

**RECICLADO EN FRÍO IN-SITU CON EMULSIÓN: EVALUACIÓN TÉCNICA DE LA SOLUCIÓN A LARGO
PLAZO A PARTIR DEL ESTUDIO DE CASOS**

Autores:

GT-2 Reciclado de firmes

Mar Subarroca Gella (Sorigué)

Nuria Uguet Canal (Eurovia Management España)

Autor para contacto:

Mar Subarroca

m.subarroca@sorigue.com.

660327144

Resumen

Los reciclados en frío in-situ con emulsión son una excelente manera de prevenir la producción de residuos en las obras de mantenimiento de carreteras. Su ejecución no es algo novedoso, pues se contempla en normativa desde el año 2001 cuando se publicó la OC 8/2001 que fue derogada y sustituida por la OC 40/2017, pero, con frecuencia, existe una falta de confianza en esta técnica o una sensación de riesgo cuando se aplica.

Esto puede ser debido a que, dado que son tratamientos que no se emplean como capa de rodadura, sus posibles patologías no son tan visibles como en el caso de éstas. Además, el empleo como herramienta para el diseño de un coeficiente de equivalencia, sin información adicional sobre el comportamiento estructural que permita ajustar el diseño de la solución, es otro factor que condicionará su estudio y selección. Por este motivo la evaluación técnica del comportamiento a largo plazo de los reciclados in-situ con emulsión se convierte en algo crucial.

Este artículo muestra el seguimiento realizado a dos obras de reciclado in-situ en frío con emulsión. En una de ellas se analiza la evolución de las deflexiones con el tiempo, determinando mediante cálculo inverso el módulo del reciclado y en otra, se realiza la determinación directa del módulo de la mezcla a medida que el reciclado madura.

Estos programas de seguimiento de las obras ejecutadas mediante esta técnica permitirían aumentar el conocimiento del comportamiento mecánico de este tipo de mezclas en frío y conseguir así que se puedan aplicar más soluciones a medida, en función de las características y necesidades concretas de la vía a tratar.

1. INTRODUCCIÓN

La consideración del empleo de la técnica de reciclado en frío con emulsión en el desarrollo de proyectos de rehabilitación de firmes ha venido sujeta a la aplicación de un coeficiente de equivalencia estructural respecto a mezclas bituminosas en caliente. A diferencia de otros materiales, en la normativa de dimensionamiento, para el Reciclado en frío con emulsión no son asignados valores de módulo de referencia ni leyes de fatiga que permitan la aplicación de métodos de cálculo estructural para la validación de las soluciones o el estudio de alternativas.

Por otro lado, dada la falta de experiencia en el empleo de la técnica y su presencia limitada entre las soluciones contempladas en los proyectos de rehabilitación de firmes, son escasos los datos recopilados a nivel nacional sobre el desempeño estructural de este tipo de solución.

En la presente comunicación se recoge el estudio de la evolución del desempeño estructural de dos firmes para los que se dispone de datos de seguimiento de su comportamiento a lo largo de los años en los que han estado prestando servicio. La recopilación de los datos relativos al comportamiento, tanto de la capa como del firme considerando las secciones empleadas, podrán contribuir a aproximarnos al conocimiento del desempeño funcional de la técnica y permitirá disponer de herramientas para superar la limitación a la prescripción de la solución a partir de coeficientes de equivalencia estructural.

2. PROYECTO DE MEJORA DE LA ESTRUCTURA DEL FIRME EN LA CARRETERA A-220 DEL P.K. 2+800 AL P.K. 19+700, TRAMO: LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA – CARIÑENA

La última actuación de rehabilitación estructural de la carretera A-220 en el tramo Almunia de Doña Godina -Cariñena fue abordada por el proyecto con clave RF-465-Z licitado en el año 2015 por parte de la Dirección General de Carreteras, Departamento de Obras Públicas, Urbanismo, Vivienda y Transportes del Gobierno de Aragón.

En el momento de la redacción del proyecto, la vía concentraba una intensidad de tráfico T2a, registrando la circulación de más de cinco mil vehículos diarios, de los cuales más de mil doscientos correspondían a vehículos pesados. Este volumen, la convertía en una de las carreteras con mayor volumen de pesados de la red autonómica aragonesa.

El tráfico soportado y el plazo de tiempo transcurrido desde la última intervención habían dado lugar a un firme fatigado, con presencia de fenómenos de asentamiento en la zona de rodera y aspecto envejecido. Entre las patologías identificadas se encontraba también la presencia de grietas longitudinales, grietas en malla fina y malla gruesa y la presencia de algún bache.

En cuanto al firme existente, se disponía de 20 cm de mezcla bituminosa en la mayor parte del tramo y 22 cm en el resto. Se identifican fallos de adherencia entre las capas existentes y ocasionalmente cohesión insuficiente de las mezclas que conforman el pavimento, especialmente en la capa intermedia. Según los datos de proyecto, el espesor de la capa de rodadura se sitúa entre los 5 y 6 cm y el espesor de capa de rodadura e intermedia tiene espesores comprendidos entre los 11 y 15 cm.

El tramo objeto de la intervención dispone de una longitud de 16,51 Km y un ancho de 7,5 m de ancho.

Se dispone de estudio de deflexiones estimándose los valores recogidos entre 50 y 70 dmm y se identifican tramos que no dan cumplimiento al IRI máximo para el umbral 3, 5 (<3 en el 50% del tramo y <5 en el 100% del tramo).

La caracterización del firme existente permitió concluir que el material a reciclar disponía de contenidos de ligante en un rango de entre 3,5 y 4,6% de betún con unos valores de penetración

inferiores a 10 dmm y con temperaturas de reblandecimiento superiores a los 80 °C que evidenciaban un elevado grado de envejecimiento.

2.1. Solución ejecutada

El estado del firme y la estimación de volumen de tráfico condujeron a la determinación de la solución definida en proyecto. Se considera necesario dotar al firme de una capa de espesor de MBC superior al existente en algunas de las secciones y garantizar la intervención sobre las capas de firme que se muestran no cohesionadas o no adheridas, requiriendo un fresado en profundidad considerable que permita incluir la intervención sobre capa de rodadura e intermedia.

Teniendo en cuenta lo definido en la OC 8/2001, que establece la necesidad de tener en cuenta las técnicas de reciclado cuando la superficie de rehabilitación es superior a 70.000 m² y considerando la posibilidad del uso de estas técnicas a la vista del tipo de tráfico soportado, se considera apropiado valorar como opción preferente la aplicación de reciclado en frío. Son aspectos determinantes para su selección la posibilidad de dotar de la capacidad estructural necesaria garantizando la intervención en profundidad del firme, permitiendo la intervención sin requerir el corte de tráfico de la vía evitando al máximo la presencia de escalones. A fin de alcanzar las capas de rodadura e intermedia en su totalidad se definen dos tramos en función del espesor de las dos capas, reciclando 14 y 12 cm respectivamente. Pese a superar los 12 cm establecidos en normativa nacional de aplicación para la técnica, se considera oportuno alcanzar los 14 cm para garantizar que puede disponerse de un firme compuesto por un conjunto de capas que trabaja de manera solidaria. Se proyecta adicionalmente el extendido de 10 cm de MBC. Sobre un tercer tramo, en mejor estado, se aplicará fresados y reposiciones puntuales.

