

Mezclas bituminosas en servicio con altas tasas de material reciclado

Las mezclas bituminosas recicladas con altas tasas han sido suficientemente estudiadas en laboratorio, demostrando sus buenas características, sobre todo para capas intermedias y de base. Sin embargo, hay poca información sobre obras concretas realizadas con esta técnica y, sobre todo, de su comportamiento y evolución posterior a su puesta en servicio. Este artículo describe la utilización de mezclas recicladas en un 40%, 50% y 60%, mediante planta continua tipo ASTEC, y recoge los resultados de caracterización mecánica de testigos tomados a lo largo del tiempo, en la que se han ensayado a tracción indirecta, módulo resiliente y de rigidez, sensibilidad al agua y ensayo Fénix. La conclusión es el buen comportamiento de las mezclas, aunque la dispersión de las características de los testigos, a pesar de ser próximos en las campañas de extracción, no permite extraer conclusiones en cuanto a su evolución en el tiempo.

Palabras clave: reciclado altas tasas, conservación de carreteras, ensayo Fénix

Recycled asphalt mixtures with high rates have been sufficiently studied in the laboratory, demonstrating its good features especially for intermediate and basic layers. However it exist a few information about specific works made with this technique, and above all, its behavior and its evolution after its commissioning. This article describes the use of recycled mixtures by 40%, 50% and 60%, by continuous ASTEC plant type, and collects the results of mechanical characterization of cores taken over time, which have been tested for tensile strength, resilient and rigidity modulus, water sensitivity and Fénix test. Conclusion verses about good behavior of the mixtures, although the dispersion cores´ characteristics, even if they were being taken in the same areas in all campaigns extraction, they don´t allow us to get any conclusions related to their evolution over time.

Keywords: high recycling rates, road maintenance, test Fénix

Julio del Pozo, juliodelpozo@telefonica.net
Jordi Albareda, jordi.albareda@sorigue.com

Sorigué

1. Introducción

La empresa Sorigué realizó, en los años 2005 y 2007, obras de asfaltado con altas tasas de reciclado, estudiando posteriormente el comportamiento en servicio mediante campañas de extracción de testigos durante años 2007 a 2010. En concreto, se estudió la evolución de tres tipos de mezcla, con distintos periodos de antigüedad, mediante la caracterización mecánica de los testigos extraídos.

El objeto de este estudio fue evaluar la evolución en el tiempo de las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas recicladas en altas tasas, ya que si bien la técnica de fabricación y puesta en obra es bien conocida, no lo es tanto su evolución en tramos reales en cuanto a sus características mecánicas y de du-

rabilidad frente a las cargas y los agentes atmosféricos. Las mezclas estudiadas fueron del tipo semidensas, con un porcentaje de material reciclado osciló entre 40% y el 60%.

2. Tipo de planta y mezclas recicladas

La planta del tipo continuo utilizada fue ASTEC tipo Double Barrel®, cuyas características técnicas son las siguientes:



Foto 1. Vista de la planta.

Mezclas bituminosas en servicio con altas tasas de material reciclado

Planta formada por ocho módulos con remolque propio, compuestos por:

- **Remolque 1:** sistema portátil de alimentación de áridos con cinco tolvas de 2,69 x 3,45 m, y una capacidad de 21-28 tn (según densidad del árido).
- **Remolque 2:** cinta inclinada portátil para transferir los áridos al tambor, dotada de criba vibratoria.
- **Remolque 3:** tambor mezclador Double Barrel® de 2.100 mm de diámetro diseñado para poder trabajar con material reciclado con tasas del 60%, compuesto por dos tambores concéntricos. El tambor interior dispone de paletas de secado que recirculan el árido a contraflujo, diseñadas para trabajar con menores temperaturas operativas y máximas eficacias de secado. La cámara exterior (o segundo tambor) está especialmente aislada para el calentamiento de material de reciclado y su mezcla con el árido, betún, filler y los otros aditivos.
- **Remolque 4:** Filtro de mangas tipo ciclón, para un flujo de aire de 76.355 m³/h y compuesto de 728 mangas de material altamente filtrante. El preseparador ciclónico horizontal va montado en el mismo bastidor antes del filtro de mangas, para extraer las partículas pesadas.
- **Remolque 5:**
 - Silo de acopio y elevador autoerigibles simultáneamente en 12 minutos, sin necesidad de grúa alguna. El silo, de 90 tn de capacidad, dispone de paredes interiores redondeadas para prevenir la segregación. Dispone de un sistema automático de pesaje y descarga para eliminar la necesidad de una báscula para camiones.
 - Elevador de raquetas autoportante de 350 t/h de capacidad para la elevación del aglomerado al silo.
 - Módulo de cabina de control de la planta.
- **Remolque 6:** tanque de almacenamiento de betún con dos compartimentos y capacidad total de 94.625 litros, provisto de caldera.
- **Remolque 7:** silo autoerigible para aditivos (filler) con dos compartimentos y 56,5 m³ de capacidad.
- **Remolque 8:** Tanque de fuel-oil de 56.775 litros de capacidad. Actualmente, la planta está adaptada para trabajar con gas natural.

