

# RODADURAS URBANAS SOSTENIBLES

**PATRICIA DÍAZ MARTÍN**  
SACYR CONSTRUCCIÓN

**ANTONIO RAMÍREZ RODRÍGUEZ**  
SACYR CONSTRUCCIÓN

**FRANCISCO GUIADO MATEO**  
CENTRO TECNOLÓGICO DE REPSOL

**EMILIO MORENO MARTÍNEZ**  
CENTRO TECNOLÓGICO DE REPSOL

**RODRIGO MIRÓ RECASENS**  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

**RAMÓN BOTELLA NIETO**  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA



---

# RODADURAS URBANAS SOSTENIBLES

---

## RESUMEN

**E**n 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 aptas para vías urbanas, que contribuyan a la sostenibilidad del patrimonio vial urbano 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.

## 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, que son comunes a otras alternativas o forman parte inseparable de procesos más complejos, 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 tns de árido y 0.05 tns de ligante, se desarrolle una mezcla equivalente fabricada a 90-100°C, sin consumo de áridos, con la mitad de consumo 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, esta innovadora mezcla reciclada templada para capas de rodadura, con empleo total de los áridos y del ligante recuperados del pavimento, es la que tiene mejores perspectivas de solucionar estos problemas, siendo necesario su estudio, caracte-

terización, aplicación y seguimiento para poder definir y normalizar su empleo en una fase posterior.

Se remarca que el destino de estas nuevas mezclas es su aplicación en la renovación del patrimonio viario urbano, contexto en el que unas mezclas con un importante ahorro económico facilitarán que las administraciones locales puedan optimizar mejor los recursos disponibles y atender adecuadamente a su mantenimiento, además de que en ese contexto, la reducción de emisiones, tanto de gases de efecto invernadero en su fabricación como de humos en su puesta en obra, es más necesario.

El objetivo del proyecto es 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 esas 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 realizarán en verano de 2014.

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

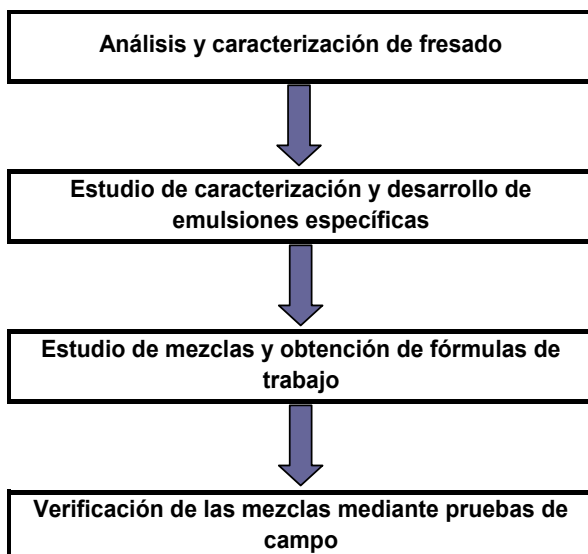


Fig. 1: metodología de trabajo.

## ESTUDIOS DE LABORATORIO

### 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 o tecnología que vamos a emplear en el desarrollo de las mezclas templadas recicladas con emulsión. El material a reciclar de mezclas bituminosas (MRMB) seleccionado procedía de la capa de rodadura de una calle de Madrid. Una vez seleccionado, se procedió a realizar su clasificación en 2 fracciones distintas, una gruesa (5/25 mm) y otra fina (0/5 mm), en una instalación específicamente diseñada para ello propiedad de la em-



Fig. 2: Clasificación del RAP en dos fracciones.

Tabla 1. Análisis Fracciones MRMB.

UNE EN 933-1	Fracción 5/25		Fracción 0/5	
	NEGRO	BLANCO	NEGRO	BLANCO
<b>TAMIZ UNE (mm)</b>	<b>% Pasa</b>			
<b>31,5</b>	100,0	100,0	100,0	100,0
<b>22,4</b>	99.5	100,0	100,0	100,0
<b>16</b>	91.7	96.7	100,0	100,0
<b>8</b>	32.4	58.3	100,0	100,0
<b>4</b>	5.3	25.1	71.8	82.6
<b>2</b>	4.7	20.5	32.9	53.6
<b>0,5</b>	2.9	14.6	11.2	25.1
<b>0,25</b>	1.3	11.6	1.4	20.0
<b>0,063</b>	0.2	6.4	0.3	10.2
<b>% Ligante s/a</b>	3.65±0.5		6.17±0.04	

presa Sacyr Construcción, que permite separar las fracciones superiores a 60 mm, hace pasar las comprendidas entre 25 y 60 mm por un molino disgregador, que los reduce a un 0/25mm y los clasifica 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 y buenas prestaciones mecánicas.