Para la ejecución de reciclado se prescribe la ejecución a partir de equipo reciclador que integre la función de fresado, mezclado y emulsión.

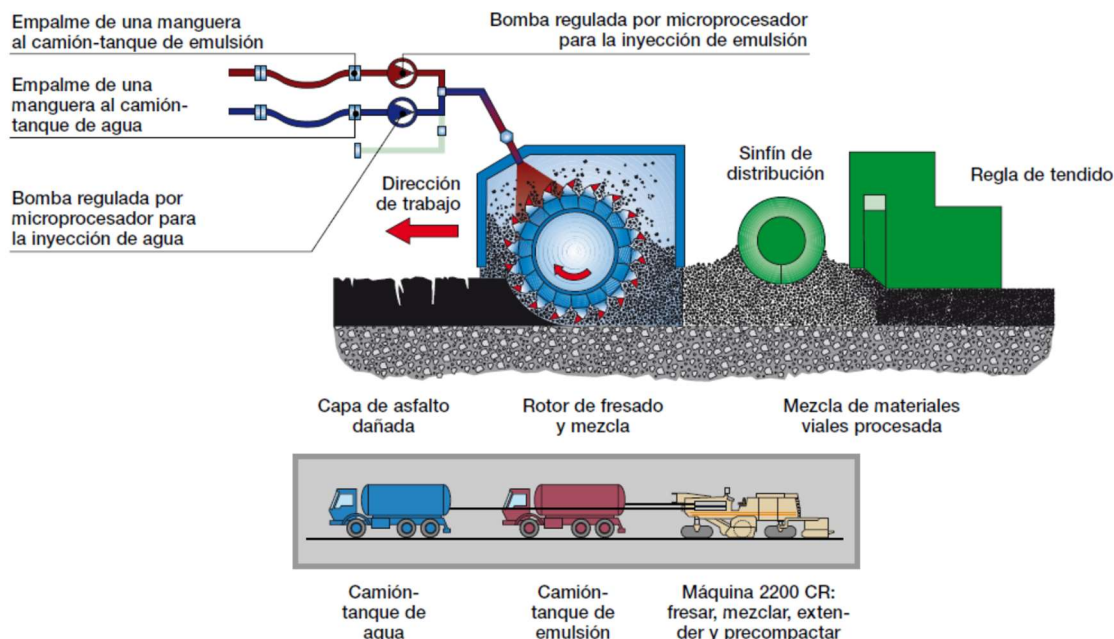


Figura 1: Requerimiento en proyecto de la configuración del tren de reciclado

Se prescribe además la necesidad de trabajar con dos equipos en paralelo que se solapen para abarcar la anchura necesaria que avancen con el menor desfase posible.

Como mezclas en caliente extendidas sobre el reciclado se determina el extendido de 6 cm de mezcla AC22 bin S y 4 cm de mezcla tipo AC11 surf S como rodadura.

Para el diseño de la fórmula de trabajo se realiza la caracterización del material a reciclar a partir de la caracterización de 5 catas correspondientes a 5 tramos homogéneos.

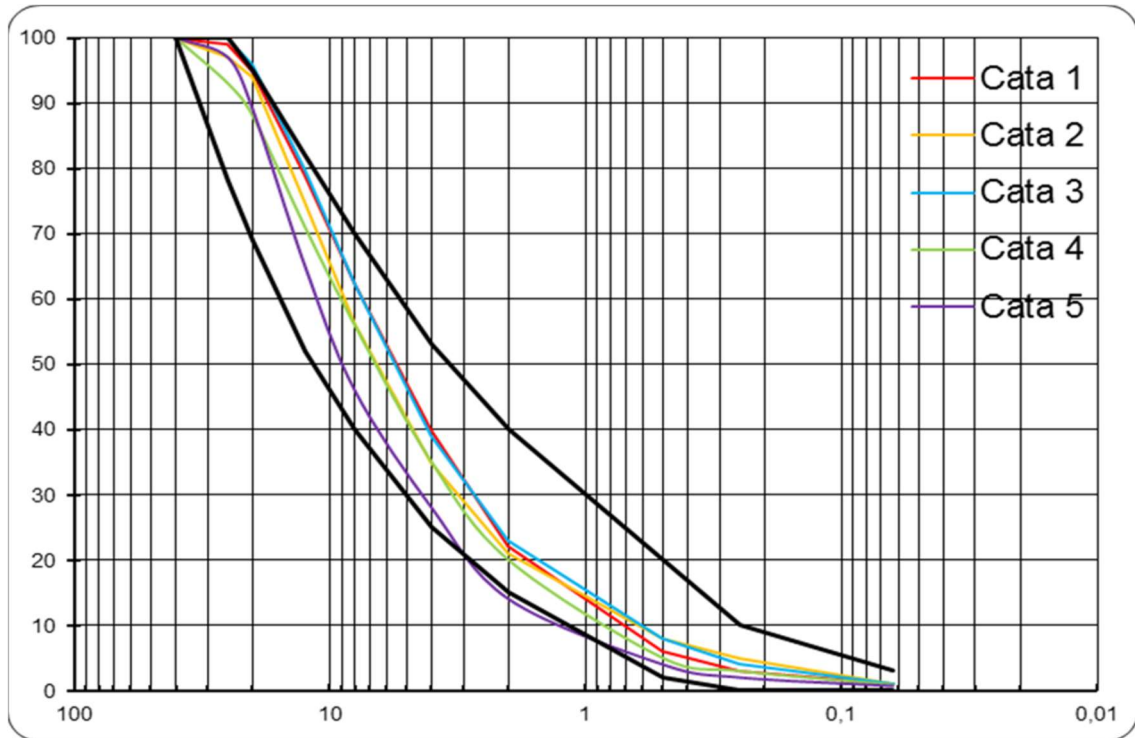


Figura 2: Granulometría de las distintas catas tomando como referencia el huso RE-1

También fue caracterizado el ligante residual del material a reciclar obteniendo los siguientes resultados:

CATA	PENETRACIÓN (dmm)	Tª REBLANDECIMIENTO (°C)
1	8	81,9
2	10	80,6
3	7	83,9
4	9	79,7
5	8	81,9

Tabla 1: Caracterización del ligante residual del material a reciclar.

Se observa una diferencia significativa en la caracterización de fresado especialmente en lo relativo a su granulometría que implica la necesidad de la verificación de la fórmula de trabajo para cada uno de los tramos homogéneos.

Para la definición de la fórmula de trabajo fue necesaria la validación a partir de 5 formulaciones distintas de emulsión tipo C60B5, puesto que se observaba dificultad para la consecución de los valores requeridos para resistencia seca en la mezcla reciclada correspondiente al tramo 2.

