicamente el material al sinfín de una mezcladora entendedora móvil que trabaja simultáneamente unida. Lleva incorporado una maestra y pisón para la extensión y precompactación de la mezcla definitiva.

La carcasa del rotor se utiliza como cámara de mezclado. En esta caja mezcladora se inyecta a presión un caudal controlado de emulsión asfáltica y agua. El suministro de fluidos se hace desde una cisterna nodriza que se mueve vinculada a la máquina de reciclado. La incorporación de la emulsión se hace por una batería de difusores, fácilmente limpiables, revisables y cambiables, que la reparten uniformemente pulverizada. La presión se obtiene con una bomba de desplazamiento positivo, generalmente asociada a un caudalímetro. El agua se aporta mediante el llenado del depósito de 4000 litros de la máquina.

El motor básico de la máquina tiene una potencia de 600 CV que se regula de forma automática. La configuración de trabajo empleada estaba formada por una cisterna de emulsión más **W-2100-DCR** más compactador de neumáticos pesado más compactador liso vibratorio pesado.

### 5.2 Fases de ejecución

Después de hacer un reconocimiento de la carretera, las fases de ejecución del reciclado son las siguientes:

1. Adición de arena caliza correctora de la granulometría
2. Disgregación y homogenización
3. Adición de la emulsión bituminosa y agua
4. Mezclado de todos estos componentes
5. Extensión y nivelación de la mezcla
6. Compactación

La arena caliza se extiende sobre la capa de rodadura por delante del equipo de reciclado. De esta forma este material se incorpora a la granulometría al realizar el reciclado. En la figura 8 se observa un detalle de la extensión de la arena caliza sobre la calzada justamente antes del avance de las orugas de la máquina de reciclado. Por otra parte, la máquina permite regular la profundidad del fresado y conseguir una buena disgregación de la mezcla existente. La velocidad de avance se sitúa entre los 3 y 6 metros por minuto. Además, la máquina controla la cantidad de emulsión y agua de preenvuelta. La emulsión es pulverizada y se obtiene una buena envuelta del material. El mezclado se realiza aprovechando la energía del rotador horizontal perpendicular al sentido de la marcha. Por debajo de la máquina queda una longitud de cordón de material reciclado que va desde el tambor hasta la regla de extendido. Mediante la acción de un sinfín previo a la regla de extendido se logra una homogenización correcta del material. La regla de extendido de la mezcla deja una regularidad muy buena. La mezcla queda precompactada, y la emulsión rompe al salir de la entendedora, nunca dentro del tambor o en el cordón, lo que impediría el correcto extendido y compactación.

En general las necesidades de compactación son mayores que las que se requerirían para la compactación de una capa de mezcla asfáltica del mismo espesor. Esto se debe a que este tipo de material tiene poca trabajabilidad. La mezcla recién extendida sin compactar (Figura 6), al haber sido disgregada y contar con la aportación de agua, se esponja bastante, pese a la acción de precompactación del *tamper*. La compactación se obtiene mediante la combinación de un rodillo neumático de 35 toneladas lastrado y siete ruedas en cabeza, seguido por un rodillo metálico doble de 16 toneladas (Figura 7). El rodillo neumático permite expulsar el agua procedente de la preenvuelta y de la rotura de la emulsión. El rodillo vibratorio permite encajar la mezcla reciclada en el cajón formado al fresar.

Es muy importante que la densidad después de la compactación sea lo más alta posible. Durante el período de curado se produce una densificación de la mezcla que termina con la extensión de la capa de rodadura de la mezcla en caliente. El factor clave para alcanzar densidades altas y para que el período de curado de la mezcla sea el más corto posible es la eliminación del agua.

## 6. CONTROL DE LA OBRA

Tras el proceso de compactación se obtuvieron numerosas densidades y humedades in situ mediante el método de la arena. Dichas densidades después de un período relativamente corto de tiempo alcanzaron el 90% de las obtenidas mediante el ensayo Proctor Modificado. No obstante, este porcentaje aumentaba con el paso del tiempo hasta alcanzar un 100%. Por lo que, contrariamente a lo que en principio se esperaba se obtuvieron unas altas densidades de la capa reciclada. Asimismo, se tomaron en recipientes que preservan la humedad muestras de la mezcla reciclada y, más tarde, en el laboratorio se realizaron con ellas series de probetas. Éstas fueron sometidas a compresión simple de acuerdo al ensayo de inmersión-compresión. En todos los casos los resultados obtenidos fueron muy satisfactorios, alcanzándose valores superiores a los que establece la tabla 2. Posteriormente, se intentaron extraer testigos de la mezcla reciclada. Esta operación no fue posible realizarla, ya que los testigos de material reciclado se rompían al intentar extraerlos (figura 8). Una explicación posible a este fenómeno quizás estriba en que el material todavía no había alcanzado una madurez suficiente, manteniendo todavía éste con un alto contenido de agua. Este hecho podría deberse a que estos materiales tienen un comportamiento mecánico intermedio quizás más parecido a un material granular que a una mezcla bituminosa convencional en frío.