Se realizó un estudio previo 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.
- Contenido en ligante de cada fracción
- Recuperación del ligante envejecido.
- Penetración del ligante recuperado
- Punto de reblandecimiento del ligante recuperado
- Otras caracterizaciones químicas y físicas del ligante y áridos recuperados.

Tabla 2. Análisis físico Fracciones MRMB.

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

Tabla 3. Análisis químico MRRB.

RECUPERACIÓN DEL LIGANTE PARA SU CARACTERIZACIÓN (UNE EN 12697-3)			
Ensayo	Unidad	Norma	Valor
Penetración 25 °C	0,1 mm	UNE EN 1426	14
<u>Pto. De Reblandecimiento, A&amp;B</u>	°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

Se ha realizado una caracterización física de los áridos recuperados y química-física del ligante envejecido recuperado (Tablas 2 y 3).

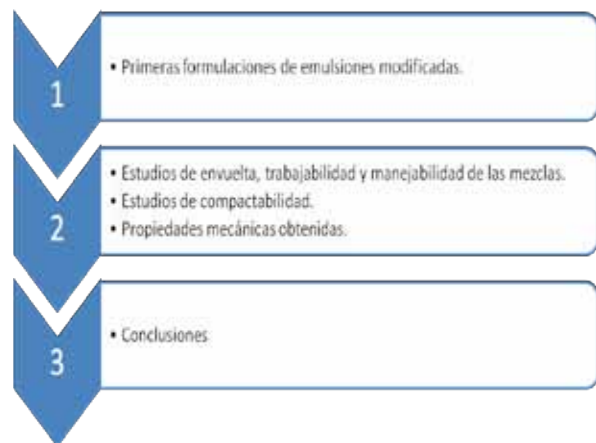
Los áridos vírgenes empleados en los estudios de algunas de las mezclas bituminosas templadas recicladas corresponden a las fracciones 12/18, 6/12 y 0/6 mm de origen silíceo (Madrid), 0/6 y 0/3 mm de origen calizo (Madrid) y 6/12 Milonita de Almonacid (Toledo).

Las conclusiones que se pudieron sacar de esta fase de estudio fueron:

- El ligante procedente del fresado no está excesivamente envejecido.
- La composición de las dos fracciones generadas es adecuada 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 en la fracción gruesa, indicando que vienen de capas de rodadura de calles de Madrid.
- 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.

### 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 siguiente esquema:



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 RAP: 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.

Estos estudios indicados en esta fase nos 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 que nos ha llevado a conclusiones 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.
- 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 se diseñaron con una concentración sobre el 67% de ligante residual final, observándose buenas envueltas y comportamientos. Las emulsiones no modificadas se diseñaron con concentraciones sobre 65% de ligante residual.
- Son emulsiones tipo C65/67B3 o C67BP3, con rotura espontánea de la emulsión a las temperaturas de las mezclas templadas 100 °C, y que el poco agua residual que queda ayude a la manejabilidad/compactibilidad de la mezcla.

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

Una vez desarrolladas las emulsiones específicas se comenzaron los trabajos de diseño de las mezclas recicladas templadas con alta tasa de material a reciclar.

Las mezclas recicladas templadas programadas fueron a alta tasa (50%-80%) y a tasa total (>80%) para capas de rodadura en vías urbanas. Actualmente se han diseñado completamente las mezclas que a continuación se indican, ya que las que llevan sobre un 50% de MRMB se encuentran en estudio:

- Mezclas Templadas Discontinuas tipo BBTM: fabricar una mezcla BBTM 11B a tasa total, 100% de MRMB, a la que hemos denominaremos BBTM 11B RT100.
- Mezclas Templadas Continuas tipo AC: dos mezclas con diferentes tasas de reciclado, 100 Y 70 % de MRMB, correspondientes a granulometrías entre densas y semidensas, tipo asphalt concrete, denominadas AC RT100 y AC RT70.