Finalmente es seleccionada para una emulsión bituminosa fabricada a partir de la dosificación de dos tensioactivos y un agente activante de adhesividad. La dotación óptima definida se establece en 3,2% de emulsión sobre fresado y la densidad de referencia es de 2,07 Kg/dm³.

Los resultados obtenidos en el ensayo de diseño según NLT-162 son:

	Tramo 1	Tramo 2
Resistencia a compresión vía seca	3,81 MPa	3,4 MPa
Resistencia a compresión vía húmeda	3,29 MPa	2,9 MPa
Resistencia conservada	86,4%	85%

Tabla 2: Resultados del ensayo de diseño.

La ejecución de la unidad de reciclado tiene lugar durante el mes de junio de 2016. El control de calidad realizado implica la realización de controles de contenido de agua, contenido de ligante y granulometría en el material fresado y contenido de agua y contenido de ligante sobre material reciclado dos veces al día.

En paralelo se realizan ensayos Proctor sobre el material fresado para la determinación de la densidad de referencia.

Se realizan ensayos de control para el ensayo de inmersión compresión, verificando el cumplimiento de los parámetros requeridos en la mezcla fabricada a partir de los materiales empleados en obra. Se presenta a continuación un resumen de los datos obtenidos en los lotes en los que se realizó caracterización completa:

Proctor Mod In situ		Mezcla			Inmersión-Compresión		
% Hum	Dens	% Hum	Betún s/m	% Emuls	Res. Seco	Res. Hum	% Res. Cons
4.00	1.85	4.55	6.09	2.95	3.30	2.96	89.60
5.85	1.84	3.60	6.45	3.33	3.09	2.66	86.08
4.14	1.91	4.05	6.40	2.63	3.30	2.71	82.12
4.27	1.89	4.02	6.07	3.32	3.24	2.74	84.57
4.22	1.89	4.38	5.94	2.95	3.60	2.83	78.60
4.33	1.89	4.20	5.74	3.30	3.86	3.08	79.70
4.23	1.88	4.75	6.23	3.08	4.60	4.00	85.90
4.23	1.88	4.52	6.16	3.42	4.48	3.70	81.90
4.23	1.88	5.71	6.22	3.15	4.46	3.90	87.60
4.23	1.88	4.74	5.86	3.03	3.81	3.03	79.50
4.23	1.88	3.38	6.43	3.13	4.35	3.38	77.70
4.23	1.88	3.49	6.33	3.38	3.94	3.12	79.26
4.23	1.88	3.12	5.97	3.00	3.91	3.20	81.87
4.23	1.88	3.45	6.19	3.18	3.70	2.93	79.78

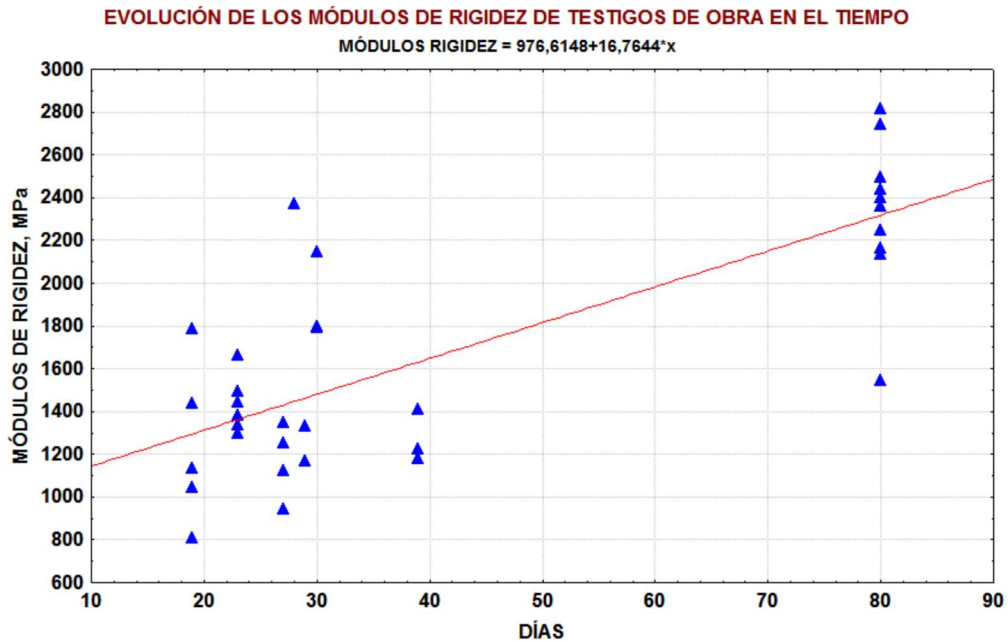
Tabla 3: Resultados de caracterización completa.

Se observa durante la ejecución de la obra una rápida cohesión de la mezcla, que viene propiciada en parte por la alta temperatura ambiental y de los elementos del tambor, posiblemente esta última relacionada con la elevada dureza del árido de las mezclas a reciclar. Este aspecto, supone una ventaja desde el punto de vista del comportamiento de la mezcla ante la acción del tráfico, abierto a las pocas horas del extendido de la mezcla. No obstante, dificulta el extendido en las condiciones de planimetría requeridas para la mezcla. El control y reducción de la temperatura de la emulsión representa una herramienta para la regulación de la velocidad de rotura de la emulsión en contacto con la mezcla.

La cohesión elevada a edades tempranas es constatada por la extracción de testigos en edades tempranas, siendo posible su extracción tras 48 horas del extendido.

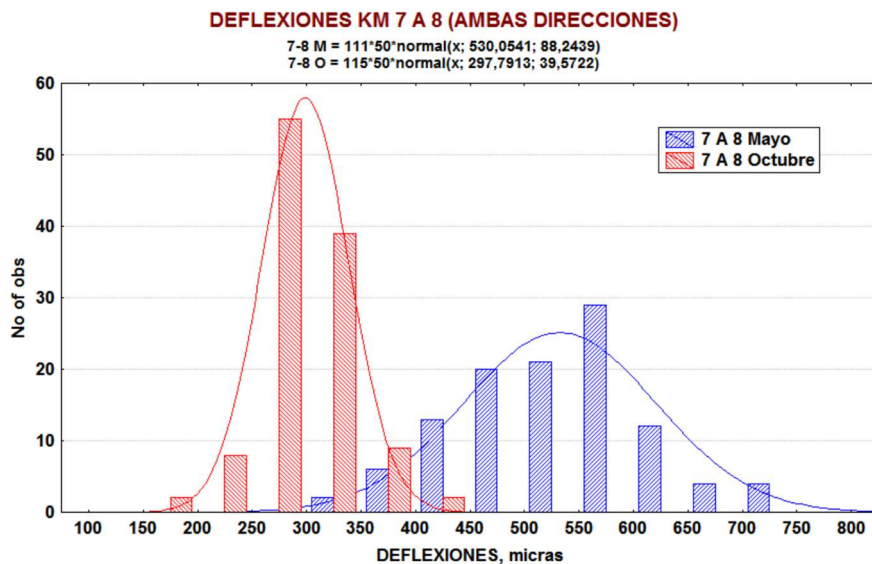
2.2. Evaluación del desempeño

Sobre testigos extraídos en obra fue caracterizado el Módulo de Rigidez a tracción indirecta obteniendo los siguientes resultados.



