

# Rodaduras urbanas sostenibles

En los últimos años, dentro de la corriente de creciente concienciación y endurecimiento de las diferentes normativas ambientales, se han ido valorando y tratando de corregir los impactos que provoca sobre el medio ambiente la fabricación y aplicación de mezclas bituminosas. El concepto de sostenibilidad ha llegado al campo de las mezclas bituminosas con tres componentes principales: la reducción de costes, la reducción de emisiones y la reducción del consumo de materias primas, preservando recursos para el futuro.

Las actividades de conservación y rehabilitación de los firmes de las carreteras y otras vías de baja velocidad, generan una cantidad creciente de residuos procedentes del fresado de las capas de mezclas bituminosas deterioradas. Este material, que tiene un coste elevado y unas propiedades excepcionales, debe reutilizarse en mezclas del mismo tipo y función para su óptimo aprovechamiento. Cada vez estamos más obligados a prever soluciones para los residuos generados en obras de este tipo y obtener mezclas a menor temperatura.

En esta comunicación se presenta el proyecto de investigación y desarrollo de mezclas que permitan obtener rodaduras templadas recicladas con nuevas formulaciones de emulsión aptas para vías urbanas, que contribuyan a la sostenibilidad del patrimonio vial urbano, sin descartar poder ser empleadas en otros tipos de vías, mediante la reutilización de materiales de alta calidad con bajo consumo de energía y baja generación de emisiones en su fabricación, mejorando la durabilidad de los firmes y la gestión y explotación de los recursos necesarios para construirlos.

**Palabras clave:** mezclas, reciclado, templadas, alta tasa, capas de rodadura, material a reciclar de mezclas bituminosas, sostenibilidad, rehabilitación, conservación, emulsión.

In the last few years, due to growing awareness and stricter environmental standards, impact on the environment of production and application of bituminous mixes is being evaluated and corrected. The concept of sustainability, when applied to bituminous mixes, consists of the following three main aspects: cost reduction, reduction of emissions and reduction of raw material consumption, in order to preserve natural resources for future generations.

Preservation and rehabilitation activities of road pavement and low speed tracks generate an increasing number of waste as a result of milling of deteriorated layers of bituminous mixes. This waste material, with an elevated cost and exceptional properties, should be reused in mixes of the same type and with the same function in order to facilitate optimum utilization. More and more there is a need to anticipate solutions to waste generated in this kind of projects and to obtain mixes at lower temperatures.

This paper describes an investigation and development project of mixes which offer the possibility to obtain half-warm recycled wearing courses with new emulsion formulations, suitable for urban roads, that contribute to sustainability of urban roads heritage, without excluding their use in any other road type, by reusing high quality materials of low energy consumption and low emissions during production, so improving both pavement durability, management and exploitation of the needed resources to produce them.

**Keywords:** mixes, recycling, half-warm, high rate, wearing courses, recyclable materials, sustainability, rehabilitation, preservation, emulsion

**Francisco Guisado Mateo,**  
francisco.guisado@repsol.com  
**Emilio Moreno Martínez,**  
Centro Tecnológico de Repsol

**Patricia Díaz Martín,**  
**Antonio Ramírez Rodríguez,**  
Sacyr Construcción

**Rodrigo Miró Recasens,**  
**Ramón Botella Nieto,** ramon.botella@upc.edu  
Universidad Politécnica de Cataluña

## 1. Introducción

El impacto del sector de las mezclas bituminosas en caliente sobre el medioambiente no es, en absoluto, despreciable. Sin entrar a valorar los impactos producidos durante los procesos de fabricación de componentes (áridos y ligantes), y por los equipos utilizados en la fabricación y extendido, la producción de mezclas bituminosas en caliente (MBC) requiere un consumo energético importante y genera un cierto volumen de emisiones de gases de efecto invernadero.

En respuesta a estos dos grandes aspectos relativos a la sostenibilidad del patrimonio viario se plantea que, frente a una mezcla convencional fabricada a unas temperaturas entre 140° C y 170° C, con un consumo de materias primas, por tonelada de mezcla fabricada, de 0,95 t de árido y 0,05 t de ligante, se desarrolle una mezcla equivalente fabricada a 90-100° C, cuasi sin consumo de áridos, con la mitad de gasto de ligante y también del orden de la mitad en combustible en su fabricación.

Dada la carestía de los áridos, las cada vez más limitadas posibilidades de apertura de nuevas canteras, la lejanía a los centros de suministro de áridos y el movimiento mundial de políticas de ahorro energético, estas innovadoras mezclas recicladas templadas para capas de rodadura, con empleo hasta casi el total de los áridos y del ligante recuperados del pavimento, tiene las mejores perspectivas de solucionar los problemas indicados. En este documento se expone su estudio, caracterización y aplicación, desarrollándose la fase de seguimiento para poder definir y normalizar su empleo en una etapa posterior.

El destino de estas nuevas mezclas es su aplicación en la renovación del patrimonio viario urbano sin descartar otras vías, contexto en el que unas mezclas con un importante ahorro económico facilitarán que las administraciones loca-

les puedan optimizar mejor los recursos disponibles y atender adecuadamente su mantenimiento, además de que en este contexto, la reducción de emisiones, tanto de gases de efecto invernadero en su fabricación como de humos en su puesta en obra son más que necesarias.

El objetivo del proyecto fue la investigación y desarrollo de mezclas que permitan obtener rodaduras templadas recicladas urbanas. Para cumplir este objetivo se dividió el estudio en distintas fases. En una primera fase, se realizó un análisis y caracterización del fresado y áridos. Una vez estudiado el fresado, se procedió a realizar los estudios de desarrollo de emulsiones específicas para las distintas mezclas a estudiar y definidas estas emulsiones se realizaron los estudios de las mezclas y la obtención de las fórmulas de trabajo. Finalmente, la última fase contempla la verificación de estas mezclas, mediante pruebas de campo que se han realizado en noviembre de 2014.

La Figura 1 detalla la metodología seguida durante el estudio de investigación desarrollado.

## 2. Estudios de laboratorio

### 2.1 Obtención, selección, análisis y caracterización de muestras de fresado y áridos de nuevo aporte.

Se inició la búsqueda del fresado más adecuado para el tratamiento y tecnología que vamos a emplear en el desarrollo



Figura 1: metodología de trabajo.



Figura 2. Clasificación del MRMB en dos fracciones.

de las mezclas templadas recicladas con emulsión. El material a reciclar de mezclas bituminosas (MRMB) seleccionado procedió de la capa de rodadura de una calle de Madrid. Una vez seleccionado, se procedió a realizar su clasificación en dos fracciones distintas, una gruesa (5/25 mm) y otra fina (0/5 mm), en una instalación específicamente diseñada para ello propiedad de Sacyr Construcción, que permitió separar las fracciones superiores a 60 mm, pasar las comprendidas entre 25 y 60 mm por un molino disgregador, reducir a un 0/25mm y clasificar en las dos fracciones mencionadas anteriormente.