Los tres tipos de mezcla se extendieron en las obras referenciadas más abajo.

En el artículo se ha adoptado la denominación de las mezclas correspondiente a la fecha en que se ejecutaron, es decir, la denominación D, S o G, para las mezclas densas, semidensas o gruesas. La denominación AC (Asphalt Concrete) fue posterior, año 2008.

Obra 1

En esta obra se realizó el fresado de los 8 cm superiores de mezcla bituminosa del firme antiguo y luego se extendió una capa bituminosa de 8 cm de mezcla reciclada en caliente en planta tipo S-20 con una tasa de 60% de RAP, sobre ésta, una capa intermedia de 5 cm de mezcla reciclada en caliente en planta tipo S12 con una tasa de 40% de RAP, y finalmente se dispuso de una capa de rodadura tipo F8 (discontinua, tamaño máx. de 10 mm) en la que se utilizó un betún modificado con polímeros. En esta obra, al objeto de disminuir la heterogeneidad del material reciclado, se fraccionó en dos tamaños, 0/8 y 8/20.

El año de ejecución de la obra fue 2007. Las campañas de extracción de testigos se realizaron con una periodicidad de entre seis meses y un año durante un periodo de tres años, de 2007 a 2010, de forma que en total se dispuso de cinco campañas de testigos.

Obra 2

En esta obra se realizó el fresado de los 8 cm superiores de mezcla bituminosa del firme antiguo y se extendió una capa bituminosa de 8 cm de mezcla reciclada en caliente en planta tipo S20 con una tasa de 50% de material reciclado. Sobre ésta, se extendió una capa de rodadura de 6 cm de mezcla convencional. Previamente a su utilización, el material de reciclado se procesó mediante un cribado con malla de 25 mm. El tener un solo tamaño 0/25 conlleva una mayor dispersión en los granulométricos respecto del caso anterior.

El año de ejecución de la obra fue 2005. Las campañas de extracción de testigos se realizaron con una periodicidad de un año durante un periodo de tres años, de 2007 a 2010, de forma que en total se dispuso de tres campañas de testigos.

Tabla 1. fecha de extracción de testigos.

Vía	Fecha	Número
Obra 1 Puesta en servicio año 2007	05/10/2007	S12R40 Y S20R60 1
	08/05/2008	S12R40 Y S20R60 2
	05/11/2008	S12R40 Y S20R60 3
	28/01/2010	S12R40 Y S20R604
	27/10/2010	S12R40 Y S20R60 5
Obra 2 Puesta en servicio año 2005	08/10/2007	S20R50 1
	28/07/2009	S20R50 2
	28/10/2010	S20R50 3

3. Campañas de extracción de testigos y ensayos realizados

Las fechas y tramos en los que se tomaron testigos fueron los recogidos en la Tabla 1. Los procedimientos de ensayo sobre los testigos han sido:

- Ensayo de Tracción Indirecta, mediante la Norma UNE-EN 12697-23
- Ensayo de Módulo de Rigidez a Tracción Indirecta. Mediante la Norma UNE-EN 12697-26 Anejo D
- Sensibilidad al agua, mediante la Norma UNE-EN 12697-12
- Ensayo Fénix

Dada la particularidad de éste último ensayo, propuesto por la UPC (Universidad Politécnica de Catalunya), y la ausencia de normativa al respecto, es necesario describir su procedimiento.

3.1 Ensayo Fénix

Con objeto de obtener aún más información sobre la tenacidad y la resistencia a la fisuración de los materiales bituminosos, el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Catalunya desarrolló el ensayo Fénix.

La metodología del ensayo Fénix consiste en someter media probeta Marshall o testigo a un esfuerzo de tracción di-

recta. En el caso de las probetas Marshall, en un comienzo, el procedimiento de fabricación y compactación sigue la misma metodología establecida por el método Marshall, y en el caso de testigos, una vez extraído éste, se corta mediante una sierra circular la sección a determinar sus propiedades mecánicas. Luego la probeta o testigo se secciona por la mitad y se le induce una fisura mediante una entalladura en la parte central, tal como se ilustra en la Foto 2. Posteriormente, mediante el uso de una resina epoxi, se fijan a las dos secciones de la cara plana separadas por la entalladura, unas placas de acero. Estas a su vez son fijadas a los soportes de la prensa mediante dos pernos, que permiten un movimiento de rotación respecto a estos, de acuerdo a lo ilustrado en la Foto 3.