Por otro lado, después de un período de un mes de maduración y antes de ejecutar la capa de rodadura se procedió a la toma de deflexiones mediante un deflectómetro de impacto DYNATEST HWD 8081. Esto se hizo así con el fin de comprobar la capacidad estructural de la capa recientemente reciclada. En la figura 9 están representadas las dos distribuciones de los porcentajes de los intervalos de deflexión en el carril de la izquierda y de la derecha de la carretera. El número total de medidas fue igual a 1284. En el carril 1 (derecha) el porcentaje de deflexiones características situadas dentro del intervalo entre 75 y 100 centésimas de milímetro es de un 1.947%; mientras que en el carril 2 este porcentaje es igual a un 2.025%.

Cabe destacar que el comportamiento observado de la capa de base reciclada fue excelente, ya que durante un período aproximado de 3 meses se mantuvo en servicio la carretera sin ejecutar la capa de rodadura formada por una mezcla bituminosa en caliente D-12. Durante ese período no se

observaron deterioros significativos de la base reciclada por la acción de las cargas del tráfico. Además es de destacar que después de haber pasado un período de seis meses a partir de la ejecución del reciclado se procedió de nuevo al intento de extracción de testigos de la capa de base reciclada. En este sentido, cabe decir que se logró la extracción de una manera satisfactoria, señal de que el material ya había madurado lo suficiente para poder hacer esta operación. Estos testigos fueron sometidos a rotura a compresión simple obteniéndose unos buenos resultados.

## 7. REDIMENSIONAMIENTO DEL RECRECIMIENTO

Como se había comentado en el apartado 3, cuando se hizo el dimensionamiento original del firme se tomó éste como uno semirrígido en con una capa de base de grava-cemento de 18 cm de espesor. Por tanto, se determinó, para un tráfico **T3**, un espesor total de mezcla bituminosa nueva de 12 cm. que, posteriormente, se incrementó hasta 14 cm., desglosados en 10 cm de capa bituminosa reciclada con emulsión más 4 cm de nueva capa de rodadura con mezcla bituminosa D12.

Por otro lado, una vez realizado el reciclado y tomando como base los datos de las nuevas deflexiones, cumple lo estipulado por la Instrucción 6.3 IC (Ministerio de Fomento, 2001) en lo concerniente a que en un firme semirrígido no debe superarse el umbral de  $125 \times 10^{-2}$  mm de deflexión patrón para no considerar que el agotamiento estructural afecta a la explanada. Sin embargo, en muchos casos se supera el umbral de  $50 \times 10^{-2}$  mm de deflexión patrón considerado para que el firme tenga una vida residual insuficiente.

Además, se puede hacer el ejercicio teórico del redimensionamiento de la mezcla bituminosa en caliente situada sobre la capa reciclada como si aquella fuera el recrecimiento de una mezcla bituminosa sobre un firme semirrígido. Así, según dicha instrucción, ya que la **IMD** de pesados es igual a 130 vehículos se puede tomar una categoría de tráfico **T32**. Por tanto, se tiene que con unas deflexiones de cálculo en los entornos de 60-80 y 80-100  $\times 10^{-2}$  mm, se requieren unos espesores de recrecimiento de mezcla bituminosa de 0 cm (zona de actuación preventiva) y 5.0 cm respectivamente. Como se puede ver en la figura 9, una gran mayoría de deflexiones o están dentro de estos intervalos o son menores, con lo cual en el intervalo 60-80 se cumplen perfectamente las previsiones iniciales. En el intervalo 80-100 no se cumple el dimensionamiento inicial; ya que se había previsto un refuerzo de tan solo 4.0 cm de mezcla bituminosa en caliente. De todas formas, en esta ocasión hay que proceder con todas las reservas. Como se ha dicho anteriormente, en el momento de la auscultación estructural la capa reciclada con emulsión estaba todavía en un período de maduración y tiene, posiblemente, un comportamiento intermedio entre una mezcla bituminosa en frío y un material granular. Por eso, en este caso, no está muy claro si las tablas disponibles en la Instrucción 6.3 IC proporcionan un criterio adecuado para poder dimensionar el recrecimiento.

En este orden de ideas, cabe decir que Marcuerquiaga (2004) midió, utilizando técnicas de auscultación de firmes (**FWD**), la deflexión elástica en tramos de carreteras donde se habían llevado a cabo diversas actuaciones de reciclado in situ. En este sentido, observó que cuando se rehabilita mediante un reciclado in situ con una emulsión tipo ECL-2 existe un tiempo de curado bastante grande, por lo que se debe realizar un seguimiento a largo plazo. Este autor manifiesta que el material reciclado en frío gana mucha capacidad estructural durante los nueve primeros meses de servicio, alrededor de un 60%.