Este tratamiento es fundamental para obtener un control preciso y ponderal de cada fracción en la composición final de la mezcla, asegurando de este modo su regularidad y garantizar fabricar mezclas recicladas con altos porcentajes de MRMB.

Previamente se realizó un estudio del material reciclado de mezclas bituminosas, mediante una caracterización en laboratorio de las muestras obtenidas. Los ensayos realizados fueron:

- Granulometría de cada fracción de fresado, UNE EN 933-1.
- Recuperación del ligante envejecido, UNE EN 12697-3.
- Contenido en ligante de cada fracción, UNE EN 12697-1.
- Penetración del ligante recuperado, UNE EN 1426.
- Punto de reblandecimiento del ligante recuperado, UNE EN 1427.
- Otras caracterizaciones químicas y físicas del ligante y áridos recuperados.

Tabla 1. Análisis Fracciones MRMB.

	Fracción 5/25		Fracción 0/5	
UNE EN 933-1	Negro	Blanco	Negro	Blanco
TAMIZ UNE (mm)	% Pasa			
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0
22,4	99,5	100,0	100,0	100,0
16	91,7	96,7	100,0	100,0
8	32,4	58,3	100,0	100,0
4	5,3	25,1	71,8	82,6
2	4,7	20,5	32,9	53,6
0,5	2,9	14,6	11,2	25,1
0,25	1,3	11,6	1,4	20,0
0,063	0,2	6,4	0,3	10,2
% Ligante s/a	3.65±0.5		6.17±0.04	

## Rodaduras urbanas sostenibles

La caracterización física de los áridos recuperados del fresado fue el que se recoge en la Tabla 2.

Los áridos vírgenes empleados en los estudios de algunas de las mezclas bituminosas templadas recicladas correspondieron a las fracciones 12/18, 6/12 y 0/6 mm de origen silíceo (Madrid), arena de origen calizo (Madrid) y 6/12 Milonita de Almonacid (Toledo). Las conclusiones que se sacaron de esta fase de estudio fueron:

- El ligante procedente del fresado no estaba excesivamente envejecido.
- La composición de las dos fracciones generadas son adecuadas para ser empleada en mezclas 100% recicladas y para otras mezclas con menor tasa de reciclado. Poseen porcentajes de ligantes típicos para estas fracciones, destacando la riqueza que posee la fracción fina y un poco

más alta de lo normal la fracción gruesa, indicando que vienen de capas de rodadura de calles.

- Los áridos recuperados del fresado de mezclas bituminosas pueden ser adecuados para ser empleados para mezclas de capa de rodadura, en base a los resultados obtenidos de los ensayos efectuados a los mismos.
- Los áridos vírgenes son adecuados para ser empleados en las mezclas recicladas templadas que se van a estudiar.

### 2.2 Estudios de caracterización y desarrollo de emulsiones específicas

La siguiente actividad consistió en estudios de caracterización y desarrollo de emulsiones específicas para las distintas tipologías de mezclas a estudiar. El planteamiento empleado se resume en el esquema recogido en la Figura 3.

Tabla 2. Análisis físico Fracciones MRMB.

<b>Coefficiente de desgaste de los ángulos</b>	<b>Según UNE-EN 1097-2</b>
DLA	20
<b>Determinación caras de fractura</b>	<b>Según UNE-EN 933-5</b>
Trituradas, %	28,0
Totalmente trituradas, %	64,0
Redondeadas, %	7,7
Totalmente redondeadas, %	0,2
<b>Determinación índice de lajas</b>	<b>Según UNE-EN 933-3</b>
IL =	7,1
<b>Densidad relativa y absorción árido grueso</b>	<b>Según UNE-EN 1097-6</b>
Peso esp. aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,630
Peso esp. s.s.s. (g/cm <sup>3</sup> )	2,647
Peso esp. Real (g/cm <sup>3</sup> )	2,676
Absorción %	0,65
<b>Densidad relativa y absorción árido fino</b>	<b>Según UNE-EN 1097-6</b>
Peso esp. aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,604
Peso esp. s.s.s. (g/cm <sup>3</sup> )	2,652
Peso esp. real (g/cm <sup>3</sup> )	2,693
Absorción %	2,05
<b>Determinación equivalente de arena</b>	<b>Según UNE-EN 933-8</b>
E.A.	51%

Tabla 3. Análisis químico MRMB.

Recuperación del ligante para su caracterización (UNE EN 12697-3)			
Ensayo	Unidad	Norma	Valor
Penetración 25 °C	0,1 mm	UNE EN 1426	14
Pto. de reblandecimiento, A&B	°C	UNE EN 1427	71.8
Fraccionamiento ligante recuperado			
Asfaltenos (A)	%	ASTM D 2006	38.22
Polares (N)	%	ASTM D 2006	21.71
1ª acidafinas (A1)	%	ASTM D 2006	11.75
2ª acidafinas (A2)	%	ASTM D 2006	17.80
Saturados (P)	%	ASTM D 2006	10.06
Reactividad química (CRR)	0.4 > CRR < 1.5		1.20
Inestabilidad coloidal (Ic)	Ic < 1.0		0.94
Compatibilidad química C	C > 0.5		2.16



Figura 3. Caracterización y desarrollo de emulsiones específicas para las distintas tipologías de mezclas a estudiar.

Estos estudios indicados en esta fase sirvieron como base sólida para la formulación de las emulsiones a probar y emplear, y enfrentarnos con todas las nuevas mezclas planteadas en este proyecto.

Todas las pruebas de emulsificación fabricadas en planta piloto y el uso de las diferentes emulsiones en las mezclas propuestas nos ha permitido conocer qué composición puede

ser la más favorable para obtener propiedades mecánicas en las mezclas templadas recicladas que cumplan las especificaciones indicadas y referenciadas en el pliego de prescripciones técnicas PG 3 para mezclas en caliente. Todos los resultados con las diferentes mezclas originaron unas conclusiones que se expondrán más adelante.

Las formulaciones de las emulsiones para mezclas templadas a diseñar y su definición se basó en:

- Encontrar emulsiones que nos permitieran envueltas y trabajabilidad/manejabilidad adecuadas para su extensión y compactación a escala real. Por lo que fue importante definir bien el tipo de ligante residual de las emulsiones, en cuanto a características físicas, reológicas y químicas.
- Para mezclas con tasa total de reciclado, en principio, no fue necesario emulgentes que potenciasen la adhesividad con el fresado del MRMB, aunque si existiese pérdida de ésta debilidad en términos de resistencia a tracción indirecta por la acción del agua, es posible utilizar emulgentes que mejoren esta característica.