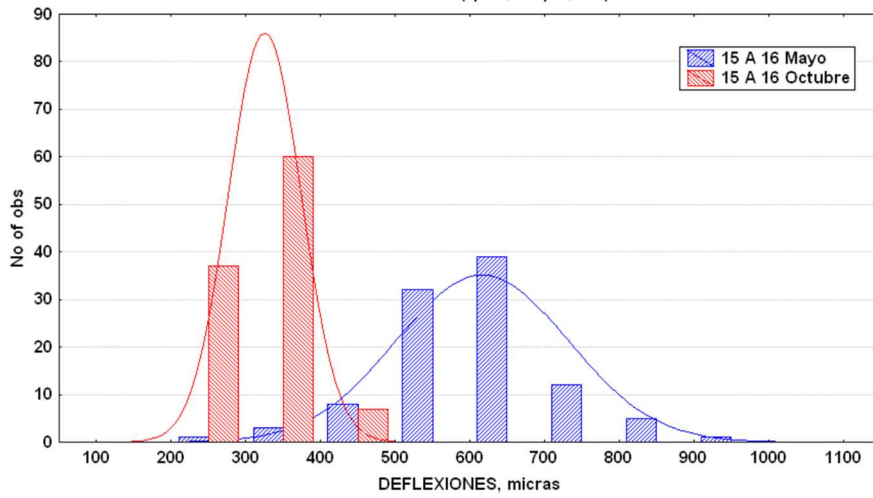
Para la mejora de la regularidad superficial, fueron ejecutados microfresados puntuales antes del extendido de las capas de MBC.

Paralelamente, fue evaluada el comportamiento del firme mediante deflexiones. A fin de poder realizar un adecuado seguimiento de la obra, las deflexiones fueron medidas antes y después (4 meses) de la realización de la intervención obteniendo los siguientes resultados:



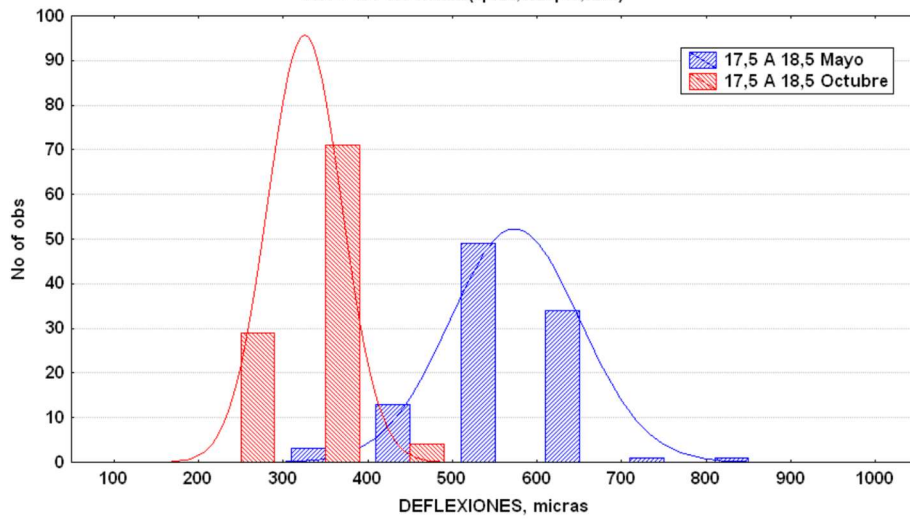
DEFLEXIONES KM 15 A 16 (AMBAS DIRECCIONES)

15-16 M = 101*100*normal(x| 613,8812| 114,7884)
 15-16 O = 104*100*normal(x| 323,9712| 48,2247)

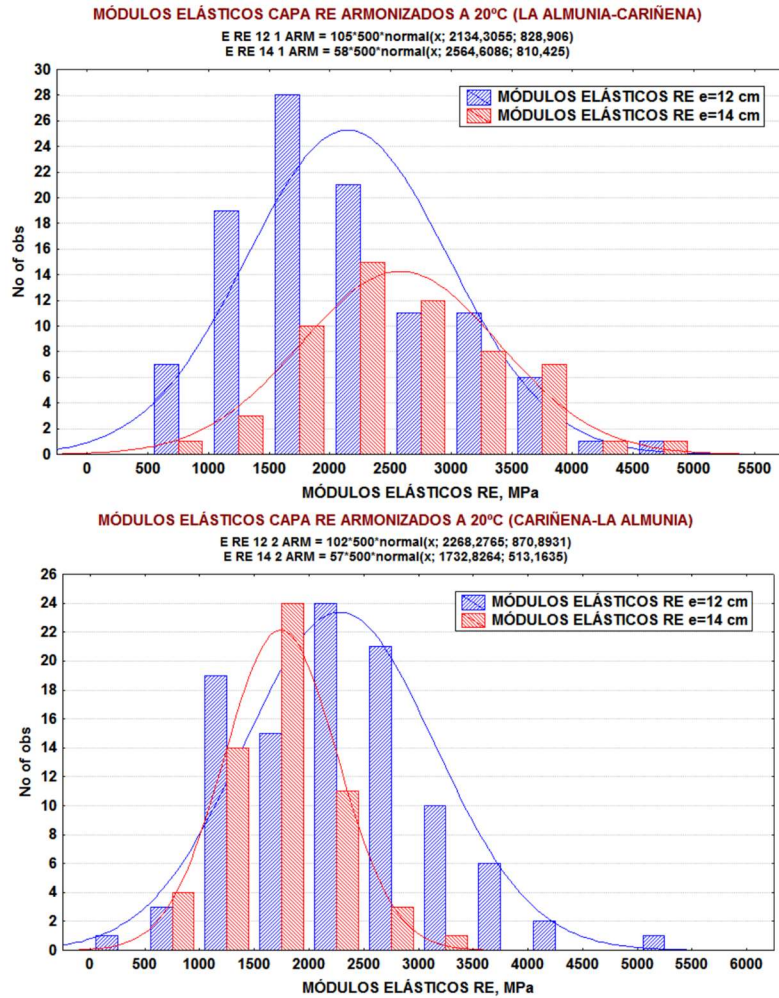


DEFLEXIONES KM 17,5 A 18,5 (AMBAS DIRECCIONES)

