Obra de reciclado en frío in situ en la carretera L-902 ejecutada con el empleo de extendedora.

Lucía Miranda, Mar Subarroca, Francisco José Lucas, Jordi Albareda

RESUMEN

Es de sobra conocido y demostrado que la técnica de reciclado en frío in situ con emulsión es una de las técnicas más sostenibles que en estos momentos existe en las actuaciones de rehabilitación de carreteras, tanto por su aplicación a temperatura ambiente como por la posibilidad de la reutilización de todo el material de la propia carretera, sin la necesidad de utilizar material nuevo ni intervención de transporte adicional durante el transcurso de la obra.

También son muchas las actuaciones que se han ejecutado de reciclado in situ, sin embargo, cada vez estas obras se realizan con una serie de mejoras, de manera que la técnica sea cada vez más atractiva para que pueda ser considerada en los proyectos de rehabilitación.

En esta comunicación se presenta una obra ejecutada en la carretera L-902, correspondiente al extendido de un reciclado en frío in situ con el empleo de un equipo de puesta en obra que permite el empleo de una extendedora lo que ayuda a conseguir una mejor regularidad en la puesta en obra de la mezcla.

En esta obra, también se ha procedido al estudio de las características del ligante en las diferentes etapas de la obra.

DEFINCIÓN DEL CONTEXTO

En el marco del contrato de compra pública de innovación gestionado por la Generalitat de Cataluña, se ha llevado a cabo la redacción del proyecto y ejecución la obra "Mejora del firme en la L-902 del PK 0+360 al 13+060 tramo: Almacelles- Límite con provincia Huesca". (Clave SC-CFC-19027.9). El contrato forma parte del Plan de Firmes Sostenibles financiado con fondos FEDER y indicaba como aspecto innovador abordar la consideración de mezclas con bioligante en la fabricación de la capa de rodadura.

No obstante, el estado previo de la vía y su nivel de agotamiento estructural, inducía a la intervención en capa de base. La inspección visual de la carretera indicaba que, de manera generalizada, la capa de rodadura se encontraba agotada y presentaba grados similares de

fisuración, independientemente del carril. También se observaban deformaciones geométricas homogéneas, en forma de pequeños asentamientos en las rodadas de tráfico en toda la vía.

Imagen 1. Detalle del estado previo de la vía

La evaluación de las deflexiones en ensayo previo evidenció la presencia de zonas con valores medidos por encima de $125 \cdot 10^{-2}$ mm que indicarían la necesidad de rehabilitación estructural. No obstante, la inspección visual certifica la necesidad de actuación sobre la totalidad del firme asfáltico existente por su avanzado estado de fisuración.

El estudio previo del firme puso de manifiesto que el pavimento asfáltico está compuesto por una única capa, aunque se evidencia la presencia de tratamientos superficiales posteriores, ejecutados con la finalidad de sellar las fisuras o corregir las deformaciones o irregularidades en el plano de rodadura y es en concreto sobre esta unidad de obra sobre la que versa el presente documento.

El estudio de las diferentes alternativas permitió concluir como solución más adecuada desde el punto de vista técnico, económico y ambiental el reciclado en frío in situ del firme existente.

Fue considerada la previsible afectación por niveles de saturación de agua elevados en capas de base por existencia de campos en regadío en el perímetro de la vía. Los niveles de deflexión previstos nos conducían a la definición de un firme con mezclas eminentemente flexibles.

La capa reciclada sería posteriormente cubierta por la mezcla innovadora, diseñada para dotar a la vía de prestaciones superficiales adecuadas y con el fin de permitir un reparto de las cargas puntuales soportadas por la capa reciclada.

La operación de retirado de la capa existente permitiría el tratamiento de los 6 cm superficiales de la carretera y se reincorporan nuevamente a la carretera mediante la técnica de reciclado en frío con emulsión.

Imagen 2. Detalle del firme reciclado antes y después de la actuación

EMULSIONES PARA RECICLADOS EN FRÍO IN SITU

Uno de los materiales fundamentales para la fabricación de reciclados en frío in situ es la emulsión bituminosa, la cual debe poseer las propiedades adecuadas para aglutinar todo el material reciclado extraído de la carretera que será reutilizado en una nueva mezcla. Este tipo de emulsión debe proporcionar al ligante envejecido del RAP, una serie de cualidades que permita su regeneración, de manera que se consiga una mezcla con unas buenas prestaciones para el cumplimiento de los requisitos del artículo 20 del PG-4.