El ensayo consiste en someter las probetas semicirculares a un ensayo simple de tracción directa a una temperatura de 20°C. Para la realización del ensayo se utiliza una prensa MTS que dispone de una cámara capaz de controlar la temperatura con una precisión de $\pm 1^\circ\text{C}$.

El ensayo se realiza mediante control de desplazamiento del pistón, aplicando un desplazamiento a una velocidad constante de 1 mm/min hasta llegar a la rotura total de la probeta.

Una vez registrados los datos por el equipo informático se procede a graficar las cargas registradas en función de su desplazamiento para calcular el valor de la energía de fractura (GF) mediante el cálculo del trabajo total de fractura (WT), y dividido por el área de contacto probeta-placas (Alig.).

Mezclas bituminosas en servicio con altas tasas de material reciclado



Foto 2. Probeta Ensayo Fénix.



Foto 2. Montaje de probeta para el ensayo Fénix

Una de las principales ventajas de este ensayo es que simula el mecanismo de fisuración de las mezclas bituminosas mediante su principal modo de propagación de fisura cuando estas son sometidas a esfuerzos térmicos y a las solicitaciones de tráfico. Otra ventaja es la facilidad para realizar el ensayo, tanto a probetas Marshall como a testigos extraídos del pavimento.

A continuación se detallan los diferentes parámetros que se pueden obtener del ensayo Fénix:

- Carga máxima a tracción (F_{max}): Se define como la carga máxima registrada en el ensayo a tracción directa.
- Desplazamiento a carga máxima (ΔF_{max}): Se define como el desplazamiento realizado por el pistón cuando se registra la máxima carga a tracción.
- Resistencia a tracción (RT): Se define como la relación entre la carga máxima registrada, F_{max} , y el área de ligamento o fractura. La resistencia a tracción se calcula de acuerdo a:

$$R_T = \frac{1000 \cdot F_{max}}{h \cdot l}$$

Donde

RT: Resistencia a tracción, (MPa)

F_{max} : Carga máxima registrada (KN)

h: espesor de la probeta (mm).

l: Longitud inicial de ligamento (mm).

- Desplazamiento de rotura (ΔR): Se define como el desplazamiento en el cual la carga ha caído hasta los 0,1 KN. Es un valor indicativo de la tenacidad de la mezcla bituminosa, ya que a medida que las mezclas son más dúctiles se obtienen mayores valores de ΔR , mientras que para mezclas más frágiles se obtienen menores valores de ΔR . Este parámetro entrega un valor importante, puesto que a mezclas con iguales energías disipadas, GF, pueden comportarse de manera diferente, unas más frágiles y otras más dúctiles, y el desplazamiento de rotura puede diferenciar una mezcla de la otra.
- Índice de rigidez a tracción (IRT): Se define como la relación entre la carga media, $\frac{1}{2} F_{max}$, y el desplazamiento, Δm , correspondiente a ese valor. Este índice indica una pseudo-rigidez que muestra la flexibilidad de la mezcla bituminosa. A mayor índice de rigidez a tracción menos flexible es la mezcla. El índice de rigidez de tracción se calcula de acuerdo con la siguiente expresión:

$$I_{RT} = \frac{\frac{1}{2} \cdot F_{max}}{\Delta_{map}}$$

Donde

IRT: Índice de rigidez a tracción (KN/mm)

F_{max}: Carga máxima registrada (KN)

Δ_{map}: Desplazamiento antes de la carga máxima a 1/2 F_{max} (mm).

- **Energía disipada o de fractura (GD o GF):** Se define como el trabajo total realizado en el proceso de fisuración, W_D, dividido entre el área de ligamento o fractura, perpendicular a la fuerza aplicada. Donde el cálculo del trabajo realizado y la energía disipada en el proceso de fisuración se calculan de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$W_D = \sum_{i=1}^n (x_{i+1} - x_i) \cdot (y_i) + 0.5 \cdot (x_{i+1} - x_i) \cdot (y_{i+1} - y_i)$$

Donde:

W_D: Trabajo realizado en el proceso de fisuración, área bajo curva carga – desplazamiento (KN-mm).

x: Desplazamiento registrado (mm).

y: Carga registrada (mm).

n: Punto en que la carga ha descendido a 0,1 KN.

$$G_D = \frac{W_D}{h \cdot l}$$

Donde:

G_D: Energía disipada en el proceso de fisuración (J/m²).

W_D: Trabajo realizado en el proceso de fisuración, área bajo curva carga – desplazamiento (KN-mm).

h: Espesor de la probeta (m).

l: Longitud inicial de ligamento (m).