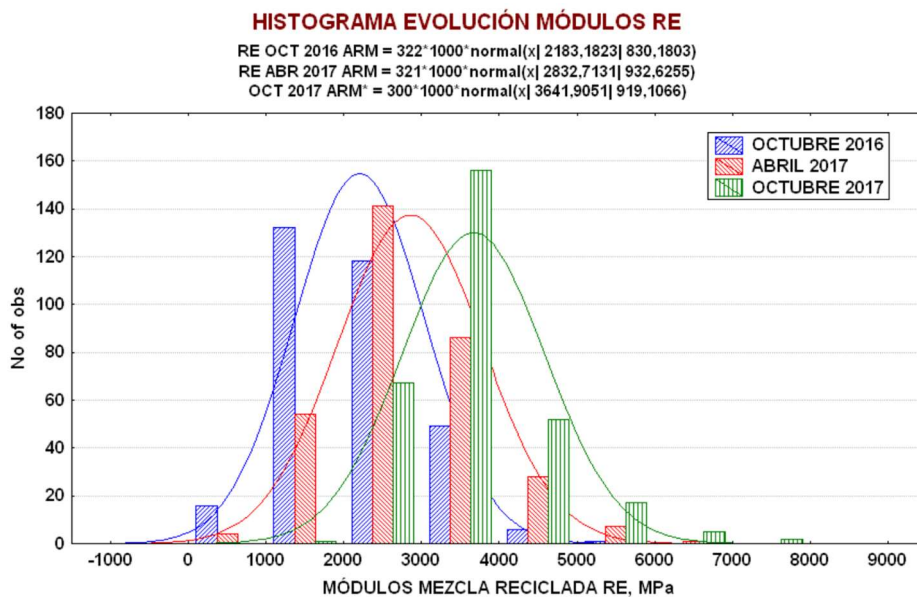
Var3 = 101*100*normal(x| 571,3069| 77,1083)
 Var6 = 104*100*normal(x| 324,1923| 43,3281)



Mediante calculo inverso, fue estimado el módulo de la capa reciclada, obteniendo la siguiente distribución:



A fin de evaluar si la evolución por maduración de las propiedades mecánicas de la mezcla se prolongaba más allá de los 4 meses, fue realizada una evaluación a partir de deflexiones del comportamiento del firme. El cálculo inverso a partir de los módulos obtenidos permitió la obtención de la siguiente distribución:



Durante los años posteriores, se han realizado diversas campañas que han consistido en la inspección a nivel visual de la evolución de la carretera y la caracterización a partir de testigos de las prestaciones mecánicas de a mezcla reciclada. Las campañas tuvieron lugar durante el mes de octubre de 2018 y durante el mes de enero de 2023.

Sobre los testigos extraídos en la campaña de 2018 se realizaron ensayos de módulo de rigidez a 20 °C por ensayo de tracción indirecta, obteniendo los siguientes resultados:

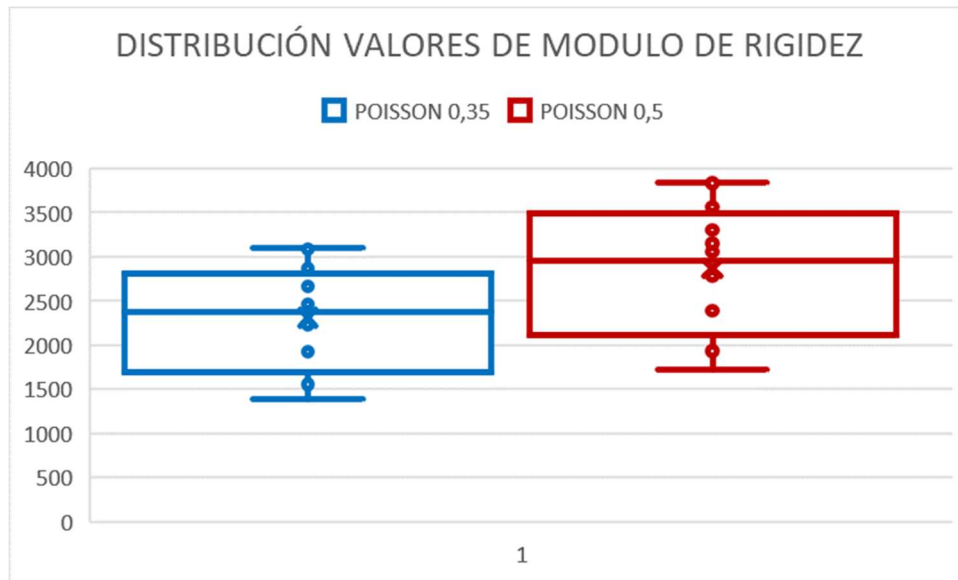


Figura 3: Distribución de valores del módulo de rigidez.

Para la interpretación de resultados se ha considerado el cálculo aplicando un factor de coeficiente de poisson de 0,35 y también la corrección a factor 0,5. Este último valor es aconsejado cuando los valores de fuerza aplicados son inferiores a los propios de una MBC estándar. Para la comparación con los valores medidos mediante deflectómetro sería también necesario tener en consideración el efecto de minoración del módulo que supone su ensayo a una frecuencia de carga inferior, tal como sucede en el ensayo normativo sobre testigos. A la vista de estos datos se considera que las prestaciones estructurales evaluadas a partir del seguimiento de módulos de 2018 eran equivalentes a las derivadas del análisis de deflexiones realizado en 2017.

En la campaña de seguimiento realizada en 2023 han sido extraídos 12 testigos repartidos en 4 emplazamientos de la obra.

Se prevé la realización del ensayo de rigidez sobre los mismos, una vez se haya dejado transcurrir el plazo necesario para su secado al aire y un plazo de tiempo razonable para garantizar unas propiedades estables, después de la realización de la extracción de testigos y ensayos de corte.

Por el momento, para los testigos extraídos en 2023 ha sido evaluada la adherencia entre capas entre el firme antiguo y la mezcla reciclada a fin de validar la premisa de que el nivel de adherencia obtenido es comparable al existente entre mezclas bituminosas en caliente aplicadas sobre riego de adherencia:

Tensión máxima (MPa)	0,53
Desplazamiento (mm)	2,14
Energía (MJ)	570
K (MPa/mm)	0,25
Energía máxima (MJ)	890

Tabla 4: Resultado adherencia entre capas según NLT-382/08 Método A (velocidad 2 mm/min) entre firme viejo y capa reciclada sobre testigos extraídos en enero 2023

Los valores alcanzados superan el valor mínimo requerido para la adherencia entre capas base e intermedia en MBC (>0,4 MPa).

En resumen, tras más de seis años desde su aplicación, el pavimento ha desempeñado adecuadamente su función, pese a haber registrado un incremento en la intensidad de tráfico superior a la prevista, y posiblemente justificada por la mejora experimentada por la carretera tras su intervención. El último estudio de tráfico realizado por parte de la Dirección General de Carreteras del Gobierno de Aragón evidenció una intensidad correspondiente a tipo T1, en la que el volumen de vehículos pesados representa un elevado porcentaje del tráfico soportado.

La observación de los testigos ha mostrado adicionalmente su eficiencia a la hora de prevenir la propagación de fisuras, gracias a su flexibilidad.



