

# La carretera es la cantera: 100% reciclado

**Nuria Uguet Canal,**  
nuria.uguet@eurovia-es.com  
**Teresa Marín Cuenda,**  
teresa.marin@eurovia-es.com  
**Alfonso Pérez García,**  
alfonso.perez@eurovia-es.com  
**Yannick Marquet,**  
yannick.marquet@eurovia.com

**Olivier Petry,**  
olivier.petry@eurovia.com  
**Jacques-Antoine Decamps,**  
jacques-antoine.decamps@eurovia.com  
**Nathalie Paquet,**  
nathalie.paquet@eurovia.com

La reducción de residuos mediante su reincorporación a la cadena productiva es una necesidad emergente para reducir el impacto ambiental de las actividades industriales. Además, la valorización de residuos es una alternativa interesante para aumentar y diversificar la actividad de las empresas.

En el caso de las mezclas bituminosas, se llevan produciendo experiencias de reciclado y reutilización de material proveniente de fresado con resultados positivos desde hace más de tres décadas. Mientras tanto, se estima que en España se generan 1,5 millones de toneladas anuales de residuos de mezclas asfálticas. La obligatoriedad de incorporar material fresado en las mezclas asfálticas es cada vez más acuciante, ya que constituye una solución medioambientalmente sostenible y muy rentable desde el punto de vista económico para el mantenimiento de carreteras, minimizando las molestias directas e indirectas durante la fase de construcción, y reduciendo la huella ambiental de las operaciones de rehabilitación. El presente artículo propone una novedosa metodología de fabricación que permite, por primera vez a nivel mundial, la elaboración de una mezcla asfáltica en caliente empleando un 100% de material obtenido del fresado de carreteras como materia prima mineral. Esta tecnología se ha aplicado en una autovía de alta intensidad de tráfico en todas las capas de ésta (base, intermedia y rodadura) con excelente resultado.

**Palabras Clave:** Reciclado, carretera, fresado, aglomerado, ligante.

The reduction of waste through its reincorporation into the production chain is an emerging need to reduce the environmental impact of industrial activities. Furthermore, the recovery of waste is an interesting alternative to increase and diversify the activity of companies.

In the case of bituminous mixtures, experiences of recycling and reuse of material from milling have been produced with positive results for more than three decades. Meanwhile, it is estimated that in Spain 1,5 million tons of asphalt mix waste are generated annually.

The mandatory incorporation of milled material in asphalt mixes is becoming more and more pressing, as it constitutes an environmentally sustainable and very cost-effective solution for road maintenance, minimising direct and indirect disturbance during the construction phase, and reducing the environmental footprint of rehabilitation operations. This paper proposes a novel manufacturing methodology that allows, for the first time in the world, the production of a hot mix asphalt using 100% road milling material as the mineral raw material. This technology has been applied on a motorway with high traffic intensity in all its layers (base, intermediate and wearing course) with excellent results.

**Keywords:** Recycled, road, milling, chipboard, binder.

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde principios del siglo XXI, el reciclaje de mezclas asfálticas experimentó un nuevo auge vinculado, por un lado, a recomendaciones de la Administración con la redacción de la circular OC 8/2001, relativa a la reutilización de fresado en la red de carreteras del estado y, por otro lado, a los avances tecnológicos de los fabricantes de plantas de mezcla bituminosa. Esta normativa se revisó y actualizó en 2017 permitiendo mayores porcentajes de material fresado.

Tanto Administración como empresas del sector han podido ofrecer nuevas soluciones de mantenimiento de carreteras empleando una proporción creciente de materiales reciclados, pero también integrando el impacto social y ambiental que se debe tener en cuenta más que nunca.

A título comparativo, el consumo de fresado es del orden del 80% en algunos países europeos como Alemania y Holanda, o en Estados Unidos, y cerca del 100% en Japón. Probablemente, la tasa de renovación del parque de plantas asfálticas sea una explicación, aunque no todos los equipos tienen la capacidad de reciclar altas tasas. Las diferencias en la climatología también pueden influir sobre todo en otoño e invierno, cuando las temperaturas son más bajas y/o la probabilidad de lluvia mayor. También se observa un impedimento no menos importante que los dos anteriores: el cambio de hábitos. Se tiene la imagen de que las mezclas con fresado son de peor calidad que las mezclas con 100% de árido virgen. Para mitigar esta imagen de este tipo de mezclas, se están haciendo estudios en diferentes países para demostrar que la calidad de estas mezclas es comparable a las mezclas sin fresado.