Actualmente, la emulsión a utilizar para la ejecución de esta unidad de obra corresponde a una C60B5 REC, tal y como se describe en el anejo nacional de la norma UNE EN 13808.

Tabla AN.21 – Clases prestacionales seleccionadas para las emulsiones originales C60B5 REC

Requisitos	Clases
Índice de ruptura (filler Foshammer), EN 13075-1	> 170 (clase 5)
Tiempo de fluencia 2 mm a 40 °C, EN 12846-1	15 – 70 (clase 3) [a]
Adhesividad con el árido de referencia, EN 13614	≥ 90% (clase 3)
Contenido de ligante (por contenido en agua), EN 1428 o o ligante residual después de la destilación [b], EN 1431	58 – 62 (clase 6) ≥ 58 (clase 6)
Residuo de tamizado (tamiz 0,5 mm), EN 1429	≤ 0,1 (clase 2)
Tendencia a la sedimentación (almacenamiento durante 7 días), EN 12847	≤ 10 (clase 3)

[a] Se pueden emplear emulsiones de clase 4 para el Tiempo de fluencia (40 – 130 s a 40 °C con el orificio de 2 mm) especialmente en los casos en los que los materiales a reciclar presenten humedad elevada.

[b] El contenido de ligante de la emulsión determinado por el método de destilación descrito en la Norma EN 1431 debe definirse como (porcentaje en masa de ligante residual + contenido en masa del fluidificante destilado).

Figura 1: Especificaciones de la emulsión C60B5REC según Anejo Nacional norma UNE EN 13808

Este tipo de emulsión se caracteriza por disponer de un contenido de ligante medio y, sobre todo, un valor a la rotura alto para permitir una adecuada envuelta y homogeneización de los áridos extraídos de la carretera, para finalmente conseguir una nueva mezcla.

Además de definir los requisitos a cumplir por la propia emulsión, también se describen las características del ligante residual en propiedades como penetración y punto de reblandecimiento.

Tabla AN.22 – Clases prestacionales seleccionadas para el ligante residual de la C60B5 REC

Requisitos	***Clases seleccionadas* según tabla 4** (Ligante residual por destilación), EN 1431	***Clases seleccionadas* según tabla 4** (Ligante recuperado), EN 13074-1	***Clases seleccionadas* según tabla 4** (Ligante estabilizado), EN 13074-1 seguido por EN 13074-2
Penetración a 25 °C, EN 1426	≤ 270 (clase 6) [a]	≤ 330 (clase 7) [a]	≤ 270 (clase 6) [a]
Punto de reblandecimiento, EN 1427	≥ 35 (clase 8) [a]	≥ 35 (clase 8) [a]	≥ 35 (clase 8) [a]

[a] Se admiten emulsiones fabricadas con betunes más duros (Penetración clase 4 (≤ 150) y Punto de reblandecimiento clase 6 (≥ 43)), a emplear en zonas cálidas o con tráfico intenso.

Figura 2: Especificaciones de las características del ligante residual de la emulsión C60B5REC según Anejo Nacional norma UNE EN 13808

Las características del ligante residual de la emulsión, proporciona información sobre el efecto que puede ejercer en el betún envejecido del RAP, para conseguir rejuvenecerlo de manera que pueda ser partícipe en la homogeneización del material de la nueva mezcla.

Para conseguir las propiedades rejuvenecedoras del ligante envejecido, es posible la adición de aditivos al betún empleado en la emulsión, para aportar al RAP, los componentes que se han eliminado durante su vida de servicio y que formaban parte de la estructura original del ligante. Estos aditivos pueden ser de diferente naturaleza y actuación:

- **Agentes "suavizantes"** que disminuyen la viscosidad y reblandecen el betún envejecido que junto con el betún nuevo alcanza la consistencia final, pudiendo funcionar como mejorador de la trabajabilidad final de la mezcla. Los compuestos más habituales son aceites parafínicos o saturados.
- **Agentes "estructuradores" o "removilizadores"** de la matriz del betún, por efecto dispersante y como tales son capaces de influir en las asociaciones intermoleculares entre los numerosos asfáltenos presentes. Estos compuestos pueden ser de diferentes orígenes o industrias, con mejor o peor compatibilidad con betunes. Provienen de aceites, grasas de origen biológico (vegetal/animal), formulados por mezclas y/o reacción con otros compuestos, reciclados de residuos (aceites reciclados, etc.). Estos productos por su naturaleza podrían tener un enfoque negativo final sí no están suficientemente controlados.
- **Agentes "rejuvenecedores"** con efecto compensatorio en la composición química. Son compuestos ricos en aromáticos y por lo tanto restauran el equilibrio en la composición química de los betunes envejecidos mediante el enriquecimiento de la fracción de máltenos. Provienen de crudos procesados petroquímicamente, con total compatibilidad con los betunes.