- **Índice de tenacidad (IT):** Se define como la energía disipada en el periodo de relajación o softening multiplicada por un factor de fragilidad, el cual es el desplazamiento realizado desde la carga máxima, F_{max}, hasta que la carga ha caído a la mitad de su carga total. Este índice tiene la finalidad de evaluar la tenacidad de la mezcla bituminosa, considerándose ésta como ausencia de fragilidad. Por tanto, a medida que este parámetro aumenta, la

mezcla es más tenaz, y por otra parte, a medida que este factor disminuye, la mezcla tiene un comportamiento de rotura final con menos deformación. Sus variables se ilustran en la Figura 1 y su expresión es la siguiente:

$$I_T = \frac{W_D - W_{F_{max}}}{h \cdot l} \cdot (\Delta_{mdp} - \Delta_{F_{max}})$$

Donde

IT: Índice de tenacidad (adimensional).

W_D: Trabajo realizado en el proceso de fisuración, área bajo curva carga–desplazamiento (KN-mm).

W_{Fmax}: Trabajo realizado hasta carga máxima (KN -mm).

F_{max}: Carga máxima (KN).

Δ_{ma}: Desplazamiento a 1/2 F_{max} antes del pico (mm).

Δ_{Fmax}: Desplazamiento a F_{max} (mm).

Δ_{mdp}: Desplazamiento a 1/2 F_{max} post pico (mm).

ΔR : Desplazamiento a F = 0,1 KN (mm).

4. Resultados

4.1 Densidades

En la Figura 2 se muestra la amplitud de la población normalizada de las medias de las densidades obtenidas para los testigos extraídos en cada una de las campañas de extracción realizadas en la Obra 1 y Obra 2. A fin de ver su correspondencia con la realidad posterior de la obra se ha marcado la franja de valores obtenida en laboratorio con mezclas recicladas similares. Es necesario considerar que los resultados de

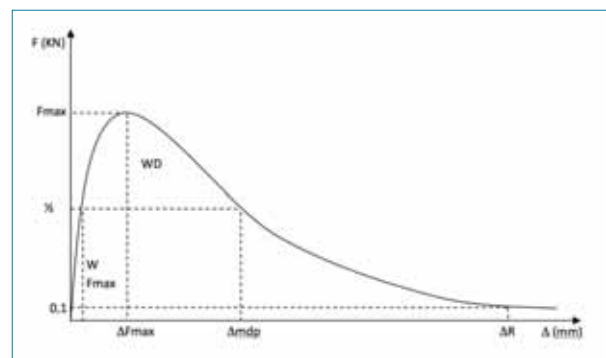


Figura 1. Representación gráfica de los parámetros del ensayo Fénix.

Mezclas bituminosas en servicio con altas tasas de material reciclado

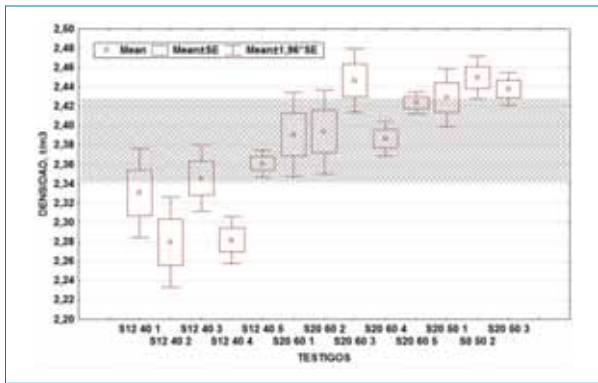


Figura 2. Densidades obtenidas para los testigos.

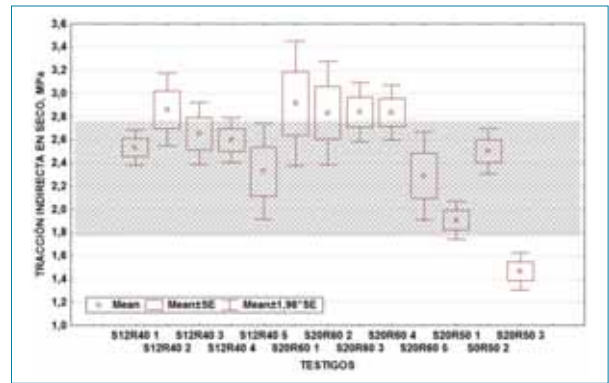


Figura 3. Resistencia a tracción indirecta en seco.

laboratorio corresponden a probetas fabricadas al efecto, mientras que los testigos son el producto de la puesta en obra y varios años de servicio. A pesar de todo indicar el rango de estos resultados puede ser una referencia útil.

Las barras de error representan dos veces la desviación estándar de las medias de los valores de densidad para cada serie de testigos. El coeficiente de variación (CV) se mantuvo entre el 1 % y el 2,3 % para todas las campañas de ambas mezclas. Las densidades de las mezclas S20 tanto para 60% como para el 50% de RAP fueron menos dispersas que las S12R40.