## Rodaduras urbanas sostenibles

- Para mezclas con menor tasa de reciclado, por el tipo de áridos empleados en el proyecto, fue necesario emplear aditivos en el betún que mejorasen la adhesividad del ligante residual, además de poder potenciar esta característica con los emulgentes más idóneos.
- Las emulsiones modificadas y no modificadas se diseñaron con una concentración sobre el 67% de ligante residual final, observándose buenas envueltas, trabajabilidad y comportamientos.
- Son emulsiones tipo C67B3 o C67BP3, con rotura espontánea de la emulsión a las temperaturas de fabricación de las mezclas templadas (100 °C), y que el poco agua residual que queda ayude a la manejabilidad/compactabilidad de la mezcla.

### 2.3 Estudio de las mezclas y obtención de las fórmulas de trabajo

El sistema de compactación empleado y elegido para obtener las mezclas en el presente proyecto fue la Prensa Giratoria, según UNE EN 12697- 31, empleando: presión de contacto de 600 KPa, ángulo de giro 0,82°, velocidad de giro de 30 r.p.m., y moldes de 100 mm. Se considera el sistema más adecuado para obtener probetas a nivel de laboratorio para la tecnología de las mezclas templadas con emulsión y el que más se acerca a la realidad de lo que ocurre a escala real.

Las condiciones de fabricación empleadas y seleccionadas en las mezclas fueron:

- Temperatura del MRMB: 100 °C.
- Temperatura del árido nuevo aporte: 115-120 °C.
- Temperatura de la emulsión: 60 °C.
- Temperatura de mezcla: 90 – 100°C.
- Temperatura de compactación 70 - 80 °C.

Una vez desarrolladas las emulsiones específicas se comenzaron los trabajos de diseño de las mezclas recicladas templadas. Las mezclas programadas fueron a alta tasa (50%-80%) y a tasa total (>80%) para capas de rodadura, a continuación se exponen los resultados de algunas de las mezclas estudiadas:

- Mezclas Templadas Discontinuas tipo BBTM: fabricar una mezcla BBTM11B a tasa total, 100% de MRMB, a la que hemos denominado BBTM 11B RT100.

- Mezclas Templadas Continuas tipo AC: tres mezclas con diferentes tasas de reciclado, 100, 70 y 50 % de MRMB, correspondientes a granulometrías entre densas y semi-densas, tipo asphalt concrete, denominadas AC RT100, AC RT70 y AC RT50.

#### **BBTM 11B RT100:**

La mezcla BBTM 11B RT100 se consiguió fabricar a partir de la fracción gruesa del fresado obtenido, 5/25 mm, para obtener una curva granulométrica (en blanco) que encaja casi en el huso de una mezcla tipo BBTM 11B, excepto en el Filler y en la zona de los tamaños más gruesos. Este último detalle podría mejorarse si en la planta de tratamiento del fresado, el corte por encima hubiera sido menor a 25 mm.

A pesar de estos comentarios, los resultados obtenidos muestran una mezcla potencialmente muy interesante que cumple ampliamente los objetivos del proyecto y novedosa desde el punto de vista medioambiental, tecnológico y de eficacia pres-tacional. En función de los resultados obtenidos en la fase de diseño, se fijó un óptimo final de ligante y emulsión de 5.45% s/a y 2.5-2.6 % s/a, respectivamente. Para las mezclas discontinuas se diseñaron tres emulsiones modificadas (A1, A2 y A3), que variaban en el grado de penetración del ligante base de la emulsión y su modificación. Los resultados obtenidos en cuanto a propiedades mecánicas fundamentales se muestran en la Tabla 4.

De los resultados obtenidos cabe destacar que se dispone de emulsiones modificadas para diseñar mezclas discontinuas

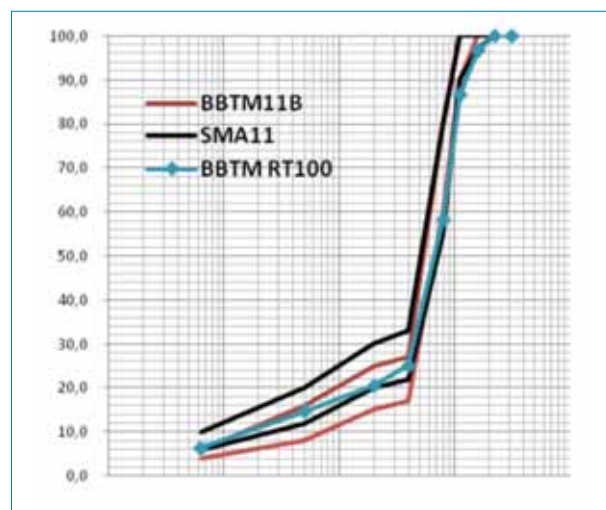


Figura 4. Curva granulométrica en blanco BBTM RT100.

Tabla 4. Resultados mecánicos mezcla BBTM RT 100% con las distintas emulsiones diseñadas.

Tipo emulsión	% B/a total	% Emulsión	Densidad, g/cm <sup>3</sup>	% VM	Módulo, MPa	RTI h, MPa	RTI s, MPa	% RC	WTS, mm/10 <sup>3</sup> ciclos
BBTM 11B RT100. A 1	5.45	2.60	2.098	13.7	3696	1.48	1.67	88.6	0.089
BBTM 11B RT100. A 2	5.45	2.55	2.100	13.6	3342	1.45	1.61	90.1	0.091
BBTM 11B RT100. A 3	5.45	2.55	2.101	13.5	2757	1.36	1.49	91.3	0.100

con tasas altas de reciclado y además con una característica importante, que son trabajables/manejables. Ofrecen una compactibilidad muy buena, dado que necesitamos un valor de energía de compactación baja (sobre 65 ciclos), ofreciendo propiedades volumétricas sobre 13-14% de huecos mezcla.

Se obtuvieron propiedades mecánicas bastante buenas, destacando fundamentalmente los valores de pendiente de deformación en pista, con valores  $\leq 0,1$  mm/10<sup>3</sup> ciclos, resistencias conservadas a la acción del agua  $\geq 90\%$ , con unos contenidos de ligante por encima del mínimo exigido en el pliego de prescripciones PG3 para mezclas discontinuas en caliente tipo B. En cuanto a módulos de rigidez son valores algo elevados para el tipo de mezcla que son y valores de cohesión en términos de resistencia atracción muy buenos.

#### AC RT100, AC RT70 y AC RT50

En cuanto a las mezclas tipo AC (Asphalt Concrete), se presentan los resultados de las tres mezclas con diferentes ta-

Tabla 5. Composición mezclas AC RT.