## 2. BENEFICIOS DE UN PROYECTO CON MEZCLAS CON UN 100% DE MATERIAL FRESADO

Los beneficios de un proyecto de reciclado 100% en caliente son múltiples:

- Superar las barreras tecnológicas que limitan hasta ahora la tasa de reciclaje de las mezclas en caliente.
- Proponer una solución ecológica y económica para la construcción y mantenimiento de pavimentos con una disminución significativa de la huella ambiental de una operación de mantenimiento de carreteras.
- Reducir las molestias directas e indirectas generadas por la construcción de carreteras.

"La carretera 100% reciclado" es un concepto que integra:

- Planta asfáltica móvil sin precedentes.
- Investigación en laboratorio para ampliar el conocimiento de corrección de ligantes y formulaciones de mezclas con tasas muy altas de fresado (entendiendo por corrección a la adición de aditivos que mejoren las propiedades del ligante existente en el fresado).
- Metodología de producción de un fresado que permita su incorporación a tasas muy altas en todo tipo de formulaciones de mezclas.
- Organización de la obra y de las herramientas adaptadas a las exigencias específicas para grandes obras de construcción.

Se presentó esta idea en Francia y fue seleccionada durante la convocatoria de proyectos "Camino al futuro" del Programa de Inversión (PIA, edición 2015), liderado por Ademe (Agencia de la transición ecológica francesa).

La obra experimental debía llevarse a cabo en condiciones reales para verificar la viabilidad técnica, económica y organizativa de la innovación.

En el contrato de conservación del tramo Pons/ Saint-Aubin-de-Blaye de la autopista A10 de la red ASF de Vinci Autopistas se aprovechó para proponer la realización de un tramo experimental. Tras un análisis técnico conjunto, se seleccionaron los siguientes tramos de obra:

- Un primer tramo consistente en una operación de fresado y reposición más refuerzo. Se trata de la renovación del carril lento de una mezcla gruesa 100% reciclada a 15 cm de espesor (fresado y posterior reposición) y la extensión de una capa de rodadura a ancho completo constituida por una mezcla bituminosa semidensa de 6 cm con un 95% de material fresado.
- En un segundo tramo se aplica una capa de rodadura de refuerzo con una mezcla bituminosa discontinua reciclada al 70% y puesta en obra en el marco de las obras de mantenimiento de la autopista (figura 1).

Hay que señalar que, paralelamente a esta prueba, se fabricaron y extendieron en toda la obra varias decenas de miles de toneladas de mezclas con una elevada tasa de reciclado (> 70%).

Después de más de dos años de investigación, en octubre de 2018 se ejecutó la carretera 100% reciclada.

El tramo experimental ha sido objeto de seguimiento de las

características de las mezclas durante un año. El proyecto Ademe «La carretera 100 % reciclada» concluyó en octubre de 2019. No obstante, con el fin de evaluar el comportamiento a lo largo del tiempo de estas fórmulas específicas, se tiene previsto proseguir este seguimiento a lo largo de tres años.

fluctuaciones de los precios:

- Minimiza la compra de materias primas: áridos y betún.
- Reduce el transporte.
- Reduce el consumo energético de la planta de fabricación. Al tratarse de una planta con un diseño único, con

