

Reutilización del 100% de RA con emulsión en central para capa de rodadura

Jorge Ortiz Ripoll

jortiz@arno.es

Rodrigo Miró

r.miro@upc.edu

Adriana Martínez

adriana.martinez@upc.edu

Antonio García Siller

a.garcia.siller@cepsa.com

Jordi Janot Feliu

jordi.janot@gencat.cat

Alba Navarro Casanovas

albanavarro@gencat.cat

Teresa López Montero

teresa.lopez@upc.edu

La reutilización en central con emulsión es una técnica alternativa a la reutilización in situ con emulsión utilizada habitualmente en España desde 1992, que permite corregir la granulometría del material recuperado por fresado, controlar con precisión el contenido de ligante añadido, incorporar cualquier aditivo en la central de fabricación, independizar las operaciones de fresado y extendido, o extender la nueva capa en anchos y con espesores distintos de los de la capa demolida. Además, la producción en central permite limpiar cuidadosamente la superficie de asiento de la mezcla reutilizada para aplicar a continuación un riego de adherencia que asegure el trabajo solidario del conjunto de capas bituminosas que constituyen el firme. Estas ventajas han llevado a construir un tramo experimental con una capa de rodadura de mezcla bituminosa en frío elaborada enteramente con materiales recuperados por fresado de pavimentos envejecidos. En este trabajo se recogen los resultados de los ensayos de diseño y caracterización de la mezcla en laboratorio (módulo de rigidez, sensibilidad al agua y resistencia a las deformaciones plásticas mediante el ensayo de pista) así como los resultados de módulo y resistencia a la fisuración (ensayo Fénix y ensayo de propagación de fisuras) obtenidos a partir del ensayo de los testigos extraídos del tramo experimental. Esta experiencia permite concluir que la reutilización con emulsión en central facilita la producción de mezclas bituminosas en frío en condiciones controladas, pudiendo ser aplicadas incluso como capa de rodadura.

Palabras Clave: Capa de rodadura, Reutilización en frío con emulsión, Reutilización en central

Asphalt reuse with emulsion in central plant is an alternative technique to reuse in situ with emulsion, commonly used in Spain since 1992, which makes it possible to correct the gradation of the material recovered by milling, precisely control the content of binder added, include any additive in the manufacturing plant, make the milling and paving operations independent, or spread the new layer in widths and thicknesses different from those of the demolished layer. In addition, centralised production allows for the careful cleaning of the base layer of the reused mix and the subsequent application of a tack coat to ensure that all the bituminous layers that make up the pavement work together. These advantages have led to the construction of an experimental section with a cold mix asphalt wearing course made entirely from materials recovered by milling aged pavements. This paper includes the results of the design and characterisation tests of the mix in laboratory (stiffness modulus, water sensitivity and resistance to plastic deformation by means of the wheel tracking test) as well as the results of cracking resistance (Fénix test and crack propagation test) obtained from testing cores extracted from the experimental section. This experience leads to the conclusion that reuse with emulsion in central plant facilitates the production of cold asphalt mixes under controlled conditions, which can even be applied as a wearing course.

Keywords: Wearing course, cold reuse with emulsion, cold reuse in central plant.

Reutilización del 100% de RA con emulsión en central para capa de rodadura

1. INTRODUCCIÓN

La reutilización en central con emulsión de materiales recuperados de la demolición de pavimentos bituminosos envejecidos (RA) ofrece interesantes posibilidades de mejora respecto a su reutilización in situ, que es la tecnología en frío más habitualmente utilizada en España. Contar con una central de fabricación permite independizar las operaciones de fresado de las de puesta en obra, controlar con mayor precisión la composición de la nueva mezcla, aportar cualquier proporción de materiales exógenos, y usar medios de puesta en obra convencionales, incluso actuando sobre espesores y anchuras distintos de los de la capa que está siendo demolida. En conjunto, estas y otras ventajas que serán objeto de atención deben permitir ampliar el campo de aplicación de la reutilización en frío y proponerse objetivos técnicamente más ambiciosos que los previstos en la vigente Orden Circular OC 2/2023, donde se establece que la reutilización in situ con emulsión de capas de firme podrá ser empleada en las categorías de tráfico pesado T1 a T4, en capas intermedias, de base y subbase. La misma OC 2/2023 también prescribe que sobre estas capas han de proyectarse capas de mezcla en caliente o semicalientes, reutilizadas o no, en un espesor mínimo de 8 cm en la categoría T1, 5 cm en la categoría T2 y T3 y 3 cm (o dos capas de microaglomerado en frío) para la categoría de tráfico T4 [1].