Estos aditivos rejuvenecedores en la proporción necesaria ~~que,~~ junto con el tipo de betún adecuadamente seleccionado, incorporados a través de la emulsión, influyen en la consistencia

del ligante final, consiguiendo ser–adaptado para unas prestaciones de la nueva mezcla en función de una categoría de tráfico específica.

ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS LIGANTES Y FORMULACIÓN DE LA MEZCLA DEL RECICLADO IN SITU

Características de los ligantes

Para el desarrollo de la fórmula de la mezcla de reciclado en frío, una de las actuaciones consiste en la definición de una formulación de la emulsión C60B5 REC con la proporción de aditivo rejuvenecedor más adecuada para conseguir mejorar las propiedades del ligante envejecido del RAP.

En esta comunicación se presenta el trabajo realizado sobre el estudio de las características de todos los ligantes que intervienen en la formulación de un reciclado en frío, abarcando desde el ligante extraído del RAP, hasta los betunes y emulsiones empleados en la nueva mezcla. Se comprueba además la influencia que un agente rejuvenecedor puede ejercer sobre las características finales del ligante

A partir de la formulación de la emulsión, se procederá a su empleo en la fabricación del reciclado en frío in situ.

Previamente a la ejecución de los trabajos, se ha realizado una inspección de todo el tramo y tras la evaluación, se ha valorado la extracción de muestras a través de catas de diferentes zonas. Sobre una muestra representativa de dichas catas, se ha procedido a la caracterización del ligante extraído analizando los siguientes parámetros:

- Penetración
- Punto de reblandecimiento
- SARA

Los resultados de la caracterización del RAP han sido los siguientes:

Característica	Cata 1	Cata 2
Penetración, 0,1 mm	4	7
Punto de reblandecimiento, ºC	88,2	82,6
SARA		
Asfaltenos (%)	40	35
Saturados (%)	8	10
Naftenos (%)	22	20

Polares (%)	30	35
Índice de durabilidad	0,9	0,8

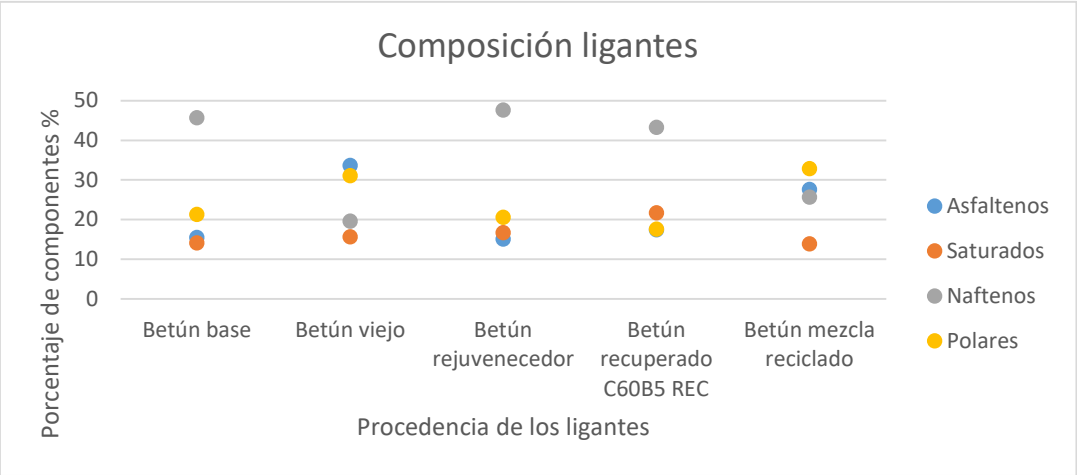
Tabla 1: Características fisicoquímicas del ligante del RAP de catas realizadas