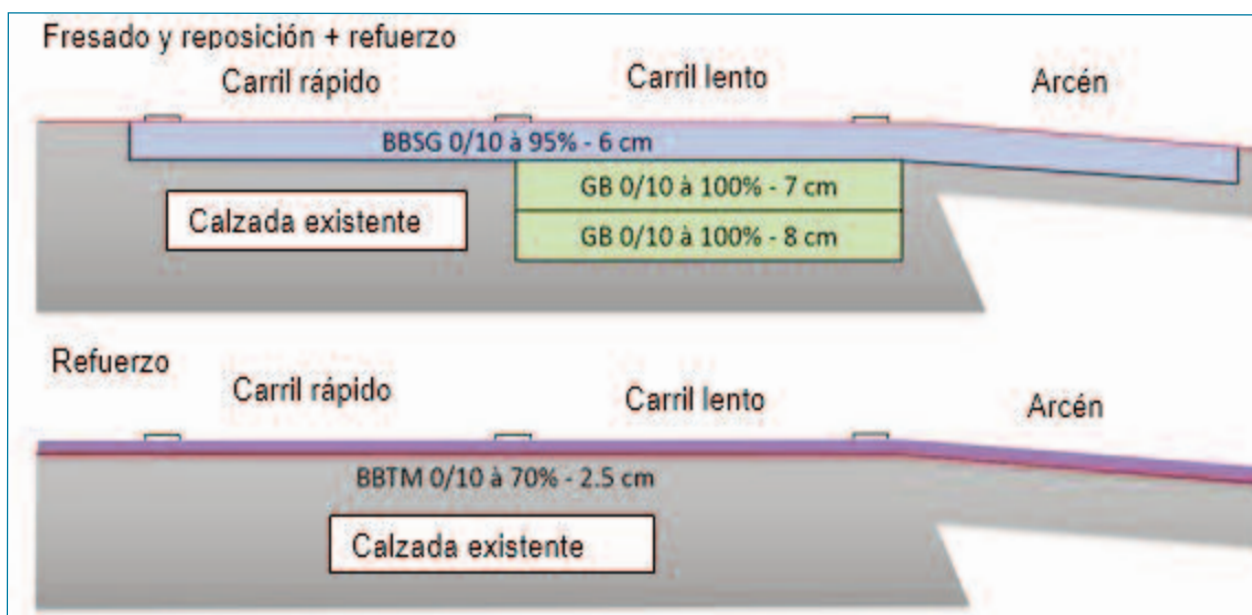


Figura 1. Estructura de los dos tramos de prueba

### 3. OBJETIVOS DE LA CARRETERA 100% RECICLADA

«La carretera 100% reciclada», se fijó numerosos objetivos.

#### 3.1 Objetivos técnicos

Los impedimentos para llevar a cabo una carretera 100 % reciclada eran a la vez técnicos (control de los recursos), tecnológicos (maquinaria de producción) y organizativos (procesos industriales para la obra).

El objetivo consistía en valorizar plenamente el fresado proveniente de la carretera existente y demostrar la calidad técnica de una calzada renovada de esta manera.

#### 3.2 Objetivos económicos

Los costes de las operaciones de mantenimiento en carretera representan cada año millones de euros. La carretera 100% reciclada contribuye a reducir la exposición de la actividad a las

un solo quemador pero dos tambores, el aire caliente que calienta el árido en el primer tambor, pasa por el segundo, calentando el fresado. Si comparamos este sistema con uno con un tambor y un quemador (donde el fresado no se precalienta, sino que el intercambio térmico se realiza por contacto entre el árido virgen y el fresado), el consumo energético en el caso de TRX-100 es inferior. Si se compara con una planta de doble tambor, el consumo con el sistema de Eurovia también será menor porque tiene un único quemador.

Los resultados de la evaluación de los ligantes recuperados de las mezclas MAC F10 y MAC F10 (R44%) utilizando AM3 y AM3 LT se muestran en Tabla 3:

#### 3.3 Objetivos sociales y medioambientales

La industria del transporte por carretera es esencial para mantener un nivel de servicio eficiente de las infraestructuras de transporte, lo que constituye un reto importante para una sociedad y su economía. Sin embargo, como toda actividad humana, es fuente de impactos directos o indirectos, positivos

## La carretera es la cantera: 100% reciclado

o negativos para la sociedad. La carretera 100% reciclada se propone disminuir significativamente las principales molestias generadas por la construcción por carretera que son:

- El tráfico relacionado con el transporte de materias primas: fuente de contaminación atmosférica, ruido, etc... El tráfico de vehículos pesados daña la red de carreteras (genera costes indirectos relacionados con el mantenimiento de las carreteras). Con la carretera 100% reciclada, el tráfico por carretera relacionado con el transporte de materias primas se ha reducido en más de un 50%.
- El consumo de recursos naturales: la carretera 100% reciclada permite, por una parte, preservar las canteras de áridos y, por otra, reciclar in situ y en su totalidad del fresado producido en la obra, evitando el uso de vertederos.
- La contaminación del aire y el cambio climático: la carretera 100% reciclada contribuye a reducir significativamente las emisiones a la atmósfera.

La importante disminución de las molestias debe conducir a una mayor aceptación de las instalaciones (plantas de mezclas bituminosas) y de las canteras. La carretera 100% reciclada ha sido diseñada para reducir la huella ambiental de una operación de mantenimiento de carreteras.

### 4. LOS IMPEDIMENTOS

Como se apuntó anteriormente, es innegable que varios impedimentos tecnológicos limitaban el reciclaje en caliente a elevada tasa.