Materiales/Mezcla	ACRT100	ACRT70	ACRT50
RAP 0/5 mm	68	22,4	16
RAP 5/25 mm	32	47,6	34
% Ligante viejo s/a	4,5	3,1	2,2
6/12 Silíceo	-	22	32
0/6 Calizo	-	8	10

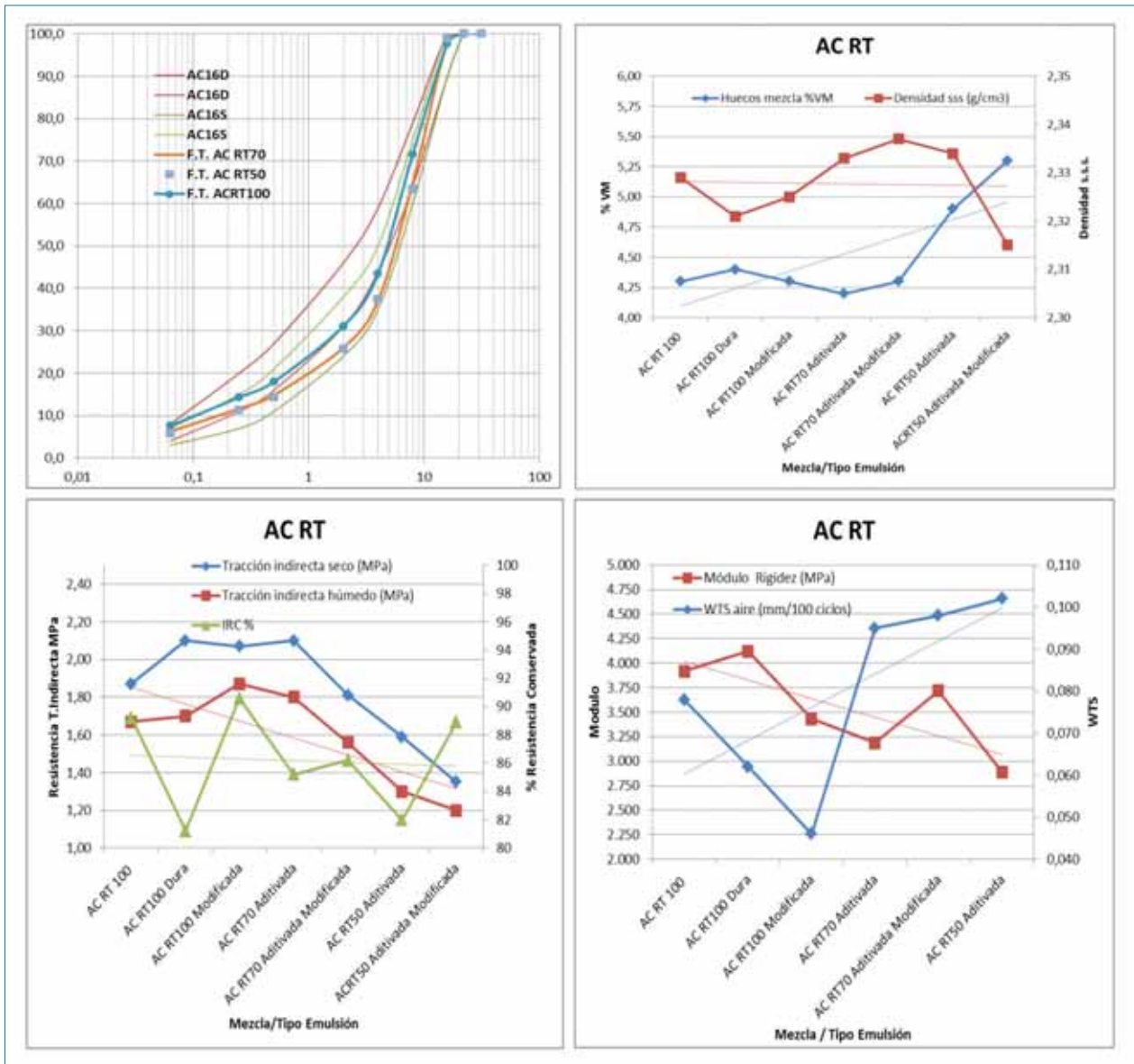
sas de reciclado 100, 70 y 50 %, denominadas AC RT100 AC RT70 y AC RT50 . La composición de los materiales de las dos mezclas fue la que figura en la Tabla 5.

Se emplearon tres emulsiones diferentes para las mezclas a tasa total, blanda, dura y modificada, y dos emulsiones para las mezclas de alta tasa, correspondiente a una convencional aditivada y otra modificada (Tabla 6).

En las figuras 5, 6, 7 y 8 se exponen gráficamente los resultados empíricos-fundamentales obtenidos.

Tabla 6. Resultados volumétricos y mecánicos mezclas AC RT.

Resultados / mezclas	AC RT 100 blanda	AC RT100 dura	AC RT100 modificada	AC RT70 aditivada	AC RT70 aditivada modificada	AC RT50 aditivada	AC RT50 aditivada modificada
Tracción indirecta seco (MPa)	1,87	2,10	2,07	2,10	1,81	1,59	1,35
Tracción indirecta húmedo (MPa)	1,67	1,70	1,87	1,80	1,56	1,30	1,20
IRC %	89,2	81,2	90,6	85,2	86,2	82,0	88,9
WTS aire (mm/100 ciclos)	0,078	0,062	0,046	0,095	0,100	0,102	0,074
Módulo rigidez (MPa)	3918	4120	3432	3186	3716	2889	2881
% Ligante final, s/a	6,0	6,2	6,3	6,0	6,0	5,5	5,5
Huecos mezcla, %VM	4,3	4,4	4,3	4,2	4,3	4,9	5,3
Densidad s.s.s (g/cm <sup>3</sup> )	2,33	2,32	2,33	2,33	2,34	2,33	2,32



Figuras 5, 6, 7 y 8. Curvas granulométricas y resultados mecánicos de las mezclas AC.

En las mezclas tipo AC con tasa total de reciclado, podemos conseguir porcentajes altos de ligante final en la mezcla, sobre el 6% s/a, valor que podemos aumentar si jugamos con emulsiones con ligante residuales más duros o modificados, alcanzando valores sobre 6,2-6.3% s/a. Esto nos indica que el ligante viejo tiene un peso importante dentro de las mezclas de tasa total, reflexionando que a las temperaturas de mezclado y compactación empleadas no existe una alta difusión inicial de ligante nuevo sobre el viejo. Los porcentajes de emulsión nueva a aportar van del 2,5 al 2.75% s/a, en función de la concentración de las emul-

siones. Destacar la buena compactabilidad que muestran estas mezclas, con energías de compactación relativamente bajas (menores que MBC, entre 44 y 65 ciclos) y manejabilidades buenas, incluso con la emulsión modificada, disminuyendo algo con la emulsión dura. En cuanto a propiedades mecánicas destacar los valores de deformación en pista, por debajo siempre de 0,1 mm/1000 ciclos, los cuales mejoran cuando se emplean emulsiones duras o modificadas, además hay que tener en cuenta que las proporciones que se generan de las dos fracciones del todo uno del MRMB, permiten obtener una curva granulométrica que en



teoría favorece este ensayo, además se podrá jugar con estas proporciones en futuros fresados si es necesario favorecer esta característica u otras. Los valores de sensibilidad al agua han sido bastante buenos, salvo con la emulsión dura, pero siempre por encima del 80%. Si nos fijamos en las especificaciones del PG3 para mezclas en caliente para esta característica y capa de rodadura, fija un valor del 85%, así que con las emulsiones blanda y modificada este valor se cumple ampliamente. Indicar que existe la posibilidad de emplear en la formulación de la emulsión con el ligante más duro, emulgentes que favorezcan más esta característica y así obtener mejores valores de sensibilidad al agua. Los valores de resistencias a tracción indirecta son muy buenos, asemejándose a valores típicos de mezclas en caliente, indicando buenas cohesiones internas. Los valores de rigidez están entre 3500-4000 MPa, no indicando una rigidez excesiva si se comparan con valores típicos de mezclas en caliente de granulometría parecida, además hay que tener en cuenta que reciclamos el 100% de MRMB compensado con valores altos de ligante final en las mezclas.