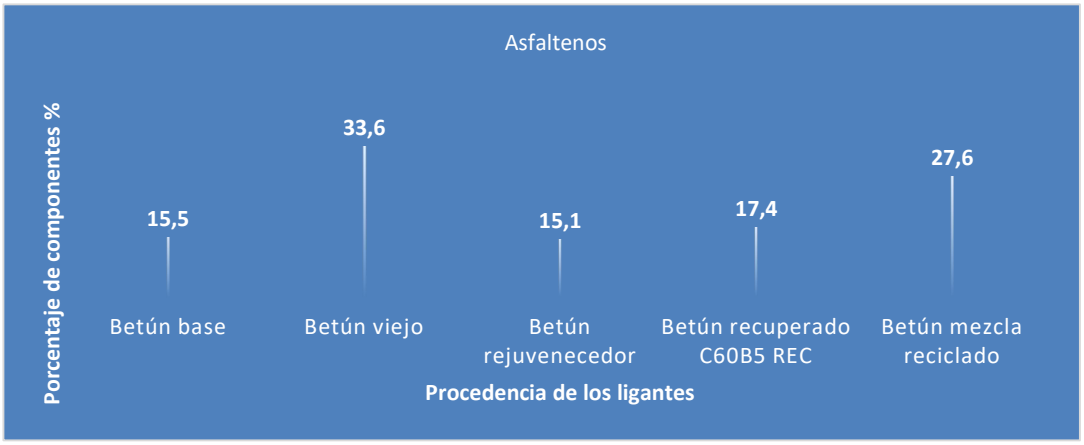
A partir de estos datos, se procede a definir el tipo de ligante más adecuado para la formulación de la emulsión, así como la dosificación de agente rejuvenecedor a adicionar. Posteriormente se procede a la fabricación de la emulsión C60B5 REC buscando como objetivo, poder mejorar las propiedades del betún final.

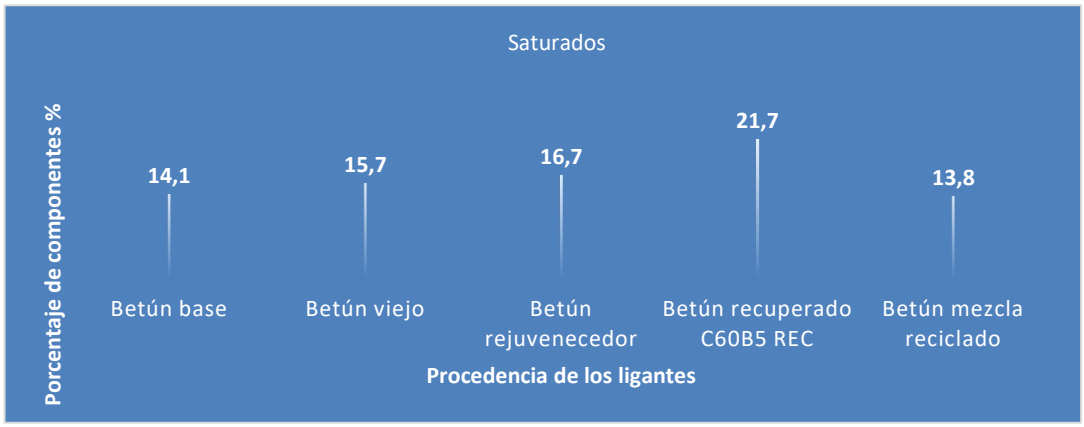
Para comprobar las características del ligante en todas las fases, se ha procedido a un análisis con los mismos parámetros tanto del betún de penetración empleado para la fabricación de la emulsión como de la mezcla del betún más el rejuvenecedor y por último del ligante extraído de la emulsión. Los resultados se muestran en la tabla y gráficos que vienen a continuación.