#### 4.1 Calidad y homogeneidad de los recursos: control de los fresados

Sin áridos vírgenes de aportación, la producción de mezclas fabricadas a partir del 100% de fresado requiere de un control perfecto de la granulometría de los fresados entrantes, de su contenido en ligante y de las características intrínsecas de los áridos constitutivos de estos fresados. Ahora bien, los fresados suelen tener una curva granulométrica continua 0/20 y presentan en la mayoría de los casos una variabilidad importante de sus características. Por lo tanto, no es posible diseñar fórmulas de mezclas precisas sin recurrir a materiales de aportación (áridos y betún) y esto limita la tasa de incorporación de fresado.

El reto consiste, por tanto, en desarrollar nuevos procesos de tratamiento de fresado eficaces y fiables.

#### 4.2 Tecnología de las plantas de aglomerado

Los áridos del fresado no soportan el contacto directo con la llama del quemador; las altas temperaturas provocan la degradación de la película de ligante y generan emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV). Por lo tanto, el calentamiento del fresado se realiza generalmente por intercambio térmico con áridos vírgenes previamente calentados entre 250 y hasta más de 300°C. El principio consiste en introducir fresado en el tambor lejos de la llama en el anillo de reciclaje, en una zona donde la temperatura de los gases no es excesiva.

Existen plantas fijas de aglomerado que deberían ser capaces, al menos en teoría, de producir mezclas con fresado al 100%. Sin embargo, estas plantas de producción son complejas, voluminosas y no están diseñadas para ser trasladadas de una obra a otra. El reto consistía, por tanto, en diseñar un nuevo tipo de planta de aglomerado móvil, eficiente, de bajo impacto medioambiental y capaz de reciclar el 100% del fresado, un equipo que no existía en el mercado.

#### 4.3 Durabilidad de las mezclas con alta tasa de reciclado: corrección de ligantes

La calidad de los ligantes es un parámetro esencial en la durabilidad y el comportamiento de la mezcla. Ahora bien, el betún contenido en el fresado presenta características heterogéneas y está endurecido. En los procesos con una tasa de reciclado muy elevada, la principal dificultad reside en la capacidad de regenerar las características reológicas del ligante minimizando las aportaciones externas (betún de aportación, aditivo de reciclado). Para ello es necesario responder a varias preguntas: ¿Cómo favorecer la regeneración del betún presente en el fresado durante su paso por la planta de aglomerado? ¿Cómo seleccionar los aditivos adecuados (en términos cualitativos y cuantitativos)? ¿Cómo garantizar una mezcla homogénea en la instalación? ¿Cómo predecir el comportamiento en el tiempo de la nueva mezcla fabricada?

El reto consiste en desarrollar las reglas de corrección de los ligantes del fresado y utilizar aditivos en la formulación de mezclas con tasa elevada de reciclado.

### 5. LAS SOLUCIONES

Se diseñó y desarrolló la carretera 100% reciclada, constituida por más del 95% de fresado, con los aditivos necesarios para la corrección de ligantes. Esta calzada cumple todas las especificaciones técnicas de una calzada tradicional, minimizando al mismo tiempo la huella medioambiental.

Las innovaciones desarrolladas pretenden solventar los tres impedimentos tecnológicos actuales que se refieren a la vez a los métodos, los equipos y los procedimientos:

- En el caso de los retos relativos a calidad y homogeneidad de los fresados y durabilidad de las mezclas recicladas, se demostró a gran escala el control de la elaboración y la utilización de fresado. Esto también puso a prueba los métodos desarrollados en el laboratorio de corrección de ligantes.
- Para el reto relativo a la planta de producción, se ha co-desarrollado una planta de aglomerado móvil de nueva generación (foto 1).

- La primera consiste en el análisis histórico de la obra, generalmente conocido en la red de autopistas adjudicada, con el fin de tener una primera aproximación de la naturaleza de las mezclas existentes, su edad y su composición (áridos y ligante). Se completará con el análisis de los resultados de los testigos de auscultación.

Tras el análisis de estos datos se establece una primera clasificación del material en familias con productos del mismo tipo o características equivalentes. Ésta se hace de acuerdo con la lógica de la obra y la extracción de los testigos complementarios se lleva a cabo de manera que se respete un muestreo regular a razón de uno cada 1000 toneladas.

- La segunda etapa de la caracterización consiste en realizar tomas de muestras para completar los datos y analizar con mayor precisión las características de cada familia de fresado. El objetivo de los ensayos es caracterizar los áridos y ligante en términos de calidad y regularidad.