Foto 1: Imagen donde se observa el efecto de prevención de la propagación de fisuras

De acuerdo con los datos analíticos aportados, puede observarse que el firme sigue disponiendo de una planimetría adecuada, sin presencia de hundimientos en rodera, y no habiendo reflejado las fisuras existentes en las capas de firme no rehabilitadas.

3. REHABILITACIÓN DE LA CARRETERA LU-120 ENTRE LOS TÉRMINOS MUNICIPALES DE VILALBA Y ARNEIRO

En el año 2010 se procede a rehabilitar la carretera LU-120, del pK 0+058 al pK 9+256, entre los términos municipales de Vilalba y Arneiro (Lugo). Se trata de una vía con categoría de tráfico pesado de tipo T2 y la rehabilitación comprende un reciclado in-situ con emulsión.

3.1. Estado inicial del firme

El firme a reciclar estaba constituido por una base granular tipo zahorra y/o macadam, 6 cm de una mezcla de tipo AC22 bin S con áridos calizos y una capa de rodadura de tipo AC 16 surf S en un espesor de 5 cm fabricada con árido de tipo anfibolita. El firme inicial presentaba visibles signos de agotamiento.

3.2. Solución ejecutada

Como solución de rehabilitación del firme se ejecuta un reciclado in-situ en frío con emulsión bituminosa, en un espesor variable entre 8 y 10 cm y sobre éste, se extendió una capa de AC22 bin 50/70 S y una BBTM 11 A 45/80-65 en espesores de 6-8 para la capa intermedia y 3 cm en rodadura.

La obra se ejecutó con una única máquina recicladora, de 2,2 m de anchura de trabajo. Como elementos de compactación se empleó un compactador metálico con control automático de energía de compactación y amplitud efectiva de carga a aplicar, que reporta el grado de compactación que alcanza la mezcla, y un rodillo neumático lastrado con un peso de 35 t.



Foto 2: Ejecución del reciclado

Para el diseño de la fórmula de trabajo, se toman 8 catas al tresbolillo, correspondientes a tramos homogéneos y se realizan los siguientes ensayos:

- Granulometría del material fresado (UNE EN 933-2).

Árido	Cata 1	Cata 2	Cata 3	Cata 4	Cata 5	Cata 6	Cata 7	Cata 8
Procedencia	LU-120							
R. D.	16940	16941	16942	16943	16944	16945	16946	16947
Tamices UNE, mm	CERNIDO ACUMULADO (en masa)							
40	100	100	100	100	100	100	100	100
25	100	100	100	100	100	100	100	100
20	93	92	89	92	99	95	96	91
12,5	59	59	55	52	60	57	52	56
10	48	49	45	44	50	44	39	45
8	38	39	35	38	39	35	31	36
6,3	30	32	28	31	32	29	25	29
4	21	23	20	17	17	20	17	19
2	10	13	12	9	9	11	9	10
1	4	5	5	4	4	4	4	4
0,5	2	2	3	2	2	2	2	1
0,25	1	1	2	1	1	1	1	1
0,125	0	0	0	0	1	0	0	0
0,063	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2

Tabla 5: Granulometría de las catas de material.

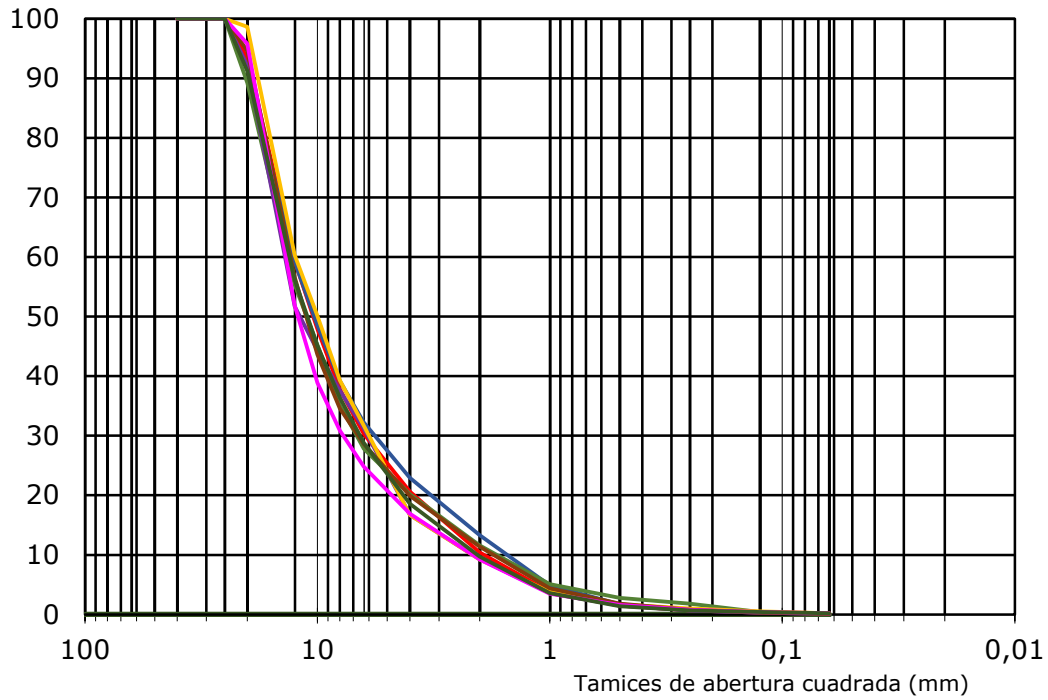


Tabla 6: Curva granulométrica de las diferentes catas.

- Contenido de ligante y granulometría del árido extraído (UNE EN 12697-1 y 2).

Árido	Cata 1	Cata 2	Cata 3	Cata 4	Cata 5	Cata 6	Cata 7	Cata 8
Procedencia	LU-120							
R. D.	16940	16941	16942	16943	16944	16945	16946	16947
Tamices UNE, mm	CERNIDO ACUMULADO (en masa)							
40	100	100	100	100	100	100	100	100
25	100	100	100	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	100	100	100	100
12,5	94	92	92	88	87	91	98	90
10	86	83	81	78	77	83	85	81
8	74	73	74	69	67	74	77	72
6,3	62	63	66	61	59	64	67	65
4	50	53	57	50	48	53	56	54
2	39	39	44	40	37	38	40	40
1	24	26	27	26	23	26	28	25
0,5	16	18	18	17	16	18	21	17
0,25	12	13	14	13	12	14	16	13
0,125	10	10	11	10	9	11	11	10
0,063	8,2	8,5	9,5	8,5	7,7	8,8	7,7	8,8
Betún [s/m]	3,89	3,92	4,28	3,60	3,91	4,08	4,17	4,31
Betún [s/a]	4,05	4,08	4,47	3,74	4,07	4,26	4,35	4,50

Tabla 7: Contenido de ligante y granulometría del árido extraído de las diferentes catas.