#### **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

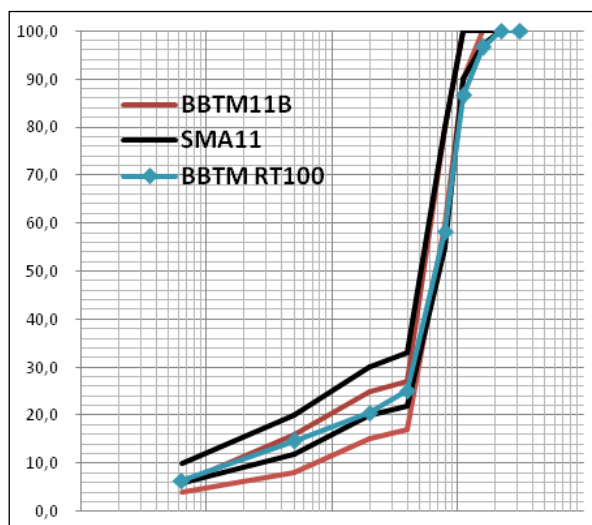


Figura 3. Curva granulométrica en blanco BBTM RT100.

(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 prestacional. 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. 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 estándar se muestran en la tabla 4.

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

mezclas discontinuas 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, ofreciendo propiedades volumétricas sobre 13-14% huecos mezcla.

Obtenemos propiedades mecánicas bastante buenas, destacando fundamentalmente los valores de pendiente de deformación en pista, con valores  $\leq 0,1$  mm/103 ciclos, y resistencias conservadas  $\geq 90\%$ , con un contenido de ligante por encima del mínimo exigido en el pliego de prescripciones PG3 para mezclas discontinuas en caliente. En cuanto a módulos de rigidez son valores algo elevados para el tipo de mezcla que es y valores de cohesión en términos de resistencia atracción muy buenos.

#### AC RT100 Y AC RT70

En cuanto a las mezclas tipo AC (tipo asphalt concrete), se presentan los resultados de dos mezclas con diferentes tasas de reciclado 100 y 70 %, denominadas AC RT100 y AC RT70. La composición de los materiales de las dos mezclas fue:

Tabla 5. Composición mezclas AC RT.

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

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 100% A 1	5.45	2.60	2.098	13.7	3696	1.48	1.67	88.6	0.089
BBTM 100% A 2	5.45	2.55	2.100	13.6	3342	1.45	1.61	90.1	0.091
BBTM 100% A 3	5.45	2.55	2.101	13.5	2757	1.36	1.49	91.3	0.100



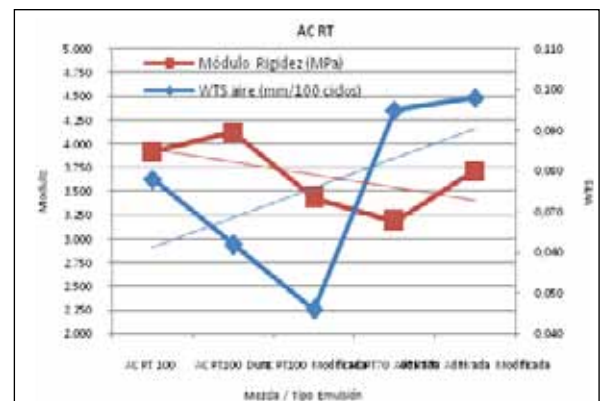
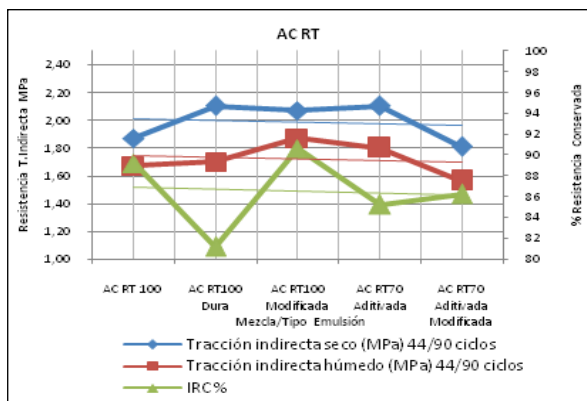
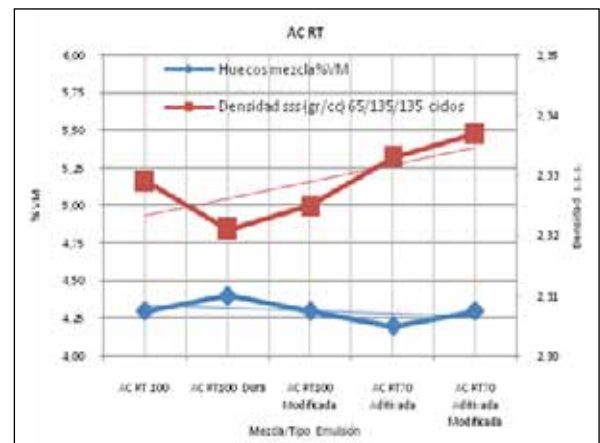
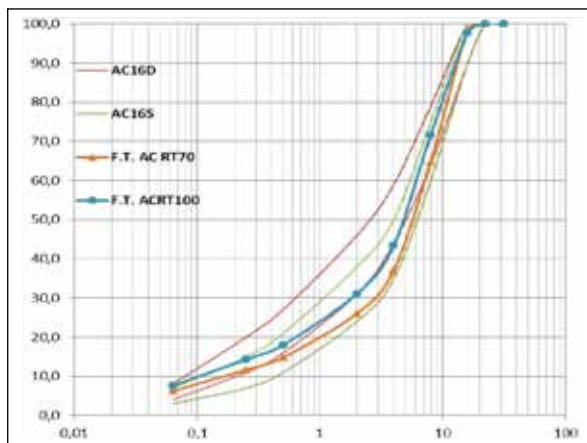
Tabla 6. Resultados volumétricos y mecánicos mezclas AC RT.