Con la actuación descrita en el presente trabajo se tratará de mostrar que la reutilización con emulsión en central es una tecnología compatible con su empleo tanto en capas intermedias y de base, como en capa de rodadura. Esta última y novedosa aplicación es el caso de la mezcla reutilizada en frío, compuesta por un 100% de RA, que ha sido diseñada y puesta en obra en la carretera LP-3322, entre las poblaciones de Mollerussa y Linyola (Lleida), constituyendo la primera capa de esta naturaleza construida en España.

2. METODOLOGÍA

2.1 Actuación de rehabilitación

En julio de 2023 se ejecutaron las obras de rehabilitación del firme de la carretera LP-3322, perteneciente a la red de carreteras de la Generalitat de Catalunya, entre los P.K. 1+600 al 4+800 (tramo Mollerussa-Linyola). Es una vía actualmente sometida a un tráfico pesado de categoría T31, cuya sección de firme, antes y después de la actuación de rehabilitación, es la representada en la figura 1, donde todas las cotas se hallan expresadas en cm. La sección original es la denominada T4121 en la instrucción de carreteras 6.1 IC, es decir, la correspondiente a un firme de mezclas bituminosas en caliente (MBC) y zahorra artificial (ZA), construido sobre una explanada E2 y para una categoría de tráfico pesado T41.

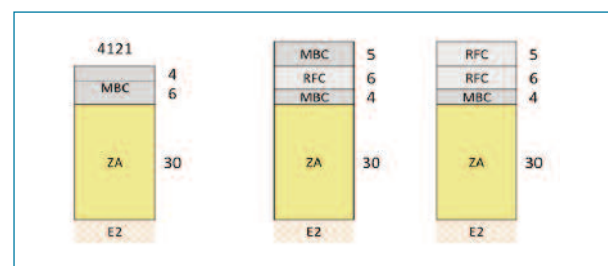


Figura 1. Sección del firme antes (izquierda) y después de la rehabilitación con una nueva capa de rodadura de mezcla bituminosa en caliente (centro) o con la solución experimental (derecha)

La capa de rodadura presentaba un cuarteo en malla gruesa, atribuido a su agotamiento por fatiga, sin ahuecamientos u otras deformaciones apreciables, y las catas efectuadas revelaron que la capa intermedia se encontraba en buen estado de conservación. Se proyectó una actuación de rehabilitación consistente en un reciclado en frío con emulsión en central (RFC) de 6 cm del pavimento existente y la extensión de una nueva capa de rodadura de 5 cm de espesor de mezcla bituminosa en caliente (MBC) tipo AC 16 SURF PMB 45/80-65 S,

mientras que en el tramo experimental esta capa fue sustituida por la nueva mezcla RFC que se describirá a continuación.

Tabla 1. Composición de la mezcla antes de la incorporación de emulsión

Fracción de RA (mm)	Proporción utilizada (%)	Contenido de ligante (%)
0/16	85	5,5
16/22	15	2,2
0/22	100	5,0

2.2 Diseño de la mezcla reutilizada en central

La nueva mezcla reciclada con emulsión en central se ha elaborado utilizando RA exógeno, en concreto, procedente de la autovía A-2 (tramo Variante de Lleida). Así, ha sido posible caracterizar este material con suficiente antelación y prevenir cualquier déficit durante la ejecución de las obras. A partir del RA clasificado se recompuso la mezcla indicada en la tabla 1, obteniéndose las curvas de trabajo presentadas en la Figura 2, donde pueden observarse junto al huso AC16 S.