Dada la similitud entre catas, se decide hacer una única fórmula de trabajo mezclando a partes iguales las 8 catas. Para el diseño se determinó el efecto del agua mediante el ensayo de inmersión /compresión (NLT-162), se empleó una emulsión de tipo ECL-2d (actual C60B5 REC) y se tantearon 3 contenidos de emulsión a aportar.

	1	2	3	OC 8/2001
Dosificación de emulsión [% s/fresado]	3,0	3,5	4,0	
Dosificación de betún [% s/fresado]	1,8	2,1	2,4	
Agua de envuelta [% s/f]	4	3,5	3,0	
Densidad media de las probetas [kg/dm ³]	2,503	2,487	2,468	
Resistencia a compresión vía seca [MPa]	3,24	2,84	2,14	3,0
Resistencia a compresión vía húmeda [MPa]	2,83	2,46	1,97	2,5
Resistencia conservada [%]	87	88	92	70

Tabla 8: Resultados de la fórmula de trabajo

Para ajustar la fórmula de trabajo a las condiciones objetivas de la obra, previo al arranque de la misma, se toma una muestra del material fresado con la propia recicladora y se reajusta la fórmula de trabajo con una muestra de emulsión fabricada en para esta obra. Con este fresado, el óptimo de emulsión se establece en el 3,25%.

Resistencia a compresión vía seca	3,07 MPa
Resistencia a compresión vía húmeda	2,67 MPa
Resistencia conservada	88 %

Tabla 9: Ajuste de la fórmula de trabajo a las condiciones objetivas de la obra.

La ejecución tiene lugar en agosto de 2010. El control de calidad de la obra implica la determinación diaria de la humedad, contenido de ligante y granulometría del árido extraído de la mezcla reciclada, así como la granulometría del material reciclado. También de manera diaria se realiza la determinación del efecto del agua mediante el ensayo de inmersión compresión (NLT-162) y se toma una muestra de emulsión cada 50 t y se realiza una caracterización completa de la misma.

Humedad compactación [%]	Betún s/m [%]	Res. Seco [Mpa]	Res. Húm. [Mpa]	R.C. [%]
4,2	5,16	3,24	2,75	84,9
5,1	5,13	3,48	2,73	78,4
4,9	5,20	3,03	2,49	82,1
4,8	5,14	3,08	2,51	81,5
4,9	5,24	3,03	2,53	83,5
5,1	5,19	2,99	2,49	83,3
5,0	5,16	3,15	2,54	80,6
5,0	5,20	3,55	2,71	76,3
4,8	5,32	3,73	2,89	77,5
5,2	5,13	3,30	2,66	80,6
5,2	5,16	3,24	2,75	84,9
5,0	5,48	3,05	2,63	86,2
5,1	5,14	3,07	2,51	81,8
5,1	5,67	3,02	2,50	82,7
4,9	5,76	3,23	2,56	79,2
5,2	5,73	3,13	2,56	81,8

Tabla 10: Ejemplos de resultado de control de calidad del reciclado.

Tras la ejecución, el tramo se deja abierto al tráfico durante 15 días, actuando la mezcla reciclada como superficie de rodadura. Durante este período, en el que este estuvo expuesto al tráfico rodado, el reciclado tuvo un comportamiento superficial excelente, no produciéndose en todo ese tiempo desprendimientos de áridos. Transcurrido este tiempo, se procede a extender las dos capas de mezcla bituminosa en caliente anteriormente mencionadas.

3.3. Evaluación del desempeño

Con la intención de conocer cómo evoluciona en el tiempo una mezcla reciclada con emulsión, se estableció un programa de investigación que pretende aproximarnos al conocimiento sobre el ciclo de maduración de este tipo de mezclas, para así poder determinar realmente su proceso de consolidación. Para ello se evaluó el módulo dinámico a diferentes edades de curado, así como el porcentaje de huecos o sus densidades, mediciones realizadas todas ellas en el centro de investigación de Eurovia en Francia sobre los testigos extraídos. Los datos obtenidos en este estudio nos ofrecerán una idea más precisa sobre el desarrollo de este proceso.

Las primeras extracciones de testigos se realizaron a los 7, 14 y 30 días después de la ejecución de la capa reciclada, distanciando posteriormente y en función de los resultados obtenidos, los periodos de muestreo, situando los siguientes a una edad de 210, 487 y 1100 días. La extracción de testigos realizada a los 7 días permitió extraer testigos enteros, lo cual evidenció el alto grado de cohesión que había alcanzado la mezcla en ese corto periodo de tiempo.

La mayor parte de los testigos extraídos mostraban buen aspecto, observándose una buena adherencia de la capa reciclada a la base del firme. En esta primera serie de extracciones, las efectuadas al término de los primeros 7 días y hasta alcanzar la edad de 30, se acompañaron además de la realización “in situ”, de ensayos para determinar la densidad de la capa reciclada, por medio del método de la arena (UNE 103 503), obteniéndose valores adecuados.

	1 mes	15 días	7 días
Humedad [%]	2.1	0.9	1.2
Densidad Reciclado húmedo[g/cc]	2.295	2.423	2.304
Densidad Reciclado seco [g/cc]	2.247	2.401	2.276

Tabla 11: Determinación de la densidad mediante el método de la arena.

Los valores de humedad de las tres muestras de material pueden no ser representativos ya que se produjeron precipitaciones.

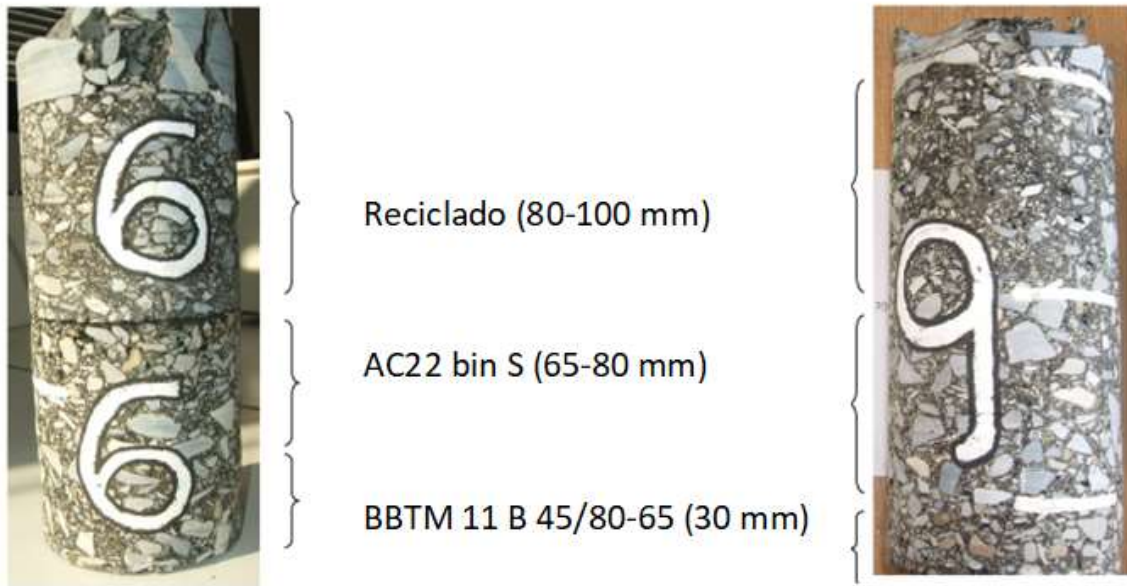


Foto 3: Aspecto de los testigos extraídos.