Para las mezclas con alta tasa de reciclado, somos capaces de mantener los porcentajes finales de ligante del 6% s/a para las que contienen tasas del 70%, siendo necesario disminuir a contenidos del 5,5% s/a para las mezclas que tienen un 50% de material a reciclar, ya que a partir de este valor de tasa de recuperación el ligante de nuevo aporte tiene un peso más representativo en la nueva mezcla, aumentando los valores de deformación en pista.

Las mezclas con tasas del 70% se asemejan bastante a las de tasa total, los áridos de nuevo aporte no han resalta-do ninguna característica de las ensayadas, observándose la necesidad de aumentar la energía de compactación (sobre 90 ciclos), menor rigidez en la mezcla en términos de modulo, algo de mayor pendiente de deformación en pista pero con deformaciones finales semejantes a las del 100% y aumento del rejuvenecimiento del ligante final ya que aportamos más ligante nuevo. En cuanto a las mezclas con un 50% de MRMB, se observa un ligero aumento del contenido de huecos, siendo necesario aumentar la energía de compactación (sobre los 135 ciclos) por la mayor presencia de áridos vírgenes, menor módulo de rigidez, con valores de pendiente deformación similares a las otras mezclas y algo menos de cohesión en términos de resistencia a tracción indirecta.

## 2.4 Ensayos de fisuración y durabilidad

En la caracterización de estas mezclas se emplearon dos ensayos puestos a punto por el Laboratorio de Caminos de la UPC que permiten evaluar las propiedades mecánicas de estas mezclas y, sobre todo, su ductilidad y resistencia a fisuración, tanto bajo cargas monotónicas, ensayo Fénix, como bajo cargas cíclicas, ensayo EBADE [8]. Estos ensayos se realizaron a diferentes temperaturas con el fin de evaluar también la susceptibilidad de las mezclas fabricadas.

En cuanto al ensayo Fénix, una de las principales ventajas de la prueba es que simula el mecanismo de fisuración de las mezclas bituminosas mediante su principal modo de propagación de fisura cuando éstas son sometidas a esfuerzos térmicos y a las sollicitaciones de tráfico.

En la Tabla 7 se exponen los parámetros obtenidos del ensayo Fénix de las mezclas AC con tasas de reciclado del 100 y 70%:

Estas diferencias entre mezclas, así como el efecto de la temperatura, puede ser apreciado también en las siguientes figuras (figura 9, 10, 11, 12), en las que se han representado en función de la temperatura de ensayo el Índice de Rigidez a Tracción (IRT), la resistencia a tracción, la energía total de fractura (Gf) y el Índice de Tenacidad de las mezclas (IT). También se han presentado a modo de referencia, los resultados correspondientes a dos mezclas tipo AC fabricadas en caliente con betunes de penetración 50/70. Los resultados no muestran diferencias de tendencias en cuanto a IRT y resistencia a tracción, los valores de las mezclas recicladas templadas son similares a los obtenidos con mezclas convencionales fabricadas en caliente.

Donde sí se aprecian diferencias es en la variación de las energías de fractura e índices de tenacidad (figuras 13 y 14). Las mezclas en caliente presentan un descenso acusado de la energía al pasar de 5 a 20°C mientras que ese cambio es mucho menor, o no se produce, en las mezclas fabricadas templadas con emulsión. El índice de tenacidad resulta mayor a 20°C para las mezclas templadas que para las fabricadas en caliente. Esto supone que las mezclas recicladas templadas a 20°C presentan el mismo módulo y resistencia que las convencionales pero con mayor energía de fractura y tenacidad. A temperaturas bajas las mezclas recicladas templadas, presentan características similares a las fabricadas en caliente con un betún 50/70.

Tabla 7. Resultados Ensayo Fénix, mezclas AC RT.

Emulsión	Temperatura (°C)	IRT (KN/mm)	GF(J/m²)	IT (J/mm*1E-6)
Dura 100% RAP	20	8	622	369
	5	15	649	142
	-5	15	440	55
	-15	15	302	24
Blanda 100% RAP	20	8	555	416
	5	15	649	123
	-5	15	360	19
	-15	17	252	14
Modificada 100% RAP	20	8	588	435
	5	15	762	192
	-5	15	602	121
	-15	18	251	11
Aditivada 70% RAP	20	7	624	598
	5	15	651	89
	-5	17	406	52
	-15	17	350	24

Los parámetros obtenidos del ensayo Fénix de la mezcla tipo Discontinua BBTM RT100 fueron los que se presentan en la Tabla 8.

Se obtuvieron al igual que para las mezclas AC las curvas de rotura para la mezcla BBTM RT100 con dos emulsiones (más dura y más blanda) a diferentes temperaturas. Estas gráficas muestran, al igual que en el caso de las mezclas AC, el aumento de rigidez de las mezclas al bajar la temperatura, este cambio se aprecia sobre todo al bajar de 20 a 5°C la temperatura. También se aprecia un comportamiento ligeramente más dúctil en el caso de la mezcla fabricada con la emulsión modificada A3.

Para observar mejor estas diferencias cualitativas de comportamiento se han representado (figuras 15, 16, 17, 18, 19 y 20) la variación del índice de rigidez a tracción, la resistencia a fisuración, la energía de fractura y el índice de tenacidad con la temperatura. En estas figuras se ha incluido también los resultados de dos mezclas de granulometría discontinua fabricadas en caliente, una tipo BBTM y otra tipo SMA, ambas con un betún modificado tipo PMB 45/80-65.