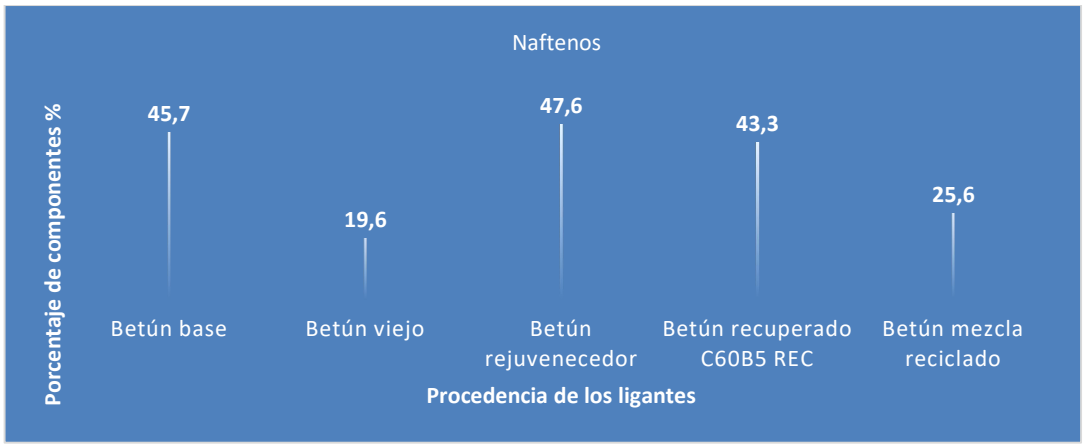
Tipo de muestra	**Penetración**	**AyB**	**Composición SARA**			
			Asfaltenos	**Saturados**	**Naftenos**	**Polares**
Ligante envejecido de muestras de RAP	**4/7**	**88,2 /82,6**	**40/36,4**	**8,1/10,2**	**22,4/19,6**	**30/33,8**
Ligante envejecido muestra análisis			**33,6**	**15,7**	**19,6**	**31,1**
Betún base	**210**	**38,6**	**15,5**	**14,1**	**45,7**	**21,3**
Betún + rejuvenecedor			**15,1**	**16,7**	**47,6**	**20,6**
Ligante extraído de la emulsión			**17,4**	**21,7**	**43,3**	**17,6**
Ligante extraído de la mezcla de reciclado nueva			**27,6**	**13,8**	**25,6**	**32,9**

Tabla 2: Características químicas de los ligantes que han intervenido en la formulación del reciclado in situ




Asfaltenos
Porcentaje de componentes %
15,5
33,6
15,1
17,4
27,6
Betún base
Betún viejo
Betún rejuvenecedor
Betún recuperado C60B5 REC
Betún mezcla reciclado
Procedencia de los ligantes


Saturados
Porcentaje de componentes %
14,1
15,7
16,7
21,7
13,8
Betún base
Betún viejo
Betún rejuvenecedor
Betún recuperado C60B5 REC
Betún mezcla reciclado
Procedencia de los ligantes


Naftenos
Porcentaje de componentes %
45,7
19,6
47,6
43,3
25,6
Betún base
Betún viejo
Betún rejuvenecedor
Betún recuperado C60B5 REC
Betún mezcla reciclado
Procedencia de los ligantes

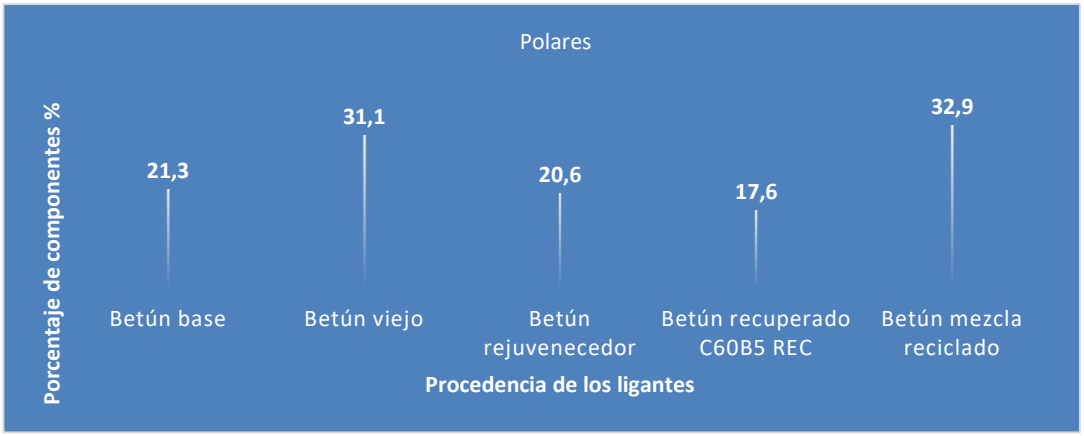


Figura 3 a 7: Representación de las características químicas de la procedencia de los ligantes

Partiendo del análisis químico de los componentes que forman parte del betún, se continúa el estudio con una valoración del índice de durabilidad que indica el grado de envejecimiento del ligante traducido en un aumento del contenido de asfáltenos y saturados y una disminución de los aromáticos. Valores altos superiores a 0,6-0,7 indican alto grado de envejecimiento.