Foto 1. Imagen de la planta de aglomerado móvil de nueva generación

### 5.1 Auscultación y caracterización del fresado

Antes de cualquier operación de alta tasa de reciclado, conviene caracterizar el recurso fundamental de las futuras mezclas: el fresado. La caracterización se realiza en varias etapas:

En esta fase, los ensayos realizados a los áridos son el análisis granulométrico y la densidad real. En lo que respecta a los ligantes del fresado, los ensayos tradicionales de penetración a 25 °C y temperatura anillo y bola se completan con ensayos no convencionales: viscosidad,

## La carretera es la cantera: 100% reciclado

análisis por espectrómetro de infrarrojo para evaluar los índices de oxidación y las características reológicas utilizando un reómetro DSR (Dynamic Shear Rheometer).

El análisis de todos estos resultados es lo que determina las diferentes familias de fresado y sus procesos de elaboración. Cada obra es un caso único y requiere de este enfoque para garantizar el control de la homogeneidad del fresado y de las mezclas que se fabriquen.

- Para el uso en una fórmula de mezcla continua y porcentajes de reciclado hasta del 70%, la homogeneidad de las diferentes familias hace posible el uso del fresado proveniente directamente de la obra, es decir, sin otro tratamiento más que un acopio antes de la fabricación.

- En cambio, para las fórmulas de la carretera 100% reciclada, es necesario el machaqueo y cribado de los fresados una vez fresada la carretera. El objetivo de esta operación es recomponer un esqueleto granular controlado para la mezcla, con niveles de finos y de arena controladas, y ajustar el contenido de ligante del fresado para poder corregirlo (foto 2).

La operación dio lugar a tres cortes de fresado de granulometrías 0/5, 5/10 y 10/25 mm. Las formulaciones de la prueba se realizaron con los cortes 5/10 y 10/25. Cabe señalar que estos cortes, una vez extraído el betún, tienen curvas granulares de mezclas bituminosas tipo 0/6 y 0/10. La fracción

0/5 se ha aprovechado en producciones anejas a la cantera.

### 5.2 Formulación

Como todo trabajo de formulación, el diseño de una fórmula con un elevado porcentaje de fresado comienza por una caracterización precisa de los materiales disponibles. Esto es tan importante porque el ligante del fresado ya ha pasado por un primer ciclo de envejecimiento y es inevitable que sea mayoritario en el ligante total de estas formulaciones con tasa muy elevada de reciclado. En función de las cantidades disponibles de cada lote de fresado y de sus características, los lotes de fresado se dedicaron a determinadas formulaciones y no a otras.

Con el fin de simplificar la logística, se ha elegido un único ligante de aportación para el conjunto de las fórmulas de la obra. El análisis de los fresados y del ligante de aportación se presenta en la tabla 1 [1].

En el marco de este proyecto, el estudio de formulación se realizó con un enfoque basado en prestaciones que, en el caso del ligante, iban encaminadas a la obtención de prestaciones de un módulo complejo ( $G^*$  15°C, 10 Hz) del ligante de la mezcla en DSR equivalente al de un betún 35/50, es decir, 20-45 MPa. Para controlar las prestaciones a baja temperatura, los ligantes de la mezcla se evaluaron con el ensayo BBR (Bending Beam Rheometer) antes y después del envejecimiento [2]. Pa-



Foto 2. Cribado y acopio de las fracciones de fresado

ra este envejecimiento se utilizó el ensayo PAV (Pressure Aging Vessel): se realizaron 45 horas de ensayo PAV para los ligantes de las capas de rodadura y para las capas inferiores fueron suficientes 25 horas.

mismo tiempo una viscosidad suficiente y un tiempo de mezcla adecuado para garantizar la homogeneidad de la mezcla. Los ensayos de “desenvuelta secuenciada” [3] validaron la mezcla correcta de los ligantes (del fresado, de aportación y aditivo)

Tabla 1. Análisis de los fresados y ligante de aportación

Ensayo	Ligante de aportación 45/80-55	Ligante Fresado 0	Ligante Fresado 1	Ligante Fresado 2	Ligante Fresado 3
Penetración (1/10mm) EN 1426	46	10	15	13	27
Temperatura Anillo y Bola (°C) EN 1427	61,4	74	75,6	78,6	61,6
Viscosidad Dinámica a 160°C (mPa.s)	317	469	914	1570	311
Módulo Complejo G* - 15°C, 10 Hz (MPa)	20	96	72	74	31
ICO (%) – Determinación Infrarrojo	1,1	8	6,9	9,4	4

Para obtener el comportamiento deseado en los ligantes de la mezcla se utilizó un aditivo de reciclado. La dosificación de este aditivo tiene el fin de devolver al ligante del fresado a un intervalo correspondiente al módulo de cizallamiento habitual de un betún 35/50 (G\* 15°C, 10 Hz). En la figura 2 se presenta un ejemplo de la evolución del módulo en función del contenido de aditivo.