Resultados/ Mezclas	AC RT 100 Blanda	AC RT100 Dura	AC RT100 Modificada	AC RT70 Aditivada	AC RT70 Aditivada Modificada
Tracción indirecta seco (MPa)	1,87	2,10	2,07	2,10	1,81
Tracción indirecta húmedo (Mpa)	1,67	1,70	1,87	1,80	1,56
IRC %	89,2	81,2	90,6	85,2	86,2
WTS aire (mm/100 ciclos)	0,078	0,062	0,046	0,095	0,100
Módulo Rigidez (Mpa)	3918	4120	3432	3186	3716
% Ligante final s/a	6,0	6,2	6,3	6,0	6,0
Huecos mezcla %VM	4,3	4,4	4,3	4,2	4,3
Densidad s.s.s (gr/cm <sup>3</sup> )	2,33	2,32	2,33	2,33	2,34

Se han empleado tres emulsiones diferentes para las mezclas recicladas a tasa total, blanda, dura y modificada, y dos emulsiones para las mezclas de alta tasa, correspondiente a una convencional aditivada y otra modificada.

A continuación se exponen gráficamente los resultados obtenidos:

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, teniendo en cuenta como reflexión que a las tem-



Figuras 4, 5, 6 y 7. Curvas granulométricas y resultados mecánicos de las mezclas AC.

peraturas de mezclado y compactación empleadas no existe una alta difusión inicial de ligante nuevo sobre viejo. Los porcentajes de emulsión nueva a aportar van del 2,5 al 2.75% s/a, en función de la concentración de las emulsiones. Destacar la buena compactibilidad que muestran estas mezclas, con energías de compactación relativamente bajas (menores que MBC) 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 empleamos emulsiones duras o modificadas, además de tener en cuenta que las proporciones que se generan de las dos fracciones del todo uno RAP permiten obtener una curva granulométrica que en teoría favorece este ensayo, indicando también la necesidad de poder jugar con estas proporciones en futuros fresados si es necesario favorecer esta característica.

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 estándar 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 completar este razonamiento 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 puede tener un peso más representativo en la nueva mezcla.

Las mezclas con tasas del 70% se asemejan bastante a las de tasa total, los áridos de nuevo aporte no han resaltado ninguna característica de las ensayadas, observándose la necesidad de aumentar la energía de compactación, 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.

**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.

**Ensayo Fénix**

Una de las principales ventajas del ensayo Fénix 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.

– Mezclas tipo AC:

A continuación se exponen los parámetros obtenidos del ensayo Fénix de las mezclas AC:

Tabla 7. Resultados Ensayo Fénix, mezclas AC RT.