Tomando como referencia este índice se procede a realizar una comparativa de las características de cada uno de los ligantes. En la bibliografía se define el índice de durabilidad como la relación entre los diferentes componentes del betún (Asfáltenos, Saturados, Resinas y Aromáticos) según la siguiente fórmula

$$ID = \frac{\mathrm{A} + \mathrm{S}}{\mathrm{C} + \mathrm{R}}$$

Los valores de índice de durabilidad obtenido para cada uno de los ligantes analizados se muestran en la tabla siguiente:

Tipo de muestra	ID
Ligante envejecido muestra análisis	**1,0**
Betún base	**0,44**
Betún + rejuvenecedor	**0,46**
Ligante extraído de la emulsión	**0,64**
Ligante extraído de la mezcla de reciclado nueva	**0,7**

Tabla 3: Valores de índice de durabilidad en función de la procedencia de los ligantes

Comparando los datos se observa como partiendo de un ligante envejecido, la adición de un agente rejuvenecedor ha permitido la reducción del valor de índice de durabilidad del betún final de la nueva mezcla reutilizada, considerando una muestra del rejuvenecimiento del ligante.

Formulación de la mezcla de reciclado

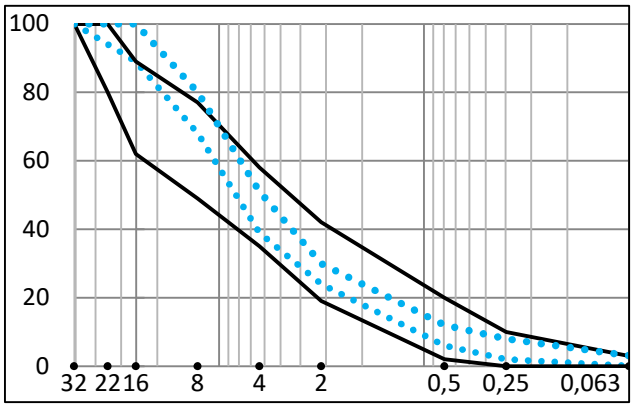
La formulación de la mezcla se realiza teniendo en cuenta las características de las catas extraídas del pavimento y a partir de los resultados de su análisis. También se ha definido la composición de la emulsión más adecuada para conseguir un ligante final más rejuvenecido

Tamices UNE, mm	MUESTRA NEGRO	Huso RE2	Huso RE1
32	100	100	78-100
22	98	80-100	69-95
16	95	62-89	52-82
8	74	49-77	40-70
4	45	31-58	25-53
2	27	19-42	15-40
0,5	6	2-20	2-20
0,25	5	0-10	0-10
0,063	1,6	0-3	0-3

Tabla 4: Composición granulométrica de la muestra en negro del RAP comparando con los dos tipos de reciclado

Contenido de ligante del RAP	
Característica	**Muestra negro**
Contenido sobre mezcla, %.	3,7

Tabla 5: Contenido de ligante del RAP



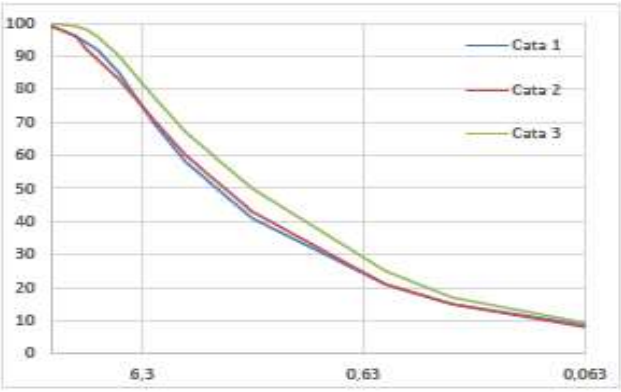


Figura 8 y 9: Representación granulométrica de los áridos con el ligante (izq) y sin ligante (dcha)

Para la formulación de las mezclas recicladas en frío se emplea una emulsión tipo C60B5 REC y se realizan pruebas con diferentes porcentajes analizando las propiedades mecánicas.

La valoración de las propiedades mecánicas se realiza sobre probetas fabricadas por compresión y rotura estática tomando como referencia las normas NLT 161 y NLT 162.