Centeno et al (2004) manifiestan unas consideraciones parecidas cuando dicen que las mezclas recicladas con emulsión se densifican más a medida que pasa el tiempo, debido a que tienen un proceso de maduración y desalojo del agua lento.

Finalmente, Soto y Páez (2005), también, argumentan que en las capas de base de los reciclados in situ con emulsión, la fatiga no es un criterio de fallo, tal y como sucede en las mezclas bituminosas en caliente. En este sentido, manifiestan que estos materiales tienen un carácter no-lineal de forma que el módulo es función de las tensiones soportadas. Por lo tanto, el criterio de rotura se debe buscar en la deformación permanente producida en el material por las cargas cíclicas del tráfico. Es decir, su comportamiento mecánico sería parecido al de un material granular suelto.

## 8. CONCLUSIONES

De lo expuesto anteriormente se puede deducir que el reciclado in situ con emulsión es una técnica excelente y una solución adecuada para la rehabilitación de carreteras de bajo tráfico. Esto se

desprende de los resultados obtenidos en la rehabilitación de la carretera N-VI en el tramo comprendido entre Rabade y el límite de la provincia de A Coruña.

No obstante, existe la necesidad de profundizar en el conocimiento de este tipo de material reciclado in situ, sobre todo en lo concerniente a la caracterización de su comportamiento mecánico. En estos momentos existe la disyuntiva de cuál es realmente el comportamiento mecánico de estos materiales. En este sentido, algunos autores manifiestan que se parece más a un material granular que a una mezcla bituminosa en frío. Por último, hacen falta unas líneas de actuación que permitan realizar un adecuado dimensionamiento de la rehabilitación de un firme mediante un reciclado in situ con emulsión.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Ministerio de Fomento (1997) “*Recomendaciones para el proyecto de las actuaciones de rehabilitación de firmes con pavimento bituminoso*”. Orden Circular 323/97 T.
- Ministerio de Fomento (2001a) “*Reciclado de firmes*”. Orden Circular 8/2001.
- Ministerio de Fomento (2001b) “*Rehabilitación de firmes de la Instrucción de Carreteras*”. Instrucción 6.3 IC.
- Marcuerquiaga, Y. (2004) “*Evaluación de técnicas de reciclado de aglomerado mediante la auscultación estructural*”. VI Congreso Nacional de Firmes. Normalización e innovación. León.
- Centeno, M; Haydeé, A y Miro, R (2004) “*Análisis del comportamiento de firmes con material reciclado a partir de tramos experimentales*”. VI Congreso Nacional de Firmes. Normalización e innovación. León.
- Soto, J. A y Páez, A. (2005) “*Reciclado en frío con emulsión*”. Revista Carreteras nº 139. Marzo-Abril.

Tabla 1. Características de la emulsión ECL-2

CARACTERÍSTICAS		Unidad	Norma NLT	Min.	Max.
<b>EMULSIÓN ORIGINAL</b>					
Viscosidad original	<i>Furol a 25 °C</i>	s	138	----	50
	<i>Furol a 50 °C</i>			----	---
Carga de las partículas			194	Positiva	
Contenido de agua (en volumen)		%	137	---	40
Betún asfáltico residual		%	139	60	---
Fluidificante por destilación (en volumen)		%	139	---	1
Sedimentación (a 7 días)		%	140	---	10
Tamizado		%	144	---	0.10
Estabilidad: Ensayo de mezcla con cemento		%		---	2
<b>RESIDUO POR DESTILACIÓN (NLT-139)</b>					
Penetración (25 °C, 100 g, 5 s)		0.1 mm	124	130	200
Ductilidad (25 °C, 5 cm/min)		Cm	126	40	---
Solubilidad en tolueno		%	130	97.5	---

Tabla 2. Valores mínimos de resistencia en inmersión-compresión (NLT-162)

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	EN SECO (MPa)	TRAS INMERSIÓN (MPa)	CONSERVADA (%)
T1 (sólo capas de base) y T2 (*)	3.0	2.5	75
T3, T4 y arcenes	2.5	2.0	70

\*Vías de servicio no agrícolas de autopistas y autovías interurbanas

Tabla 3. Resultados de los ensayos de Inmersión-compresión sin corrección granulométrica

FRESADO NORMAL	RESISTENCIA (MPa)		
	SECO	TRAS INMERSIÓN	CONSERVADA (%)
3.00	2.36	1.69	75
3.50	2.33	1.74	75
4.00	2.24	1.68	75

Tabla 4. Resultados de los ensayos de Inmersión-compresión con corrección granulométrica