Emulsión	Temperatura (°C)	IRT (KN/mm)	G <sub>v</sub> (J/m <sup>3</sup> )	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

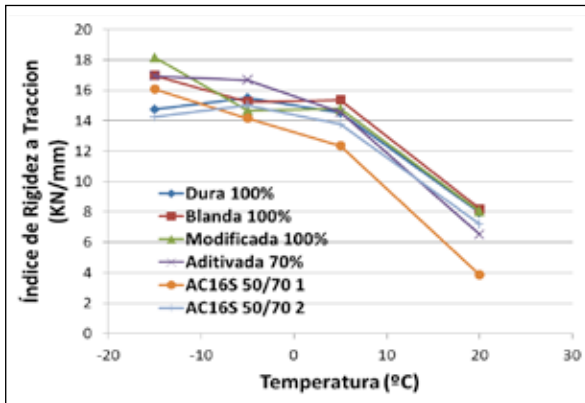


Figura 8.

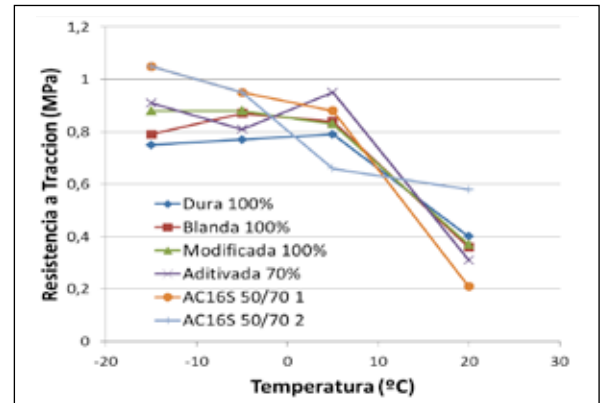


Figura 9.

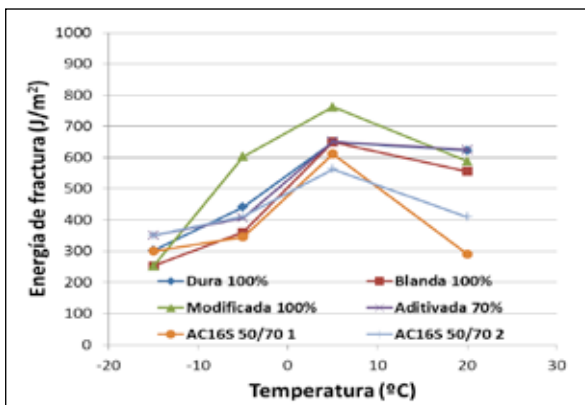


Figura 10.

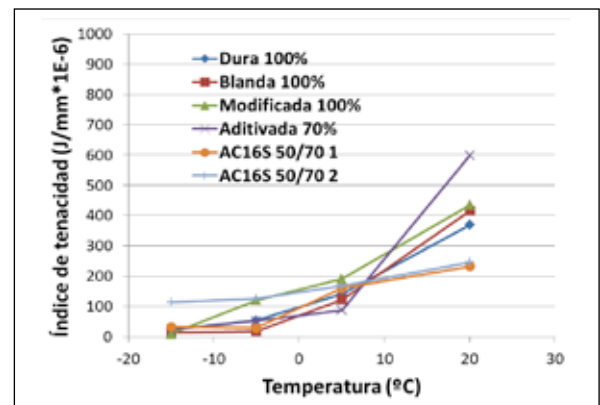


Figura 11.

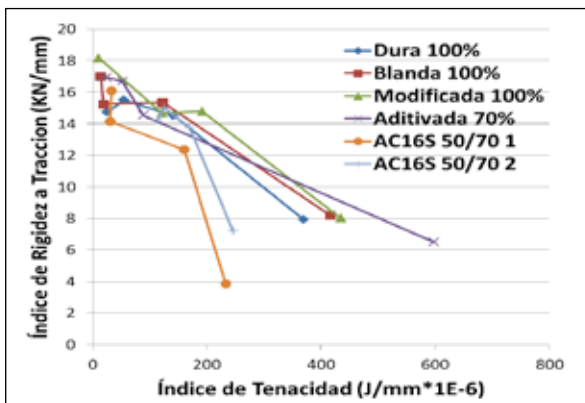


Figura 12.

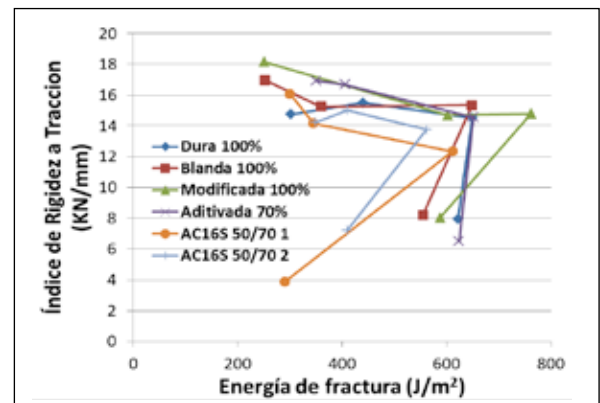


Figura 13.