La densidad de los testigos fue inferior en la mezcla S12R40 que en las S20R50 y S20R60, circunstancia que está de acuerdo con las granulometrías y los espesores de ambas, 5 cm en la primera y 8 cm en las segundas. Los áridos eran de la misma procedencia. Es de destacar la buena homogeneidad de las series de valores.

4.2 Ensayos de tracción indirecta

En la Figura 3 se muestran los resultados obtenidos para la resistencia a tracción indirecta para las tres mezclas recicladas procedentes de las Obras 1 y 2.

Para las mezclas S12R40 y S20R60, la resistencia a tracción indirecta a 15°C se mantuvo estable y con valores muy satisfactorios, con una última campaña dentro de lo normal y con mayor dispersión centrada en valores de 2,3 MPa. El coeficiente de variación osciló entre 7.6% y 13.9%, salvo los testigos S20R60 1, S20R60 5, y S20R40 5 que alcanzaron el 16%, 19 y 20.3 respectivamente.

Los testigos de la S20R50 dieron también valores correctos en las dos primeras campañas y bajos en la tercera, en los

tres casos bastante homogéneos. Los coeficientes de variación de estas campañas estuvieron entre el 7.6 y el 12.5 %.

4.3 Módulos de rigidez

A continuación se presentan los valores promedios de los módulos resilientes y de rigidez de todos los testigos extraídos de las dos Obras.

En la Figura 4 se observa claramente como esta magnitud ha sido la que mayor dispersión ha presentado, lo cual es normal pues el módulo de rigidez es muy sensible a pequeñas variaciones en el índice de huecos y contenido de betún. Por lo tanto a pequeñas variaciones de la densidad corresponden variaciones importantes de módulo. Para la primera campaña se empleó el procedimiento de ensayo descrito en la Norma NLT- 360/91, mientras que en el resto se siguió la norma UNE-EN 12697-26:2006 Anexo D. En este caso, el primer método ya obsoleto, parece haber dado valores más bajos y homogéneos que el actual. Los coeficientes de varia-

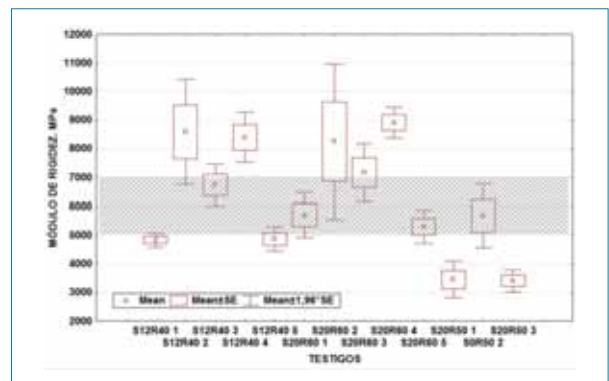


Figura 4. Módulos de los testigos.

ción han oscilado desde un 5.7% al 26%, alcanzando el 33% en el testigo S20R60 2.

Coefficientes de variación del 10% a 15% son normales en laboratorio, y hasta el 20% también son normales para medidas en obra antes de su entrada en servicio, sin embargo al cabo de los años la variabilidad tiende a ser mayor, ya que los módulos más bajos se degradan más al paso de las cargas y cuanto más huecos, o menos módulo, mayor degradación también por los agentes atmosféricos. Esto hace que las dispersiones crezcan en el tiempo.

4.4 Sensibilidad al agua

A partir de la tercera campaña de testigos de la Obra 1 y de la segunda de la Obra 2, se realizaron adicionalmente ensayos de tracción indirecta en húmedo, además de en seco, para evaluar la sensibilidad al agua de la mezcla y su evolución con el tiempo.

En Figura 5 se muestra los datos obtenidos en los ensayos de sensibilidad al agua así como la línea roja de exigencia normativa española para el diseño en laboratorio, y en testigos tomados en obra. La resistencia conservada varió de forma importante en la mezcla S20R60, mientras que se mantuvo constante para la mezcla S12R40. Los coeficientes de variación de los ensayos realizados en húmedo fueron significativamente superiores a los de los ensayos realizados en seco, en promedio del 13% en seco y 22% en húmedo.

Para los testigos procedentes de la S20R50 se observó igualmente un ligero incremento de la resistencia conservada de un año para otro. Aun así este incremento fue menor a la propia dispersión del ensayo que en este caso de nuevo

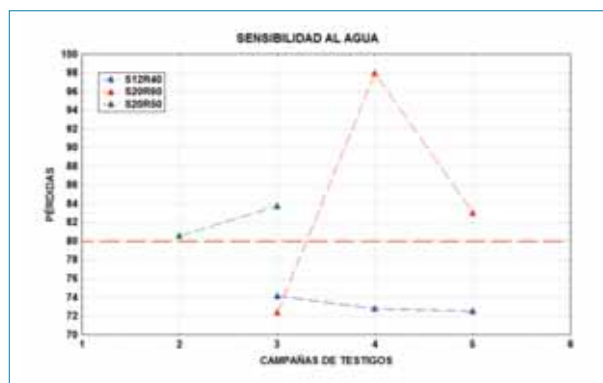


Figura 5. Resistencia conservada de los testigos.

volvió a mostrar un valor mayor para los ensayos en húmedo, coeficiente de variación promedio del 10% en seco y 15% en húmedo.