Estas dos curvas corresponden a la granulometría del RA antes y después de la extracción de betún. La primera debe tenerse en cuenta porque condiciona el comportamiento de la mezcla fresca durante su fabricación y puesta en obra, y la segunda porque correspondería a la de una mezcla total del ligante envejecido del RA y el nuevo betún aportado con la emulsión. Naturalmente, el progreso hacia esa situación límite depende de factores como las condiciones ambientales, el grado de envejecimiento del betún presente en el RA, la presencia de fluidificantes en la emulsión... y, en general, es poco realista contar con esa posibilidad, ni siquiera a largo plazo. Sin embargo, con la composición seleccionada, puede bastar con una activación parcial del betún envejecido para obtener una mezcla bituminosa en frío cuya granulometría encaje correctamente en el huso AC16 S.

El ligante bituminoso seleccionado es una emulsión de betún modificado con polímeros, tipo C60BP4 REC (tabla 2) especialmente diseñada para esta actuación en lo que respecta a las características del ligante utilizado

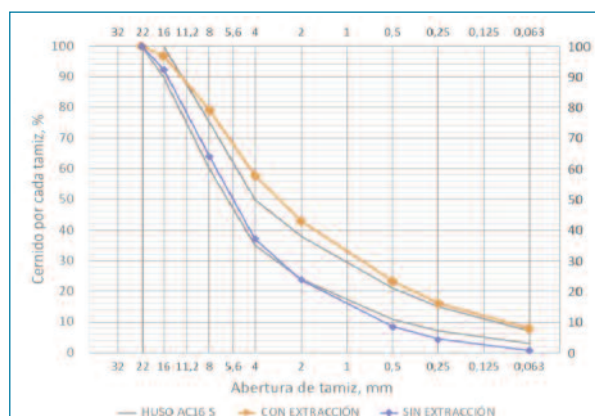


Figura 2. Curva granulométrica de la mezcla de RA en fresco (antes de la extracción de betún) y después de la extracción

en su fabricación, su capacidad de envuelta y la trabajabilidad de la mezcla, con la que se decidió ensayar las dos formulaciones descritas en la tabla 3 como Mezcla I y Mezcla II. La selección de estas fórmulas de partida se basó en la experiencia adquirida previamente, durante la producción de la mezcla reciclada en central utilizada como capa intermedia en la misma obra [2] y mediante nuevos ensayos de envuelta realizados con el nuevo fresco y emulsión modificada.

Con las dos mezclas se elaboraron probetas de 101,6 mm de diámetro mediante compactación estática (61,6 kN, 300 s) según UNE 41215:2022. Una vez compactadas, fueron sometidas a un curado acelerado (72 horas en una estufa de aire forzado a $40 \pm 1^\circ\text{C}$) con objeto de simular las condiciones de la mezcla in situ a medio plazo, obteniéndose los valores de densidad y huecos indicados en la tabla 4, para las dos proporciones de ligante ensayadas. Sobre las mismas probetas, cortadas para obtener las dimensiones adecuadas, se efectuaron ensayos de módulo de rigidez (UNE EN 12697-26 anexo C) a distintas edades que proporcionaron los resultados incluidos en la misma tabla 4. Durante un mes las probetas se mantuvieron en cámara climática a 20°C , la misma temperatura de ensayo.

La sensibilidad al agua, medida según la norma UNE EN 12697-12, dio lugar a los resultados presentados en la tabla 5. Por último, aun no hallándose especificados para las mezclas bituminosas en frío, se realizaron ensayos de resistencia a la deformación plástica en pista de laboratorio, con los resultados mostrados en la tabla 6.

Reutilización del 100% de RA con emulsión en central para capa de rodadura

Con el conjunto de resultados se optó por seleccionar como mejor mezcla para capa de rodadura la formulación correspondiente a la denominada Mezcla II, de

menor módulo de rigidez y mayor resistencia a la acción del agua.