FRESADO	**Dosificaciones**			
% Emulsión C60B5 REC REJUV sobre FRESADO	**3.0**			**3.5**
Humedad óptima	2,8			2,3
Densidad s.s.s., g/cm³.	2,186	2,264	2,299	2,282
Resistencia en seco, kPa.	3,23	3,36	3,46	2,93
Resistencia tras inmersión, kPa.	2,62	2,71	3,25	2,37
Resistencia conservada, %.	**81,2**	**80,7**	**93,9**	**80,8**

Tabla 6: Características mecánicas del reciclado en frío para diferentes dosificaciones de emulsión

Los resultados obtenidos en la caracterización de la nueva mezcla de reciclado para un contenido de emulsión del 3,0%, muestra un buen comportamiento mecánico con valores elevados de resistencia conservada.

EJECUCIÓN DE LA ACTUACIÓN

Para su ejecución y también como innovación se dispondría de un equipo de reciclado de última generación (W 240 CRi) que aportaría importantes novedades:

1. Sistema de fresado:

Los equipos habitualmente utilizados para realizar tareas de fresado presentan un mecanismo de tambor con picas que avanza en sentido rotativo haciendo avanzar la pica de abajo hacia arriba en el pavimento durante su fresado. De esta manera se aprovecha la debilidad provocada por las fisuras de la parte superior de la capa. Se permite pues un menor desgaste de las picas.

No obstante, esta optimización desde el punto de vista de desgaste soportado por las picas compromete la homogeneidad granulométrica del material fresado, ya que el tamaño del material resultante será diferente en función del estado del firme y presentará un tamaño máximo nominal mayor que el que sería conferido únicamente por la acción molturadora de la fresadora.

El equipo diseñado para la ejecución del reciclado en frío en la obra que se describe, permite el fresado en sentido inverso actuando en el firme desde la capa superior y siendo pues la

distancia entre picas el elemento que acondicionará prácticamente de manera unívoca el tamaño del material fresado resultante.

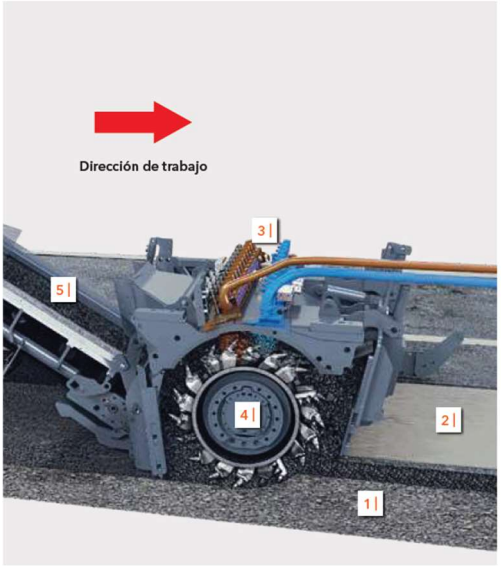


Figura 8. Detalle del sistema de fresado en el equipo

2. Extendido de la mezcla:

La segunda de las variaciones relevantes que aporta el uso de este equipo es el sistema de aplicación de la mezcla. En los equipos tradicionalmente empleados el extendido de la mezcla se realiza por el equipo de reciclado gracias a una maestra existente en la parte posterior del equipo.

En este caso, la recicladora dispone de un equipo de transferencia que transportará la mezcla reciclada hasta el silo de una extendedora convencional.

Figura 9. Detalle operación de transferencia de la mezcla reciclada.

Esta operación permite incluir dos importantes variaciones respecto a las condiciones de ejecución convencionales. En primer lugar, permite extender a todo el ancho de carril, tal y como sucede habitualmente con mezclas asfálticas en caliente y el ancho de extendido no se limita al ~~ancho~~ permitido por la propia recicladora, que requiere habitualmente la realización de dos pasadas por carril.

Aunque es habitual el reciclado con avance de dos máquinas en paralelo que evita la formación de junta, el extendido en estas condiciones permite un mayor grado de homogeneización del material extendido y una mayor planimetría tanto transversal como longitudinal, por la aportación en una única actuación de todo el ancho del carril y por el extendido y pre- compactación de la mezcla con medios más potentes.

Imagen 3. Detalle del tren de reciclado durante la ejecución de la obra

Para que la recicladora abordara en una única pasada todo el ancho del carril, se previó el fresado de una franja lateral y la deposición de un cordón sobre el pavimento a reciclar justo antes del paso del equipo. La fabricación de la mezcla en una única pasada por vía en todo el ancho también mejora la homogeneización de la mezcla.