La mezcla S12R40 ha sido la que ha dado valores más bajos en húmedo probablemente debido a ser la capa más superficial de las tres, recubierta por el microaglomerado F8. Como se verá más adelante, en las condiciones exigidas por la normativa española de mezclas recicladas en caliente, los valores de resistencia a tracción a 5°C en seco y húmedo serían correctos para testigos tomados en obra, y mucho más para los tomados años después.

4.5 Ensayo Fénix

En lo que se refiere a los ensayos Fénix, se presentan por separado los resultados obtenidos para la Tensión Máxima, Energía de Fractura, Índice de Rigidez a Tracción e Índice de Tenacidad. Las campañas de extracción de las que se dispone de datos son de la 3ª, 4ª y la 5ª de la Obra 1 (S12R40 y S20R60), y de las dos últimas de la Obra 2 (S20R50).

Se dispone solamente de tres testigos por campaña y tipo de mezcla, por lo que no se ha considerado ninguna distribución estadística, indicando la media de los tres valores y el máximo y mínimo.

En la Obra 1 la tensión máxima, o Resistencia a Tracción, de los testigos ha mostrado un comportamiento discontinuo pero acorde con los resultados de laboratorio, las mezclas han presentado valores más similares para la 3ª y 5ª campañas, y valores algo inferiores para la 4ª campaña. Los valores de la Energía de Fractura también están dentro de los obtenidos en laboratorio si bien tienen una variación heterogénea con

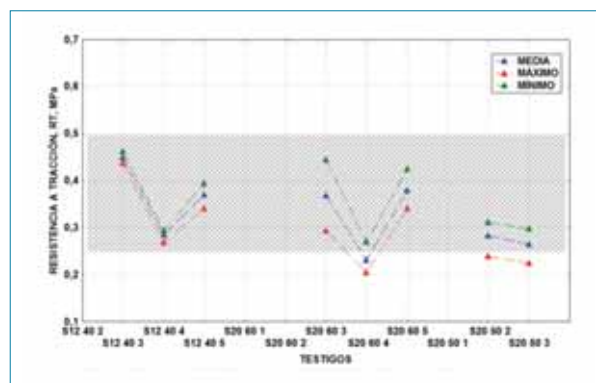


Figura 6. Tensión máxima promedio obtenida en el ensayo Fénix.

Mezclas bituminosas en servicio con altas tasas de material reciclado

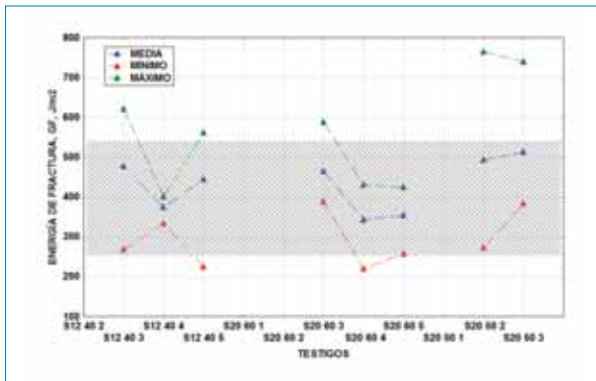


Figura 7. Energía de fractura.

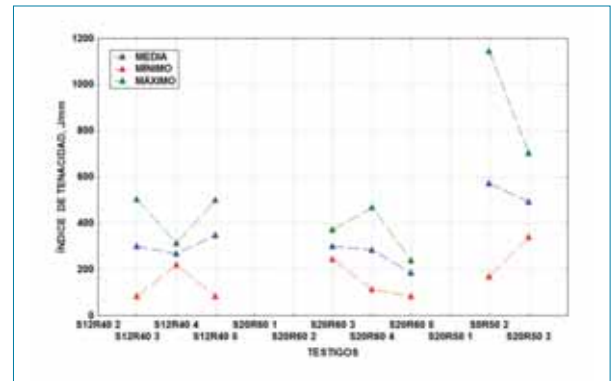


Figura 9. Índice de tenacidad.

medias muy parecidas. Sin embargo, el Índice de Rigidez a Tracción Indirecta, medida representativa de la rigidez para pequeñas deformaciones, si ha aumentado con el paso del tiempo para las dos mezclas.