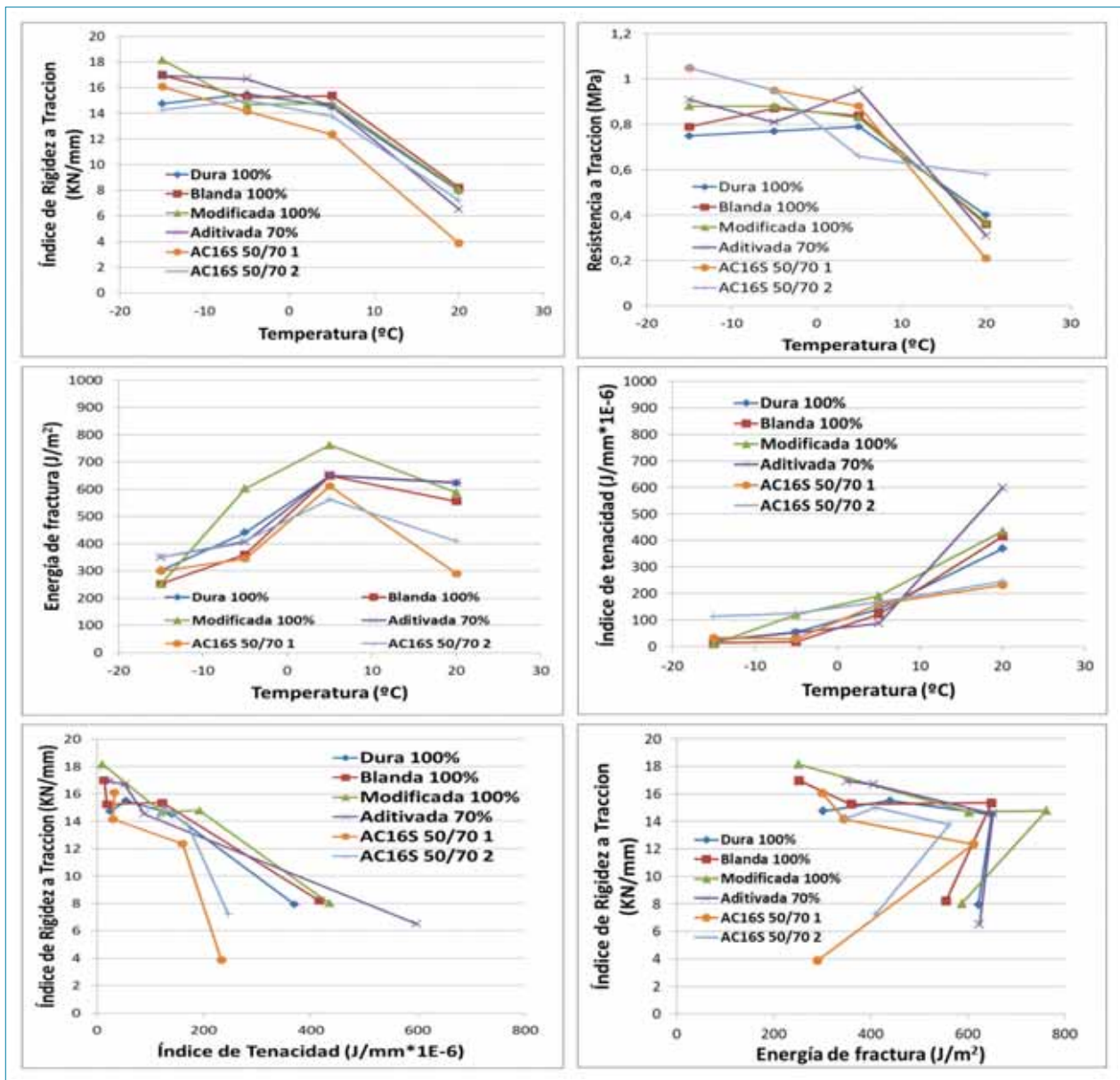
Las mezclas recicladas templadas mostraron una respuesta intermedia entre las dos mezclas en caliente tomadas como

referencia. Se apreciaron también diferencias entre las mezclas recicladas templadas, la fabricada con la emulsión modificada A3 (más blanda) resulta más tenaz y dúctil. Para la misma temperatura de ensayo el índice de rigidez de la mezcla con la emulsión modificada A3 es similar a la fabricada con la emulsión modificada A1 (más dura), pero su energía de fractura e índice de tenacidad es mayor (ver figuras 21 y 22).

En cuanto al ensayo EBADE, consiste en un ensayo cíclico de tracción-compresión a deformación controlada a una frecuencia de 10 Hz, durante el ensayo se va aumentando el nivel de deformaciones impuesto con lo que se consigue caracterizar el comportamiento de los materiales bituminosos bajo cargas cíclicas de diferentes amplitudes de deformación. Cada nivel de deformación es mantenido durante 5.000 ciclos.

Los parámetros obtenidos del ensayo EBADE de las mezclas AC fueron los que aparecen en la Tabla 9.

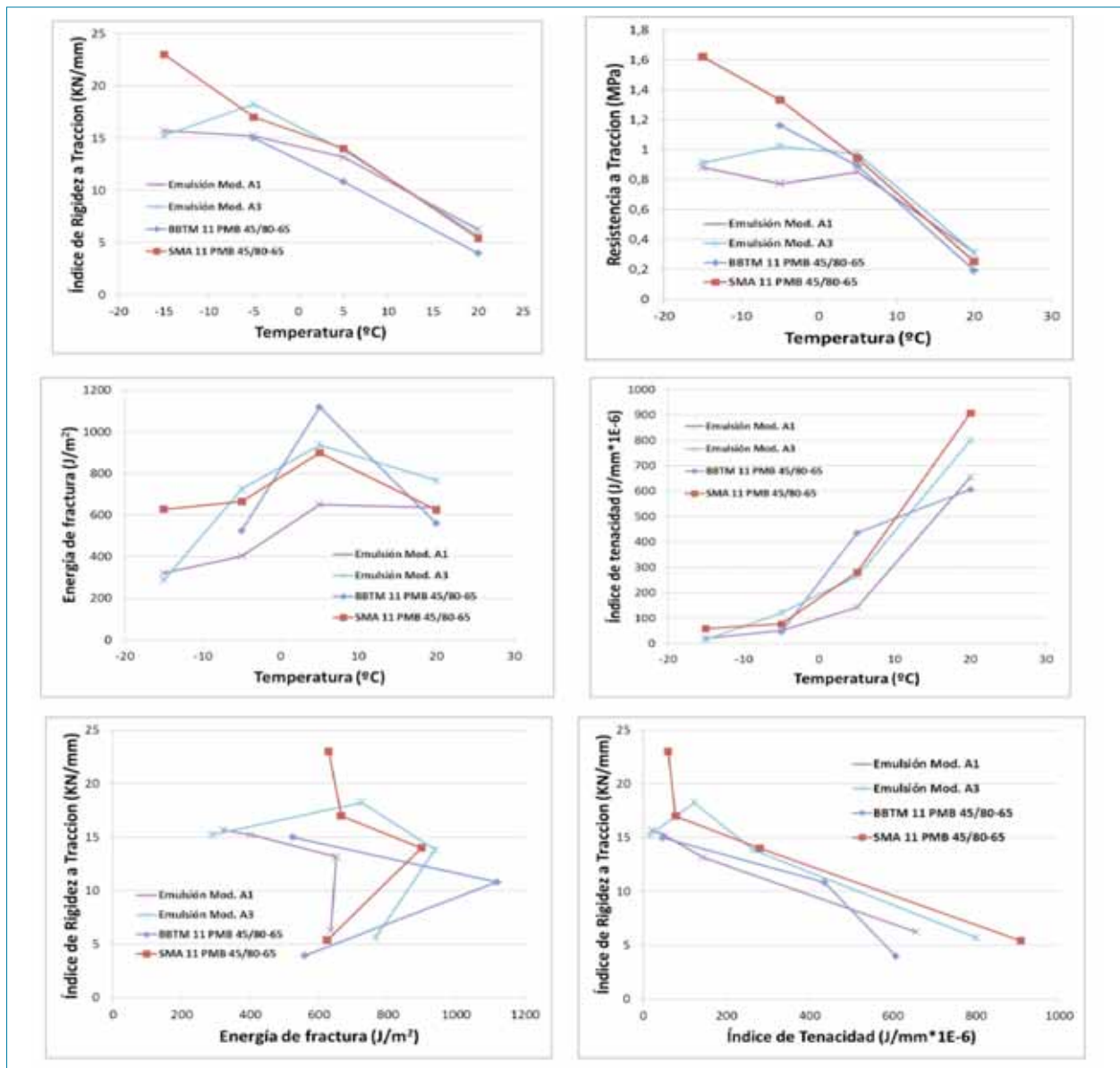
A continuación se representan los diferentes parámetros obtenidos en el ensayo EBADE, módulo inicial y deformación de fallo o rotura frente a la temperatura de ensayo (figuras 21, 22 y 23). Los módulos de las mezclas ensayadas tienen una variación similar con la temperatura y únicamente se apre-