Imagen 4. Detalle de la entrada de material fresado depositado en cordón a la recicladora

Otra de las ventajas proporcionadas por el sistema fue el incremento del rendimiento en la ejecución de la unidad de obra y por lo tanto la reducción de afección a usuarios y al medioambiente.

Por otro lado, estaba prevista la ejecución de una mezcla en rodadura de reducido espesor. Considerando que el firme disponía inicialmente de unos 6 cm de espesor, la actuación de reciclado del firme en todo su espesor, considerando el factor de equivalencia previsto en la normativa técnica estatal vigente, representa 4,5 cm por tanto, la aplicación de 3 cm de mezcla permitía garantizar y superar el espesor de mezcla considerado en el diseño inicial.

Con el fin de garantizar las prestaciones adecuadas en servicio en cuanto a textura y coeficiente de deslizamiento, y teniendo en cuenta el requerimiento de la aplicación de una mezcla reciclada en tasa del 20%, se seleccionó una del tipo AC11 S.

A fin de disponer de una valoración desde el punto de vista ambiental de la solución innovadora, durante la ejecución de la obra se realizó un inventariado y medición de los recursos empleados a fin de evaluar la huella de carbono de la solución ejecutada en relación con la solución convencional.

CARACTERISTICAS DEL FIRME

Para la valoración de las prestaciones finales del firme rehabilitado se realizaron ensayos de caracterización de la regularidad superficial, así como de las prestaciones mecánicas de la mezcla reciclada.

En relación con la regularidad superficial, los resultados del ensayo IRI son representados a continuación:

VALOR MEDIO DE IRI	**<1,5**	**<1,8**	**<2,0**	**<2,5**	**<3,0**	**<3,5**	**MEDIA**	**DESVIACIÓN**
SENTIDO CRECIENTE	96	99	100	100	100	100	1,04	0,24
SENTIDO DECRECIENTE	97	100	100	100	100	100	1,05	0,20

Tabla 7. Valores de Índice de Regularidad Superficial del firme con sección innovadora

Como puede observarse, los resultados permitieron garantizar el cumplimiento de los requisitos normativos para intervenciones de rehabilitación de firmes pese al reducido espesor de la capa de rodadura.

En cuanto al desempeño estructural, fueron evaluados sobre testigos los valores de módulo de Rigidez a 20ºC de la mezcla reciclada, tras 4 semanas de ejecución de obra obteniendo los siguientes resultados:

TESTIGO	LECTURA EJE 1 (MPa)	LECTURA EJE 2 (MPa)	VALOR MEDIO (MPa)
1	2325	2096	2211
2	2785	2941	2863
3	2354	2640	2497

Tabla 8. Valores de Módulo de Rigidez de testigos de reciclado tras 4 semanas de su fabricación.

Los valores registrados muestran resistencias comparables a las obtenidas en obras anteriores y se espera una evolución por maduración en periodos posteriores.

CONCLUSIONES

La aplicación de la técnica de reciclado en frio con emulsión ha permitido la actuación integral sobre el pavimento existente en el marco de la actuación de Compra Pública Innovadora del Plan de Firmes sostenibles de la Generalitat de Cataluña en la carretera L-902.

Para su ejecución se ha dispuesto del empleo de un equipo de reciclado de última generación que ha permitido mejorar la homogeneidad de la capa y su regularidad. Ha sido fundamental para su correcta aplicación el desarrollo de una emulsión adecuada.

Tal y como se ha mostrado en el estudio de la obra descrita en esta comunicación, la adición de aditivos rejuvenecedores en la emulsión permite mejorar las características del ligante final lo que se traduce en unas buenas prestaciones mecánicas, contribuyendo con ello a una mayor durabilidad de la mezcla.

Se plantea en el trabajo descrito en esta comunicación, la posibilidad de poder conocer y analizar las características químicas de las diferentes procedencias de los ligantes implicados en el reciclado en frío, lo que permite definir criterios para mejorar las prestaciones finales.

Es importante definir una formulación de la emulsión con una buena compatibilidad con el RAP para conseguir el cumplimiento de las prestaciones sin la necesidad de adicionar aditivos conglomerantes.

La aplicación del sistema constructivo y la formulación empleada, han permitido ejecutar una intervención sobre el firme que ha dado cumplimiento a los requisitos exigidos frente a soluciones convencionales de retirada y reposición, no fundamentadas en la aplicación de técnicas de reutilización consiguiendo una reducción estimada de emisiones de CO_{2eq} del 35%.