Tabla 2. Especificaciones de la emulsión C60BP4 REC

Característica	Unidad	Norma UNE	Mínimo	Máximo(mm)
<i>Emulsión original</i>				
Polaridad de las partículas	-	EN 1430	Positiva	
Índice de rotura	g	EN 13075-1	110	195
Contenido de ligante (por cont. en agua)	%	EN 1428	58	62
Tiempo de fluencia (2 mm, 40°C)	s	EN 12846-1	15	70
Contenido de fluidificante por destilación	%	EN 1431	-	2
Tendencia a la sedimentación (7 días)	%	EN 12847	-	10
Residuo de tamizado (0,5 mm)	%	EN 1429	-	0,10
Adhesividad	%	EN 13614	90	-
<i>Residuo por destilación</i>		EN 1431		
Penetración (25°C)	0,1 mm	EN 1426	-	100
Punto de reblandecimiento	°C	EN 1427	46	-
Cohesión (péndulo Vialit) o	J/cm ²	EN 13588	0,5	-
Cohesión (Fuerza – ductilidad 5°C)	J/cm ²	EN 13589	0,5	-
Recuperación elástica a 25°C	%	EN 13398	50	-

Tabla 3. Contenidos de emulsión, betún y agua en las fórmulas ensayadas

Componente	Mezcla I	Mezcla II
Emulsión C60BP4 REC (%)	3,5	4,0
Betún residual de la emulsión (%)	2,1	2,4
Betún contenido en el RA (%)	5,0	5,0
Betún total en la mezcla (%)	7,1	7,4
Agua de pre-envuelta (%)	2,5	2,0
Humedad promedio del RA (%)	2,1	2,1
Agua total (%)	4,6	4,1
Fluidos totales (emulsión+agua) (%)	8,1	8,1

Tabla 4. Resultados de los ensayos volumétricos y de compactación estática

Componente	Mezcla I	Mezcla II
Emulsión C60BP4 REC (%)	3,5	4,0
Agua de pre-envuelta (%)	2,5	2,0
Densidad máxima (g/cm ³)	2,544	2,532
Densidad geométrica (g/cm ³)	2,222	2,226
Densidad s. s. s (g/cm ³)	2,24	2,259
Huecos en mezcla (%)	11,8	10,8
Módulo de rigidez a 7 días (MPa)	3602	2813
Módulo de rigidez a 17 días (MPa)	4162	3502
Módulo de rigidez a 31 días (MPa)	5098	4036

Tabla 5. Sensibilidad al agua

Propiedad	Mezcla I		Mezcla II	
	Vía seca	Vía húmeda	Vía seca	Vía húmeda
Densidad aparente (g/cm ³)	2,264	2,267	2,269	2,270
Resistencia a tracción indirecta (kPa)	454	300	438	343
Relación resistencia húmedo/seco	66%		78%	

Tabla 6. Resistencia a deformaciones plásticas mediante el ensayo en pista de laboratorio

Componente	Mezcla I	Mezcla II
Relación resistencia húmedo/seco	0,111	0,143



Figuras 3 y 4. Fabricación y puesta en obra de la mezcla reciclada en capa de rodadura

2.3 Fabricación y puesta en obra

Una vez completados los estudios de formulación indicados, el 19 de julio de 2023 se empleó la mezcla II en la construcción de un tramo experimental de 120 m de longitud, en el PK 1+600 de la carretera LP-3322. La nueva mezcla reciclada en frío para capa de rodadura se produjo en una central de fabricación instalada a pie de obra, de 150 t/h de capacidad, equipada con tres tolvas para alimentación de áridos y RA, y dispositivos para la dosificación automática de la emulsión y el agua de pre-

envuelta. Para la puesta en obra se empleó una extendidora convencional, un compactador tándem de 15 t y un compactador de neumáticos de 35 t, extendiéndose una capa de 5 cm de espesor sobre todo el ancho de la calzada.