Estas diferencias entre mezclas, así como el efecto de la temperatura, puede ser apreciado también en las siguientes figuras (figura 8, 9, 10 y 11), 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 12 y 13). 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.

– Mezcla tipo Discontinua:

Los parámetros obtenidos de esta mezcla del ensayo Fénix han sido:

Tabla 9. Resultados Ensayo FÉNIX, mezclas discontinuas recicladas.

Emulsión	Temperatura (°C)	IRT (KN/mm)	Gr(J/m <sup>2</sup> )	IT (J/mm*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

Se han obtenido al igual que para las mezclas AC, las curvas de rotura para las dos mezclas 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 ha representado (figuras 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.

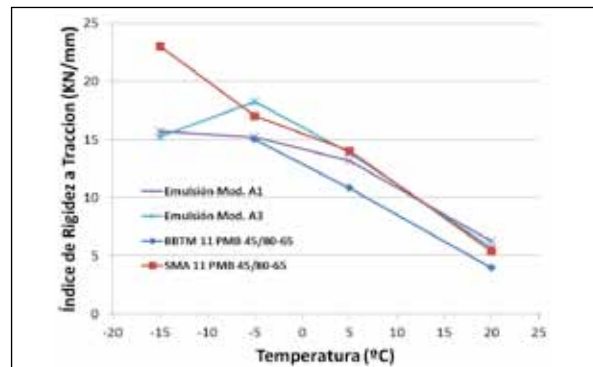


Figura 17.

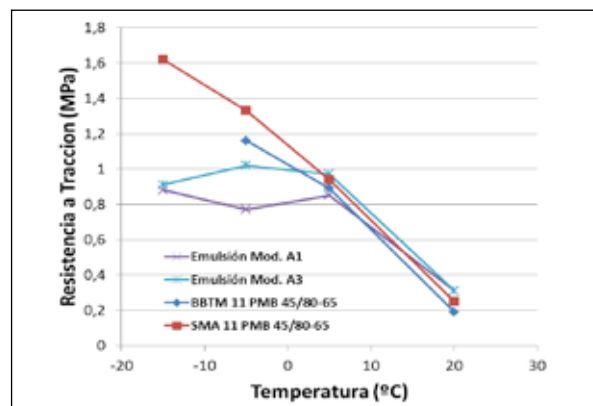


Figura 18.

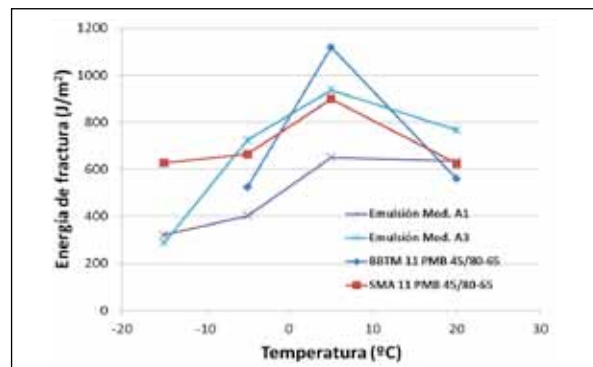


Figura 19.

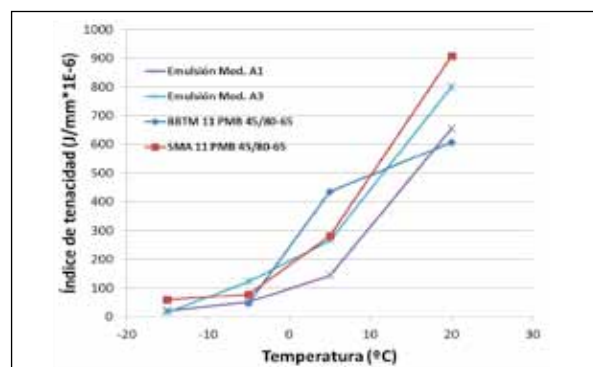


Figura 20.