Figuras 9, 10, 11, 12, 13 y 14.

Tabla 8. Resultados Ensayo FÉNIX, mezclas discontinuas recicladas.

Emulsión	Temperatura (°C)	IRT (KN/mm)	GF(J/m²)	IT (J/mm³*1E-6)
Emulsión A1	20	6	635	655
	5	13	651	143
	-5	15	402	51
	-15	16	321	20
Emulsión A3	20	6	766	800
	5	14	938	265
	-5	18	724	122
	-15	15	288	16



Figuras 15, 16, 17, 18, 19 y 20.

cia una mayor deformación de rotura a 5 y 20°C de las mezclas fabricadas con el 70% de RAP y con emulsión modificada.

Se ha incluido en estas figuras la respuesta de una mezcla AC16S fabricada en caliente con un 5.0% de betún 50/70 sobre la masa de la mezcla. Se aprecia que la mezcla reciclada templada presenta una mayor ductilidad a 20°C y un menor módulo a bajas temperaturas. Esto puede observarse más claramente en la figura 16, donde se ha representado la relación módulo-deformación de fallo.

Y finalmente se exponen los parámetros obtenidos del ensayo EBADE de la mezcla BBTM RT100 (Tabla 10).

Los resultados de los ensayos EBADE han mostrado una gran similitud de comportamiento de ambas mezclas a 20°C, mientras que a +5°C y -5°C se ha observado como la emulsión modificada A1 ha experimentado una mayor rigidización, aumentando su módulo y disminuyendo su deformación de fallo en una mayor cantidad que la emulsión modificada A3 más blanda (figuras 24, 25 y 26). Las conclusiones obtenidas a resaltar de los ensayos de fisuración y durabilidad son las siguientes:

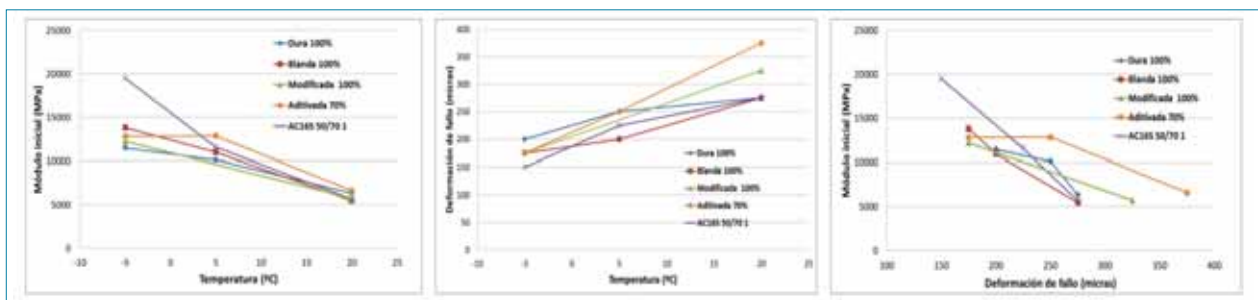
- Ambos ensayos han puesto de manifiesto que la respuesta de las mezclas templadas es similar al de las mezclas

Tabla 9. Resultados Ensayo EBADE, mezclas AC RT.

Mezcla	Temperatura (°C)	Módulo Inicial (MPa)	Deformación de fallo (1E-6)
AC RT100 DURA	20	6347	275
	5	10128	250
	-5	11471	200
AC RT100 BLANDA	20	5483	275
	5	10991	200
	-5	13801	175
AC RT100 MODIFICADA	20	5741	325
	5	--	--
	-5	12203	175
AC RT70 ADITIVADA	20	6607	375
	5	12856	250
	-5	12796	175

Tabla 10. Resultados Ensayo EBADE, mezclas discontinuas recicladas.

Mezcla	Temperatura (°C)	Módulo Inicial (MPa)	Deformación de fallo (1E-6)
BBTM 11B RT100 Emulsión Mod. A1	20	5680	350
	5	9488	225
	-5	13025	150
BBTM 11B RT100 Emulsión Mod. A3	20	6253	325
	5	--	--
	-5	10380	250

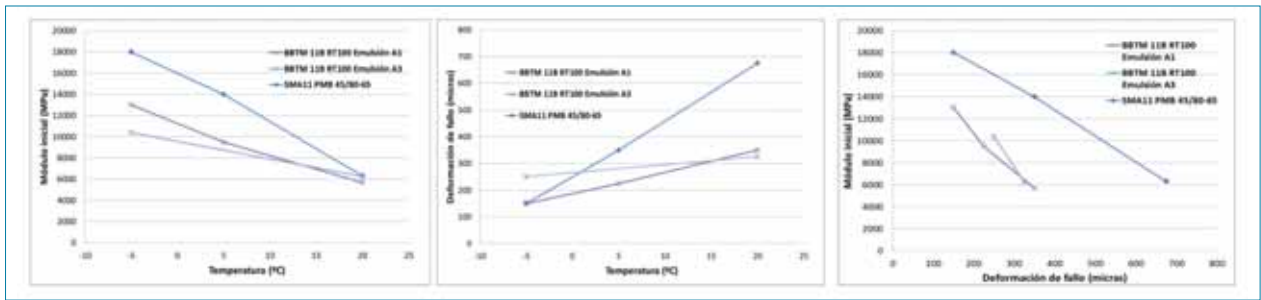


Figuras 24, 25 y 26.

convencionales, presentando una rigidez y resistencia mecánica del mismo orden en el rango de temperaturas analizado, pero mostrando igual o mayor índice de tenacidad y deformación de rotura, lo que indicaría una respuesta más dúctil para similar rigidez.