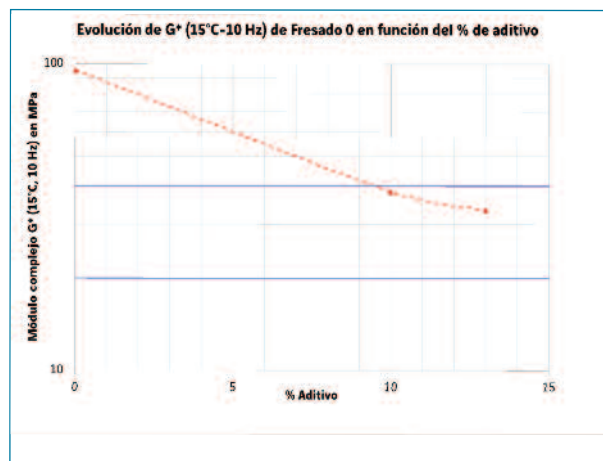


Figura 2. Evolución del módulo del fresado 0 en función del contenido de aditivo

Para acercarse lo más posible al funcionamiento de la planta de aglomerado diseñada para permitir el aumento de la temperatura controlada del fresado y la fabricación de mezclas con alta tasa de reciclaje, ha sido necesario adaptar el protocolo de fabricación en laboratorio: el fresado se calienta de manera que se conserven las prestaciones de su ligante, garantizando al

en las mezclas fabricadas en laboratorio.

Como ejemplo, en la figura 3 se muestran los resultados de una mezcla semidensa al 95% de fresado fabricado en laboratorio.

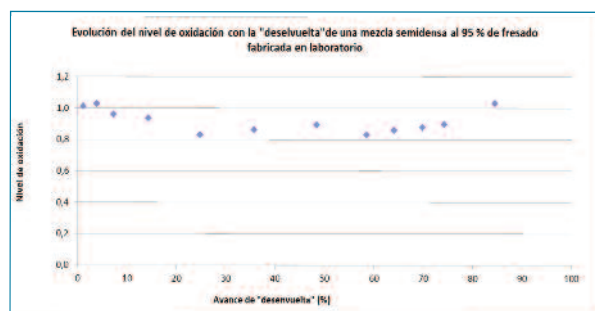


Figura 3. Evolución del nivel de oxidación de mezcla semidensa al 95 % de fresado

Este gráfico muestra que, gracias al protocolo aplicado, se obtiene una homogeneidad de la mezcla satisfactoria. En cuanto a la conservación del ligante, el índice medio de oxidación (ICO) apenas ha cambiado. Así pues, los métodos de fabricación elegidos en laboratorio han contribuido a obtener el objetivo buscado. Por consiguiente, este protocolo se ha utilizado para todas las fórmulas con un elevado porcentaje de fresado.

Para evaluar el riesgo de fisuración en el tiempo de las mezclas fabricadas, se realizaron ensayos de TSRST (Thermal Stress Restrain Specimen) antes y después del envejecimiento de la mezcla con arreglo al procedimiento RILEM (la mezcla se so-

Tabla 2. Composición de las fórmulas estudiadas

	Mezcla tipo G 100 %	Mezcla tipo S 95 %	Mezcla tipo BBTM 70 %
Fresado 5,5 /10	35,0 % Fresado 0	53,5 % Fresado 1	23,0 % Fresado 1
Fresado 10/25	13,9 % Fresado 0 y 50,6 % Fresado 1	40,0 % Fresado 1	47,0 % Fresado 1
6/10 Diorita	-	-	15,6 %
0/2 Diorita	-	3,7 %	10,9 %
Filler calizo	-	1,5 %	1,5 %
Aditivo de reciclado	SI	SI	SI
Betún de aportación 45/80-55	-	0,8 %	1,7 %
Ligante total	5,0 %	5,2 %	5,0 %

mete 4 horas a 135 °C y luego 9 días a 85 °C [4]).

La composición de las fórmulas se expone en la tabla 2.

Las prestaciones de los ligantes extraídos de las mezclas fabricadas en laboratorio figuran en la tabla 3.

Los resultados de los ensayos de formulación de las mezclas se presentan en la tabla 4.