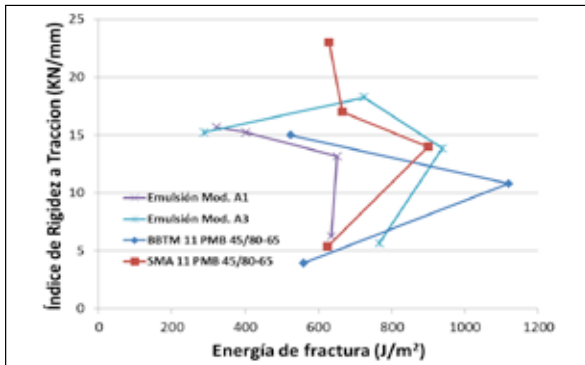


Figura 21.

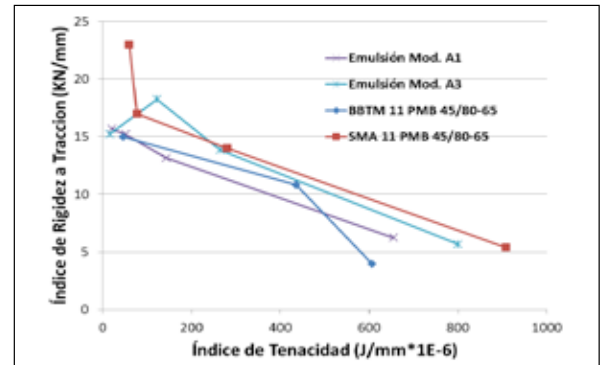


Figura 22.

Las mezclas recicladas templadas muestran una respuesta intermedia entre las dos mezclas en caliente tomadas como referencia. Se aprecian 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).

**Ensayo EBADE**

El 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. A continuación se exponen los parámetros obtenidos del ensayo EBADE de las mezclas AC:

Tabla 8. 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

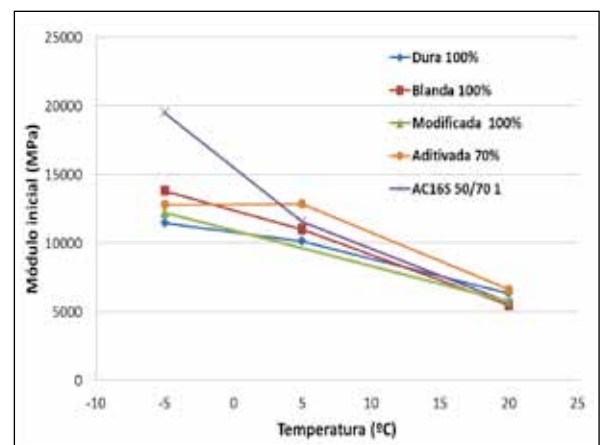


Figura 14.

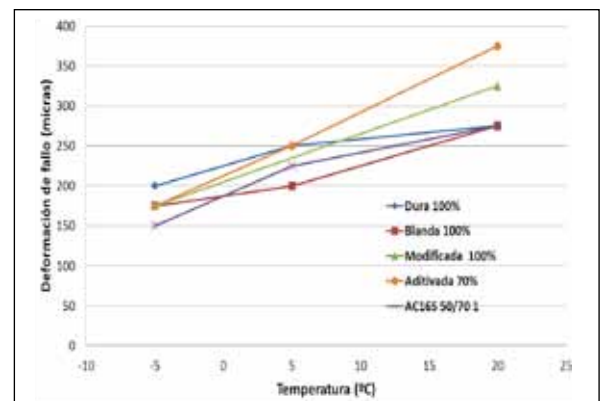


Figura 15.

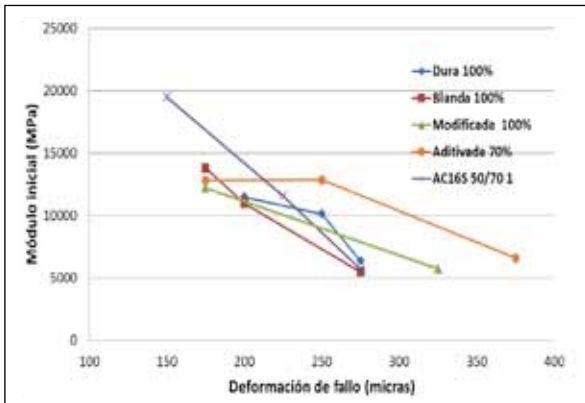


Figura 16.