CON ARENA CALIZA	RESISTENCIA (MPa)		
	SECO	TRAS INMERSIÓN	CONSERVADA (%)
3.00	3.41	2.65	85
3.50	3.30	2.81	84
4.00	3.06	2.53	83



Figura 1. Ensayos granulométricos del material

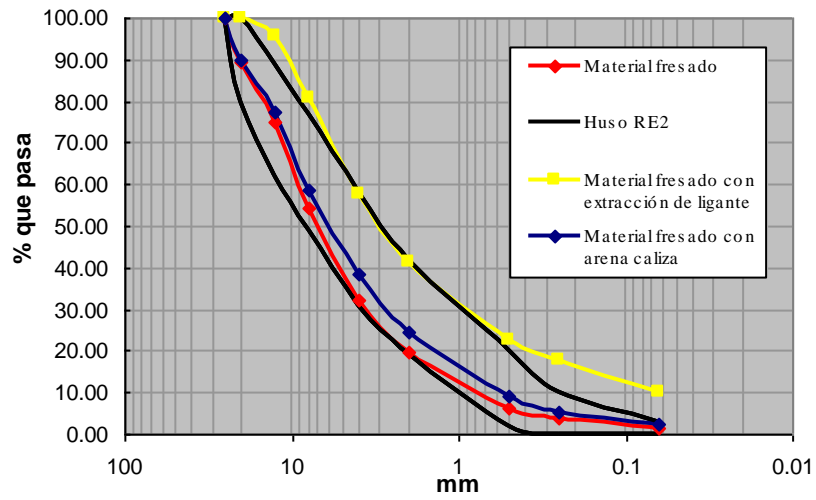


Figura 2. Resultados ensayos Proctor Modificado

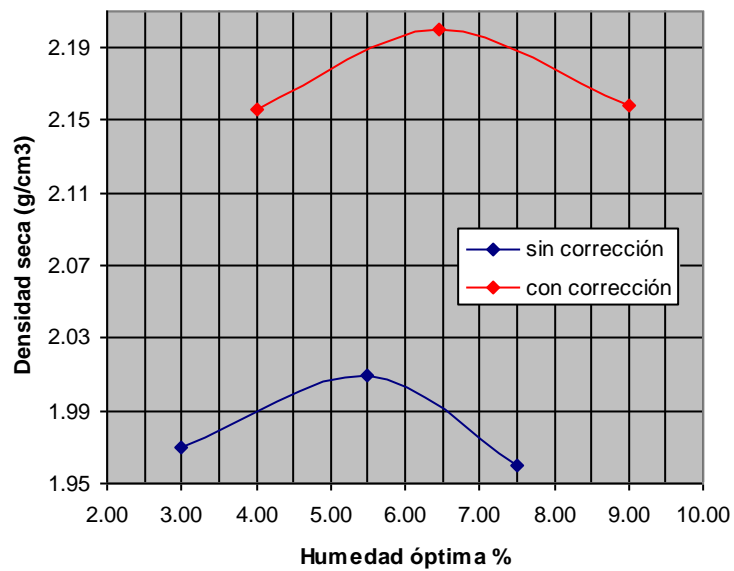


Figura 3. Resultados de los ensayos de Inmersión-compresión

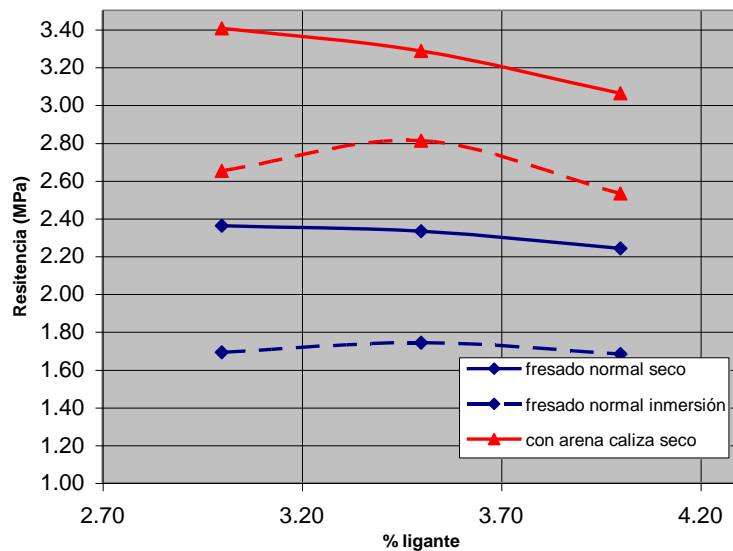


Figura 5. Máquina de reciclado



Figura 6. Extendido de la mezcla reciclada



Figura 7. Compactación de la mezcla reciclada



Figura 8. Intento fallido de extracción de un testigo



Figura 9. Distribución de los intervalos de los resultados de las deflexiones