El conjunto de este programa de estudio demuestra que el reciclado a tasa muy elevada es posible siempre que se disponga de un fresado adecuado, y que la obtención de productos de altas prestaciones es realista, siempre que se controle plenamente la calidad de todos los componentes.

Tabla 3. Prestaciones de los ligantes extraídos de las mezclas de laboratorio

Ensayo	Ligante extraído mezcla tipo G 100 %	Ligante extraído mezcla tipo S 95 %	Ligante extraído mezcla tipo BBTM 70 %
Penetración (1/10mm) EN 1426	17	18	15
Temperatura Anillo Bola (°C) EN 1427	71	71,8	78,2
Viscosidad Dinámica a 160°C (mPa.s)	546	627	868
Módulo complejo G* - 15°C, 10 Hz (MPa)	55,9	44,2	46,6
BBR antes de envejecimiento			%
T 300 MPa - 60 s (°C)	-14,3	-15,7	-15,1
BBR tras PAV	25 h	45 h	45 h
Ligante T 300 MPa - 60 s (°C)	-11,9	-15,1	,12,8

Se han obtenido los resultados buscados en todos los niveles. Esto sólo ha sido posible mediante una selección previa del fresado destinado a estas mezclas a tasa muy elevada. Inicialmente, estaba previsto fabricar la mezcla gruesa al 100% a partir de un único origen de fresado. La granulometría de los distintos cortes de fresado y el ligante final de la mezcla requirieron el uso de diferentes orígenes de fresado para obtener el comportamiento deseado.

## 6. TRAMO DE PRUEBA

La realización de la prueba en obra tuvo lugar en octubre de 2018. En el marco del proyecto «La carretera 100 % reciclada» se han realizado dos zonas distintas:

- Un primer kilómetro con fresado y reposición en el carril lento de 1500 t de mezcla gruesa al 100% de fresado se-



guido por 1400 t de mezcla semidensa 0/10 al 95% de tes extraídos se resumen en la tabla 5.

Tabla 4. Resultados de formulación de las mezclas de laboratorio

		Mezcla G 100 %	Mezcla S 95 %	Mezcla BBTM 70 %
Nivel 1	PCG (%)	4,8 (V120)	5,4 (V60)	14,1 (V25)
	ITSR (%)	92,6	89,3	98,9
Nivel 2	Pista - 30 000 ciclos (%)	1,8	3,6	5,9
	huecos (%)	8,6	6,1	10,9
Nivel 3	Módulo - 15°C, 10 Hz (MPa)	14781	10079	
	huecos (%)	5,1	8,5	
Nivel 4	Fatiga ( $\mu$ def)	128	130	
	huecos (%)	5,6	8,3	
TSRST antes de envejecimiento	Temperatura (°C)	-18,6	-23,6	
	Tensión de rotura (MPa)	5,0	4,5	
	Huecos (%)	3,6	3,7	
TSRST después de envejecimiento	Temperatura (°C)	-12,5	-12,1	
	Tensión de rotura (MPa)	3,4	1,1	
	Huecos (%)	5,4	9,5	

Tabla 5. Resultados de los ligantes extraídos de las mezclas de obra

Ensayo	Ligante extraído mezcla tipo G 100 %	Ligante extraído mezcla tipo S 95 %	Ligante extraído mezcla tipo.BBTM 70 %
Penetración (1/10mm) EN 1426	22	20	23
Temperatura Anillo y Bola (°C) EN 1427	66,4	70	69,8
Viscosidad Dinámica a 160°C (mPa.s)	294	394	368
Módulo Complejo G* - 15°C, 10 Hz (MPa)	48,7	47,8	33,4
BBR antes de envejecimiento			
T 300 MPa - 60 s (°C)	-15,2	-15,6	-17,7

fresado como capa de rodadura que cubre el ancho completo.

- Una segunda zona de un kilómetro de refuerzo constituida por 620 t de capa de rodadura de mezcla discontinua 0/10 al 70% de fresado aplicada en ancho completo (figura 1).

La fabricación se desarrolló sin ningún problema, con una regularidad de producción notable. Las pruebas de laboratorio también mostraron una mezcla perfecta y una homogeneización del ligante del fresado con los aditivos de reciclado. Los resultados de los ligantes

extraídos son inferiores o equivalentes a los medidos en las fabricaciones de laboratorio (tabla 3). El sistema de calentamiento de los materiales de la planta TRX 100% protege al ligante de una "sobreoxidación" durante la fabricación. Las características a baja temperatura del ligante de la mezcla determinadas con el ensayo BBR también corroboran los estudios de formulación.