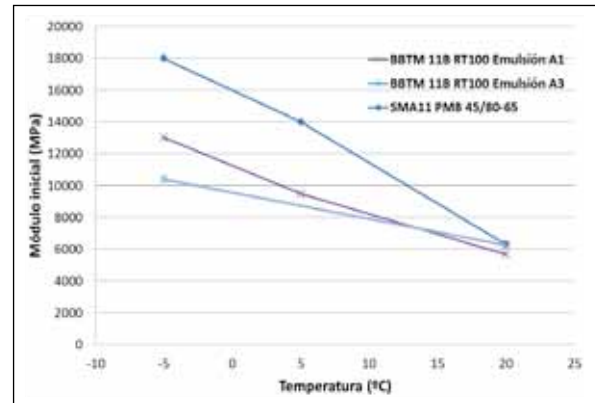


Figura 23.

Se ha incluido en estas figuras la respuesta de una mezcla AC165 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.

A continuación se exponen los parámetros obtenidos del ensayo EBADE de la mezcla BBTM:

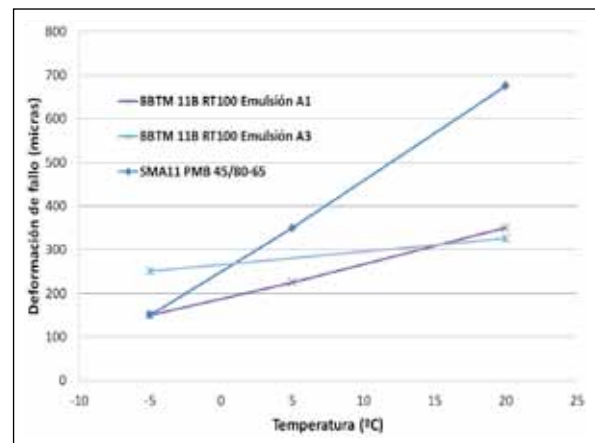


Figura 24.

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

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 (ver figuras 23, 24 y 25).

Las conclusiones obtenidas a resaltar de los ensayos de fisuración y durabilidad son las siguientes:

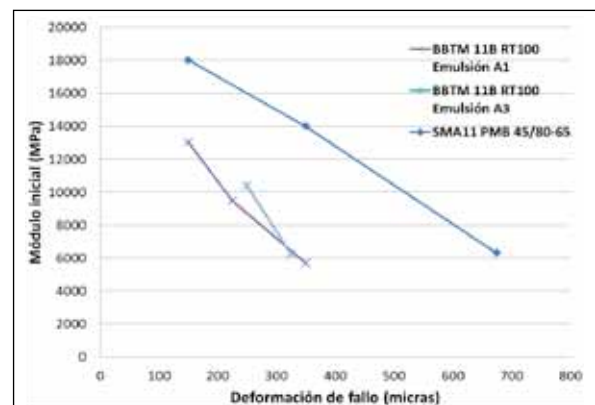


Figura 25.

- Ambos ensayos han puesto de manifiesto que la respuesta de las mezclas templadas es similar al de las mezclas 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  $20^{\circ}\text{C}$  se produce una fuerte caída del módulo dinámico de la mezcla tipo AC de cerca de  $13.000\text{ MPa}$  a poco más de  $5.000\text{ MPa}$ , 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 templada, que presenta similar índice de tenacidad a  $-15$  y  $-5^{\circ}\text{C}$  (menor de  $100\text{ J/mm}^2$ ) y puede llegar al doble a  $20^{\circ}\text{C}$  ( $250\text{ J/mm}^2$  para las AC en caliente y hasta  $600\text{ J/mm}^2$  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  $20^{\circ}\text{C}$ , variando su índice de tenacidad  $600$  y  $800\text{ J/mm}^2$ .

También existen diferencias entre los tipos de emulsiones y formulaciones empleadas. Es el caso de las mezclas tipo AC fabricadas con la emulsión modificada, que presenta una respuesta más dúctil y tenaz. Lo mismo ocurre con la emulsión A1 modificada en el caso de las mezclas tipo BBTM.

## 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 reforzamos las formulaciones que ya disponíamos de emulsiones con ligantes convencionales,

además de desarrollar formulaciones de emulsiones modificadas que mejoran 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 Y AC RT70, 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) Si se ha de escogerse una emulsión, 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 la disminución de emisiones, de temperaturas de fabricación y compactación y de consumo de materiales, además de mejorar la seguridad en el trabajo.

## 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.

## 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 Félix y EBADE. Asfalto y pavimentación, 2011, 1, 39-51.