3 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En octubre de 2023 se iniciaron los ensayos sobre la capa terminada para determinar los valores de macrotextura superficial y resistencia al deslizamiento que se

Tabla 7. Textura superficial por el método del círculo de arena (UNE EN 13036-1)

Medida	Volumen de arena (mm ³)	Diámetro círculo (mm)	Profundidad media (mm)
1	25.000	134,4	1,76
2	25.000	134,1	1,77
3	25.000	134,0	1,77
4	25.000	133,7	1,78
Valor medio obtenido (6.10.2023)s (g/cm ³)			1,77

Reutilización del 100% de RA con emulsión en central para capa de rodadura

muestran en las tablas 7 y 8, respectivamente, y se extrajeron testigos de 100 y 150 mm de diámetro para evaluar sus propiedades mecánicas: módulo resiliente,

Tabla 8. Coeficiente de resistencia al deslizamiento con el péndulo TRRL (NLT-175/98)

Medida	CRD TRLL
1	70
2	75
3	74
4	79
Valor medio (10.10.2023)	75

ensayo Fénix y resistencia a la fisuración.

En la Tabla 9 se recogen los valores medios de espesor, densidad geométrica, huecos y módulo de rigidez (de acuerdo a la norma UNE-EN 12697-26, Anexo C) obtenidos sobre la capa de rodadura de los testigos extraídos del tramo experimental. Además, a modo de referencia, se han incluido los valores obtenidos sobre testigos de la capa intermedia, correspondientes a una mezcla en frío reutilizada en central conteniendo un 3,5% del mismo tipo de emulsión C60BP4 REC. La mezcla de la capa de rodadura presenta un módulo de 3595

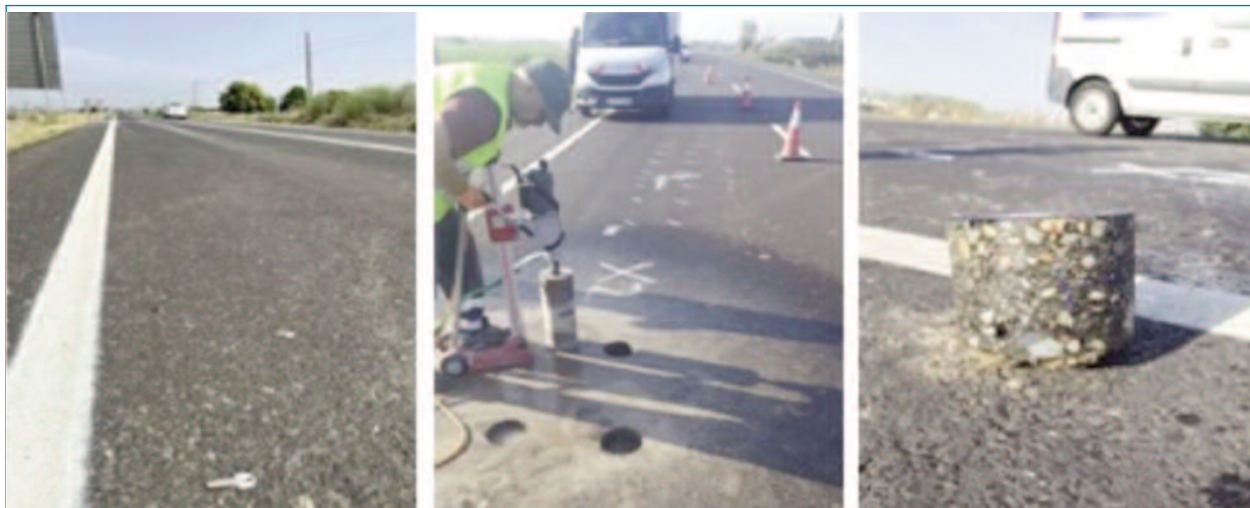
MPa, superior a los 2596 MPa correspondientes a la mezcla de la capa intermedia. Esto puede ser debido a la mayor exposición al ambiente de la capa de rodadura,

que junto con un menor espesor respecto a la capa intermedia, facilita el proceso de curado de la mezcla, adquiriendo consistencia más rápidamente. Este valor del módulo es similar al obtenido sobre las probetas a los 17 días en laboratorio (ver tabla 4).