- Tanto las mezclas templadas como las calientes presentan una fuerte susceptibilidad a la temperatura. Al pasar la

temperatura de -15 a 20°C se produce una fuerte caída del módulo dinámico de la mezcla tipo AC de cerca de 13.000 MPa a poco más de 5.000 MPa, presentando tanto las mezclas templadas como las mezclas fabricadas en caliente similar variación. La ductilidad de estas mezclas también varía con la temperatura, pero en este caso la variación de la ductilidad es mayor en la mezcla tem-



Figuras 27, 28 y 29.

plada, que presenta similar índice de tenacidad a -15 y -5°C (menor de  $100 \text{ J/mm}^2 \cdot 10^{-6}$ ) y puede llegar al doble a 20°C ( $250 \text{ J/mm}^2 \cdot 10^{-6}$  para las AC en caliente y hasta  $600 \text{ J/mm}^2 \cdot 10^{-6}$  para las templadas)

- Las mezclas tipo BBTM templadas también presentan un módulo semejante a las calientes en el rango de temperaturas estudiado y se comportan de forma más dúctil a 20°C, variando su índice de tenacidad 600 y  $800 \text{ J/mm}^2 \cdot 10^{-6}$ .
- También existen diferencias entre los tipos de emulsiones y formulaciones empleadas. Es el caso de las mezclas tipo AC fabricadas con la emulsión modificada presenta una respuesta más dúctil y tenaz. Lo mismo ocurre con la emulsión A1 modificada en el caso de las mezclas tipo BBTM.

### 3. Conclusiones finales

Las principales conclusiones extraídas de este trabajo son las siguientes:

- Es fundamental la clasificación del material a reciclar en mínimo dos fracciones para poder controlar mejor la homogeneidad del material y su composición en las nuevas mezclas recicladas templadas.
- Se han logrado diseñar emulsiones modificadas para mezclas templadas discontinuas tipo BBTM11B con altas tasas de reciclado con buen comportamiento a nivel de trabajabilidad y compactabilidad. Para mezclas tipo Asphalt Concrete se han reforzado las formulaciones de las emulsiones con ligantes convencionales, además de desarrollar formulaciones de emulsiones modificadas que mejoren las características mecánicas de las mezclas estudiadas con tasa total y alta tasa.

- Se ha logrado diseñar a nivel de laboratorio mezclas recicladas templadas discontinuas BBTM RT100 y mezclas recicladas templadas continuas tipo AC RT100 a RT50, con unas propiedades mecánicas muy correctas y una buena compactabilidad, frente a mezclas convencionales en calientes.
- Los ensayos de durabilidad y fisuración realizados han puesto de manifiesto:
  - a) la respuesta de las mezclas recicladas templadas es similar al de las mezclas convencionales en caliente, presentando una rigidez y resistencia mecánica del mismo orden en el rango de temperaturas analizado, pero mostrando igual o mayor índice de tenacidad y deformación de rotura, lo que indicaría una respuesta más dúctil para similar rigidez.
  - b) Las diferencias entre mezclas templadas han sido muy pequeñas, en algunos casos menores a la dispersión del ensayo.
  - c) En cuanto a las emulsiones, las modificadas son las que han mostrado un comportamiento ligeramente superior al resto.
- Esta investigación ha demostrado la viabilidad de unas mezclas más competitivas y ambientalmente más sostenibles que las mezclas convencionales en caliente como son las mezclas templadas recicladas urbanas a tasa total para capas de rodadura.
- La tecnología de mezclas templadas nos abre la posibilidad de poder reciclar mezclas hasta alta tasa, obteniéndose resultados en cuanto a propiedades mecánicas muy similares a las mezclas en caliente, favoreciendo las disminución de emisiones, de temperaturas de fabricación y compactación y de consumo de materiales, además de mejorar la seguridad en el trabajo.

#### 4. Pruebas de campo

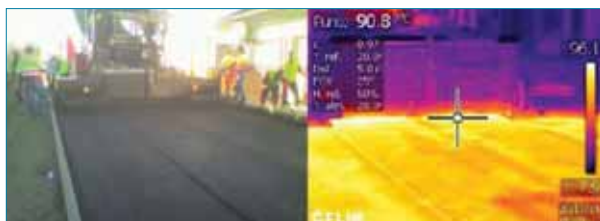
A fecha de redacción de este documento se realizó el tramo de ensayo en una calle urbana, donde se extendieron dos mezclas tipo AC RT100 y RT70, empleando las temperaturas que a continuación se muestran en las fotos termográficas.



Temperaturas de fabricación.



Temperaturas llegada camiones al tramo.



Extendido de las mezclas.



Temperaturas de compactación.

#### 5. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la financiación recibida para la realización de este estudio que forma parte del proyecto de

I+D "Rodaduras Urbanas Sostenibles", referencia IPT-2012-0316-370000, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad dentro de la Convocatoria INNPACTO 2012.

#### 6. Referencias bibliográficas

1. Fabricación y Puesta en Obra de un reciclado Templado con Emulsión bituminosa .- J.A. Soto & A. García Prieto -PROAS
2. RGRA- nº 866.- Recyclagesemi-chaud » en centrale à l'émulsion de bitume J.A.
3. RGRA- nº 866.-Le recyclage à trèsforttaux (> 50 %) des enrobéschauds et des enrobéstièdespour une constructionroutière durable.- F. Olard, C. Le Noan, D. Bonneau, S. Dupriet, Y. Monnier
4. Planta multifunción FAMAT 250-Mezclas asfálticas a baja temperatura- V Jornada Asefma 2010.
5. Rehabilitación sostenible de Pavimentos: Innovaciones en tecnología y desarrollos de mezclas para el aprovechamiento total de materiales con bajo consumo de energía.- VI Congreso Ingeniería Civil- Valencia 2011
6. Reciclado Total templado de Mezclas Bituminosas. Una propuesta de para su diseño, caracterización y producción. J.T. Asefma- Mayo 2011.
7. Reciclados templados de tasa total. Aplicación, experiencias reales y resultados. Asefma 2013 y CILA 2013. J. L. Santiago, F. Guisado, F. J. L. Ochoa.
8. Pérez, F. E.; Miró, R.; Martínez, A.; Botella, R. y Valdés, G. Estado de la resistencia a la fisuración de las mezclas bituminosas. Ensayos Fénix y EBADE. Asfalto y pavimentación, 2011, 1, 39-51.
9. Normas: UNE EN 933-1, 933-3, 933-5, 933-8, 1097-6, 1097-2, 12697-1, 12697-3, 12697-5, 12697-6, 12697-8, 12697-12, 12697-22, 12697-26, 12697-31, 12697-33, 1426 y 1427.
10. Norma ASTM D 2006 Fraccionamiento ligante recuperado.