El tramo ejecutado a los dos años de su puesta en servicio presentaba un muy buen aspecto.



Foto 4: Aspecto del firme tras dos años de puesta en servicio.

3.3.1. Determinación de huecos de la mezcla reciclada

Los porcentajes de huecos fueron medidos por dos procedimientos distintos. Se empleó para determinar la densidad un banco gamma según la norma FR EN 12697-7 donde el cálculo se realizó utilizando un MVRe de $2,58 \text{ t/m}^3$ y, por otro lado, se empleó el método geométrico en relación con la masa volumétrica aparente, observándose que los valores medios de huecos obtenidos en banco gamma, son algo inferiores a los proporcionados por el sistema geométrico. En cualquier caso, se observa una disminución de huecos con el tiempo, lo que hace pensar que se produce una densificación de la mezcla.

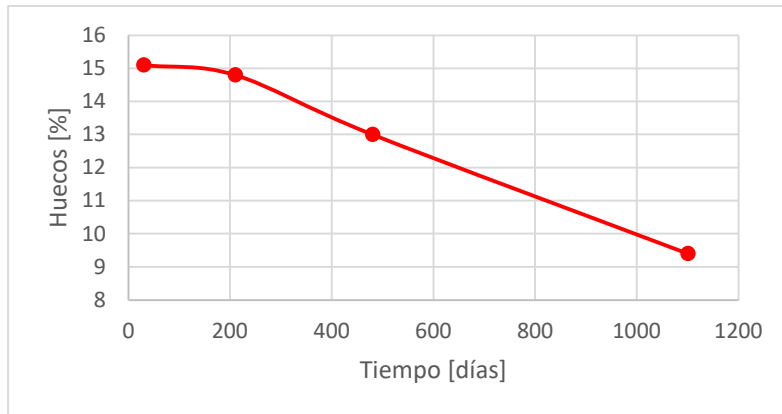
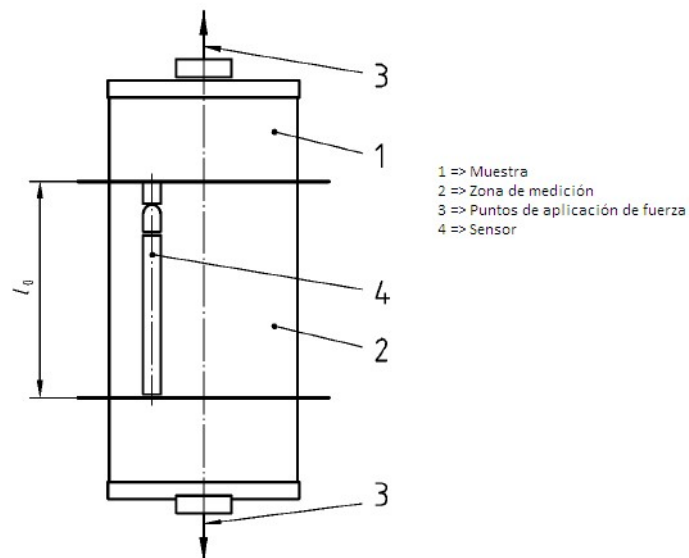


Tabla 12: Evolución del contenido de huecos de la mezcla con el tiempo empleando un banco gamma.

3.3.2. Cálculo de módulos por tracción directa (UNE 12697-26 anexo E)

La medición de módulos se realizó por tracción directa, como indica el anexo E de la norma UNE EN 12697-26. El principio de este ensayo consiste en someter una probeta a cargas de tracción uniaxiales, a temperaturas y tiempos de aplicación de carga dados. En este caso el ensayo se ha realizado a 10 °C y 120 ms. Esta medición de módulos no es normativa en España, pero nos sirvió para comparar el comportamiento del reciclado con otros estudios que se tienen en Francia y también para evaluar la evolución de los módulos con el tiempo.



Para realizar el ensayo de módulo se cortan para obtener secciones cilíndricas de unos 5 cm aproximadamente. Dichos testigos se envían al centro de investigación que Eurovia tiene ubicado en Burdeos.



Foto 5: Ejemplo del aspecto de los testigos previa preparación para el ensayo.

Y en los resultados obtenidos para los módulos se observa un aumento del mismo con el tiempo hasta que se produce una estabilización.

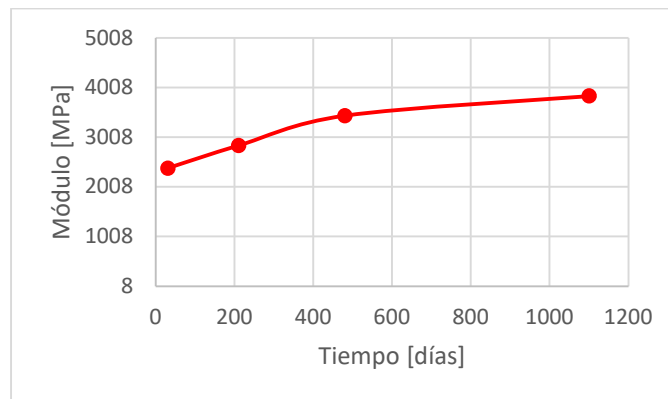


Tabla 13: Evolución del módulo (10 °C y 120 ms) con el tiempo.

Con estas mediciones se puede observar que el material reciclado experimenta una evolución con el tiempo, disminuyendo su porcentaje de huecos respecto al porcentaje que tenía tras su ejecución. También se observa un aumento de módulos de rigidez hasta la estabilización de este, alcanzando unos valores similares a los de otros estudios. Esto puede ser debido por un lado a la disminución de huecos y por otro, a la maduración propiamente dicha del material.

4. CONCLUSIONES

El estudio de los firmes reciclados aplicados en dos obras de intensidad de tráfico T2 en el año 2010 y 2016 nos ha permitido valorar la adecuación de las prestaciones de la solución. En ambos casos, la carretera ha prestado servicio sin requerir actuaciones posteriores, incluso habiendo aumentado el tráfico hasta nivel T1 en uno de los casos.

El seguimiento a partir de medidas directas e indirectas de los módulos de la capa ha permitido cuantificar su contribución estructural y conocer la evolución temporal de sus prestaciones con el paso del tiempo, presumiblemente por maduración de la mezcla.

Así mismo, la extracción de testigos ha permitido garantizar el funcionamiento solidario del paquete de firmes y la contribución de la capa en la conservación del firme gracias a la capacidad de amortiguar la propagación de fisuras procedentes de capas inferiores.