En la Obra 2, mezcla S20R50 la Resistencia a Tracción se ha mantenido constante y ha sido la variable que menor variación ha mostrado. La Energía de fractura en este caso presenta valores medios elevados respecto de los obtenidos en laboratorio y parecidos en las dos campañas, así como una alta variabilidad con valores máximos elevados. También aquí, al igual que en el caso de los testigos de la Obra 1, el Índice de Rigidez a Tracción, IRT, o la rigidez para pequeñas deformaciones, ha aumentado regularmente con el paso del tiempo, aunque la variación de los resultados pertenecientes a la última campaña ha sido elevada.

Del Índice de Tenacidad no se tienen referencias de laboratorio. El comportamiento de las mezclas S12R40 y S20R60 es similar con valores comprendidos entre 100 y 500

J/mm, en cambio los de la S20R50 son mucho más elevados y más dispersos. Comparando con la Energía de Fractura, y con la Resistencia a Tracción se deduce que si bien en media no difieren demasiado, la cola de deformación, es decir la tenacidad, es mayor y más dispersa en la mezcla S20R50 que en las otras dos.

5. Comparación de los datos más significativos

Es interesante comparar la resistencia a tracción indirecta en seco y húmedo de todas las campañas y en cada uno de los tramos ensayados, y comparar sus valores con la normativa vigente en España recogida en la Orden Circular 8/2001 reciclado de Firmes, donde se exige que a 5°C de temperatura, empleando los dispositivos de carga en la Norma NLT-360 para la determinación del módulo resiliente, se cumplan los mínimos establecidos en la Tabla 2.

Dado que los valores de tracción indirecta se han obtenido según la Norma UNE-EN 12697-23 a 15°C y las exigencias son a 5°C, se han corregido estos valores proporcionalmente a los módulos de rigidez obtenidos a varias temperaturas, con lo que se han obtenido los siguientes valores de referencia a 5°C

Las poblaciones de cada campaña-tipo de mezcla constan desde tres a cinco valores por lo que se ha preferido representar los valores medios, máximos y mínimos.

El comportamiento en cuanto a la resistencia a tracción en seco y húmedo es muy buena salvo algún valor en la última campaña de la S12R40 y S20R50. Por otro lado es evidente que los valores exigidos por la Orden Circular en seco y húmedo, se refieren a la toma de testigos durante la obra, y

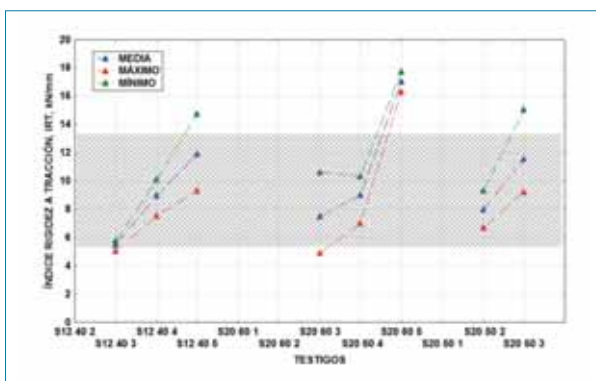


Figura 8. Índice de rigidez a tracción.

Tabla 2. Valores de resistencia mínima a tracción indirecta de testigos según la OC 8/2001 sobre reciclado de firmes.

Tipo de mezcla	Aceptación		Penalización	
	Seco (*) (Mpa)	Húmedo (**) (Mpa)	Seco (*) (Mpa)	Húmedo (**) (Mpa)
Densa (D) y Semidensa (S)	2,5	1,9	2,1	1,6
Gruesa (G)	2	1,5	1,6	1,2

(*) Directamente sobre los testigos extraídos.

(**) Sobre testigos que hayan permanecido sumergidos durante 24 horas (24 h) en agua a temperatura de sesenta grados Celsius (60° C).

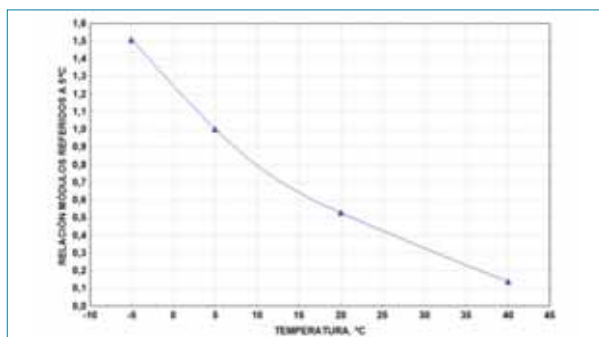


Figura 10. Relación Módulo de Rigidez vs temperatura.

es normal que estas secciones al cabo de los años de estar sometidas a fatiga y a los agentes atmosféricos, su resistencia haya decaído algo respecto de sus valores iniciales. Por lo que se deduce que inicialmente cumplían sobradamente.