Sobre los testigos extraídos también se ha realizado el ensayo Fénix, de acuerdo a la norma NLT-383, con objeto de evaluar la resistencia a la fisuración, ductilidad y tenacidad de la mezcla. En la tabla 10 se recogen los principales resultados del ensayo; al igual que en el caso de los módulos, se incluyen en la tabla, a modo de refe-

Tabla 9. Espesor, densidad y módulo de los testigos extraídos del tramo experimental

Capa	Espesor (mm)	D. geom. (g/cm ³)	Huecos (%)	Módulo (MPa)
Rodadura	37.4 mm	2.037	19,5	3595
Intermedia	48.3 mm	2.03	20,2	2596



Figuras 5, 6 y 7. Capa de rodadura terminada y extracción de testigos para su ensayo

Tabla 10. Valores medios de los principales parámetros del ensayo Fénix

Capa	Temperatura (°C)	D. geométrica (g/cm ³)	RT (MPa)	DT (mm)	RT•DT (MPa•mm)
Rodadura	-5	2,048	0,32	0,23	0.07
	5	2,051	0,34	0,25	0.09
	20	2,066	0,18	0,43	0.08
Intermedia	-5	1.955	0,29	0,27	0.08
	5	1.944	0,29	0,27	0.08
	20	1.997	0,18	0,69	0.12

rencia, los resultados correspondientes a la capa intermedia.

En la figura 8 se han representado estos parámetros en el diagrama Fénix. Este gráfico permite analizar la variación de la resistencia y la ductilidad de la mezcla con la temperatura; en abscisas se representan los valores de la resistencia a tracción y en ordenadas los de desplazamiento de tenacidad, a las temperaturas de ensayo de 20, 5 y -5°C. En este diagrama se indican unos límites que, de acuerdo con la experiencia de los autores del método de ensayo [3] separan el comportamiento de la mezcla en frágil, dúctil o muy dúctil (líneas verticales), así como el de las mezclas con baja resistencia (línea horizontal). Igualmente, se representan las curvas de isotenacidad, para las que el producto RT*DT se mantiene constante.

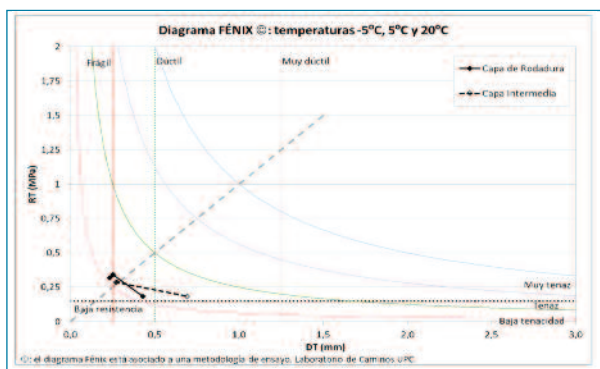


Figura 8. Diagrama Fénix para las mezclas reutilizadas en frío de las capas de rodadura e intermedia

En la misma figura 8 se observa cómo al bajar la temperatura, para cualquiera de las dos mezclas, la ductilidad disminuye y la resistencia aumenta, aunque la tenacidad se mantiene prácticamente constante. A 20°C, la

ductilidad de la mezcla de la capa de rodadura es menor que la de la capa intermedia, como consecuencia, probablemente, de su mayor rigidez, aunque las resistencias son similares, lo que le confiere una ligera mayor tenacidad a la mezcla de la capa intermedia; en cambio, a bajas temperaturas prácticamente no hay diferencias entre las resistencias, ductilidad y tenacidades de las dos mezclas.

También, se ha comparado la resistencia a la propagación de fisuras, según UNE-EN 12697-44 (ensayo a flexión de una probeta semicircular) de la nueva mezcla reutilizada para capa de rodadura con la de la mezcla reutilizada puesta en obra como capa intermedia con emulsión convencional tipo C60B5 REC. En el procedimiento de ensayo se ha seguido las variantes recogidas en el documento "procedimiento experimental 3, revisión 1" de Aleas, donde la velocidad de rotura se incrementa de 5 a 50 mm/min y el grosor de la entalla de 0,4 a 4,0 mm). Los resultados presentados en la tabla 11 muestran una mejor respuesta de la mezcla reutilizada en capa de rodadura que, a las dos temperaturas ensayadas, es más resistente y dúctil que la mezcla reutilizada en capa intermedia.