En cuanto a la puesta en obra, las mezclas con alta tasa de reciclado se han comportado igual que las mezclas convencionales. El único punto que hay que destacar es la necesidad de una energía de

## La carretera es la cantera: 100% reciclado

compactación ligeramente superior para mezclas gruesas y semiden-  
sas. El porcentaje de huecos y la macrotextura cumplen las especifica-  
ciones normativas. (tabla 6).

kilómetros en todas las redes. La calidad y la homogeneidad de los  
materiales utilizados para la construcción de carreteras, permite bene-  
ficiarse de una materia prima de calidad fácilmente explotable.

**Tabla 6. Porcentaje de huecos y macrotextura**

	Porcentaje de huecos	Macrotextura (PMT)
Mezcla tipo G 100 %	4.1 % - [1.9 % ; 7.6 %]	-
Mezcla tipo S 95 %	6.6 % - [5.0 % ; 9.2 %]	0.82 mm – [0.68 mm ; 1.06 mm]
Mezcla tipo G 100 %	-	1.33 mm – [0.96 mm ; 1.72 mm]

Durante la fabricación en la planta TRX al 100%, se tomó mues-  
tra de la mezcla y se verificaron todas las características analizadas  
en los estudios de formulación. Estos resultados se presentan en la  
tabla 7.

El proyecto «La carretera 100% reciclada» realizado a finales de  
2018 ayudará a capitalizar aún más las características de estas nuevas  
mezclas fabricadas con antiguas mezclas.

Gracias a esta operación, se validaron un concepto de produc-

**Tabla 7. Resultados de las mezclas de obra**

		Mezcla G 100 %	Mezclas S 95 %	Mezclas BBTM 70 %
Nivel 2	Pista - 30 000 ciclos (%) huecos (%)	3,7	3,8	6,8
		3,9	7,4	11,5
Nivel 3	Módulo - 15°C, 10 Hz (MPa) huecos (%)	13422	12762	
		4,2	4,3	
Nivel 4	Fatiga ( $\mu$ def) huecos (%)	125	126	
		3,2	5,1	
TSRST Antes de envejecimiento	Temperatura (°C)	-19,85	-23,1	
	Tensión de rotura (MPa)	4,5	4,6	
	Huecos (%)	4,3	7,1	
TSRST Tras envejecimiento	Temperatura (°C)	-15,1	-22,1	
	Tensión de rotura (MPa)	3,8	3,4	
	Huecos (%)	5,0	10,0	

Los ensayos sobre los ligantes extraídos también son compati-  
bles con los resultados del estudio de formulación. Esta experiencia  
demuestra que, incluso a niveles muy elevados de fresado en las  
mezclas, los ensayos de laboratorio (con un protocolo adecuado) son  
adecuados para evaluar mejor el comportamiento de la mezcla.

## 7. CONCLUSIONES

Sabemos que la carretera es un enorme yacimiento de recursos,  
una cantera potencial que se extiende a lo largo de casi un millón de

ción ecológica desarrollado en un plazo récord de dos años. Los equi-  
pos técnicos y de investigación han puesto en práctica las compe-  
tencias adquiridas en el reciclado desde hace más de 15 años para  
desarrollar ensayos sobre ligantes y mezclas que permiten formular  
productos duraderos y conformes a las especificaciones.

El éxito de esta operación demuestra que es posible la produc-  
ción de mezclas con muy altas tasas de reciclado y debe servir para  
incrementar el empleo de este tipo de soluciones, imprescindibles pa-  
ra la industria vial.

## 8. REFERENCIAS

- [1] 1] T. Koudelka, P. Coufalik, M. Varaus, I. Coufalikova. 2019. "Rejuvenated Binders, Reclaimed Binders and Paving Bitumens, Are They Any Different?", France. RILEM 252-CMB 2018, pp. 208–214.
- [2] F. Delfosse, S. Gazeau, I. Drouadaine, J.-P. Planche, F. Turner, J. Rovani, 2017. "Corrélations entre composition chimique des bitumes et propriétés des enrobés", France. RGRA n° 949, pp 57-63.
- [3] F. Delfosse, J.A. Decamps, S. Gazeau. 2017. "Enrobés à base d'agrégats d'enrobés: qualification de l'homogénéité". France. RGRA n° 949, pp 52-56.
- [4] K. Mollenhauer, V. Moulliet, N. Pierard, M. Tusar, T. Gabet. 2012. "Laboratory aging of asphalt mixtures – simulation of reclaimed asphalt and application as test method for durability", 5th Eurobitume Congress,