6. Conclusiones

De los ensayos realizados en varias vías en servicio con mezclas bituminosas fabricadas con distintos porcentajes de reciclado, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

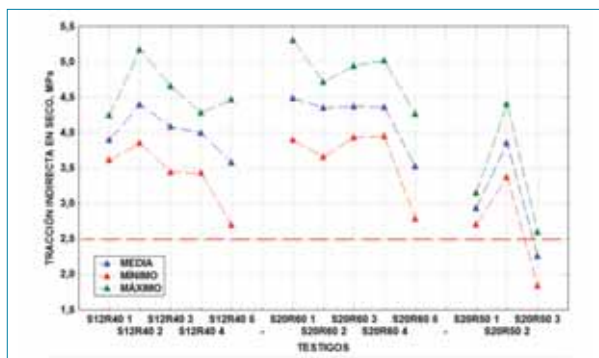


Figura 11. Tracción indirecta en seco.

- Los parámetros mecánicos de los testigos presentan unas dispersiones normales en los valores obtenidos. Estas dispersiones, en testigos tomados varios años después de su puesta en servicio, son muy aceptables considerando que el potencial de degradación tanto a fatiga como por los agentes atmosféricos, es proporcional a los módulos y huecos iniciales, de tal forma que los módulos más bajos tienden a decaer más, con lo que aumenta la variabilidad inicial.
- La variabilidad normal espacial es mayor que la temporal en el intervalo de toma de testigos, por lo que para conocer la evolución temporal sería necesario un mayor tiempo de observación.
- El hecho de que la S12R40 se haya compactado en un espesor menor, y que el material de reciclado se haya incorporado en una sola fracción en la S20R50, solamente ha influido en las densidades, pero no en sus características mecánicas.
- Las densidades de la S12R40 han sido inferiores a las de la S20R60, lo que se explica por el menor espesor de la primera, o bien por el menor porcentaje de betún rejuvenecedor.

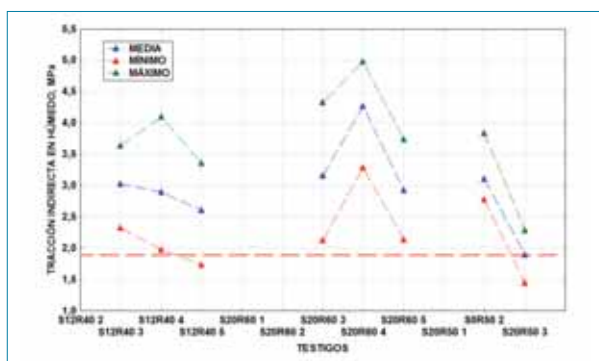


Figura 12 Tracción indirecta en húmedo.

Mezclas bituminosas en servicio con altas tasas de material reciclado

- Las sensibilidades al agua han sido buenas en todos los casos, y menores en la S12R40 que en la S20R60 y S20R50. Hay que considerar que la S12R40 es la capa menos protegida del agua, una capa de tipo F8.
- Los índices de rigidez a tracción, que se pueden interpretar como la rigidez para pequeñas deformaciones, es el parámetro que en función del tiempo ha aumentado en las tres mezclas.

Como conclusión final se pone de manifiesto que las mezclas recicladas a altas tasas con varios años de servicio presentan unas características mecánicas con unos valores y coeficientes de variación normales y comparables a las mezclas convencionales. La intersección de las variables que definen las mezclas: contenidos de betún, granulometrías, compactaciones, espesores, etc, proporcionan coeficientes de variación similares a las mezclas no recicladas.

No obstante las mezclas recicladas en caliente en planta con altas tasas de material de fresado pueden, a nivel de laboratorio, superar a las standard claramente para capas intermedias y de base, incluso para tasas más modestas, en ro-

dadura. Para conseguir este objetivo se han mejorado los procesos de fabricación y puesta en obra, la clasificación del material de fresado en dos ó más fracciones, diseño más riguroso de los betunes rejuvenecedores, cuidado de los tiempos de mezclado para la buena dispersión de los ligantes en la masa de áridos, y la necesidad de mantener el RAP con una humedad adecuada mediante acopio cubierto, o secado en el momento de su utilización.

7. Referencias

1. Orden Circular 8/2001. Reciclado de Firmes. Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento.
2. Evaluación de los métodos de reciclado y rehabilitación a partir del análisis de los métodos experimentales del proyecto europeo Parámix. R Miró y otros. 2007
3. Análisis del comportamiento de un firme reciclado en central en caliente con alta tasa tras un año en servicio. MA del Val y otros.
4. Estudio del comportamiento de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta. J Alarcón. 2003.

#6

AFIRMACIONES ASFÁLTICAS

Las mezclas asfálticas pueden reutilizarse indefinidamente con técnicas de reciclado (EAPA)

#SOSTENIBILIDAD_Y_MEDIO_AMBIENTE