Finalmente, se procedió a la extracción y caracterización del ligante de los testigos ensayados, destacando que se obtuvo un contenido de ligante del 6,3% s/m de ligante en la capa de rodadura con emulsión C60BP4 REC con una recuperación elástica de 34%, frente a un contenido del 6,7% s/m y una recuperación elástica del 16% en la mezcla la capa intermedia elaborada con emulsión C60B5 REC. Se trata de resultados que deben interpretarse con toda precaución, debido a las dispersiones de espesores, de granulometrías y de contenido

Reutilización del 100% de RA con emulsión en central para capa de rodadura

Tabla 11. Resistencia a la propagación de fisuras según UNE-EN 12697-44

Propiedad (valores medios)	Rodadura C60BP4 REC	Intermedia C60B5 REC
Deformación vertical a 20°C (mm)	1,17	0,965
Resistencia a rotura a 20°C (N/mm)	5,78	3,54
Deformación vertical a 5°C (mm)	0,94	0,58
Resistencia a rotura a 5°C (N/mm)	9,51	8,17

de ligante propias de los testigos de mezclas reutilizadas, además de que la mezcla de ligantes que tiene lugar durante los ensayos de extracción puede afectar a la representatividad de las muestras ensayadas.

4. CONCLUSIONES

Transcurridos seis meses de su puesta en obra, el tramo experimental construido y sometido a la acción de un tráfico de categoría T31, continúa mostrando un aspecto similar al de una capa de mezcla bituminosa en caliente tipo AC16 S de nueva fabricación y un correcto comportamiento en servicio, sin que se haya requerido protección para prevenir desprendimientos superficiales ni siquiera en el momento de su apertura al tráfico. A la luz de esta experiencia, puede concluirse que la reutilización con emulsión en central facilita la producción de mezclas bituminosas en frío en condiciones controladas, con cualquier proporción de RA, procedente de la propia obra o exógeno, y satisfaciendo los criterios de diseño de mezclas más exigentes. Además, gracias a su puesta en obra con medios convencionales, las capas de mezclas reutilizadas en frío en central presentan una regularidad transversal y longitudinal comparable a la obtenida con las capas de nuevas mezclas bituminosas en caliente, lo que las hace aptas para su uso como capas de rodadura y elimina la necesidad de prever recubrimientos mínimos. La producción en central ofrece, en definitiva, la posibilidad de ampliar significativamente el campo de aplicación de las mezclas reutilizadas con emulsión que así podría extenderse, además de a las capas de rodadura de las vías de baja intensidad de tráfico, al resto de capas en las categorías de tráfico que hoy se hallan excluidas del alcance de las tecnologías en frío. Los eventuales incrementos de costes económicos o ambientales derivados de la disposición de una central de fabricación, el uso de ligantes modificados o el tratamiento del RA, deben considerarse después de contar



Figura 9. Capa de rodadura terminada

con el mayor valor de estas nuevas mezclas o la diferente durabilidad de las alternativas comparadas.

5. REFERENCIAS

- [1] OC 2/2023 Sobre reutilización de capas de firmes y pavimentos bituminosos. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agencia Urbana. Secretaría de Estado de Infraestructuras, Transporte y Vivienda. Dirección General de Carreteras. Madrid, abril de 2023.
- [2] Miró, R., Martínez, A.; García Siller, A.; Ortiz Ripoll, J.; Navarro, A. (2024): Reutilización en frío en central de mezclas bituminosas. Nuevas experiencias. XXII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Granada, 22 al 26 de abril de 2024
- [3] Pérez Jiménez, F.E., Miró Recasens, R., Martínez Reguero, A.H., Botella Nieto, R., López Montero, T., 2019. Classification and design of bituminous mixtures based on the variation of their strength and toughness with temperature: Fenix stress-strain diagram. 26th World Road Congr. Abu Dhabi 2019 Connect. Cult. Enabling Econ. 1–14.