

# Nuevos ligantes BT para mezclas MASAI

**Vicente Pérez; María González;**

vicente.perez@cepsa.com

**María González,**

maria.gonzalezg@cepsa.com

**Marimar Colás,**

marimar.colas@cepsa.com

**María del Carmen Rubio,**

mcrubio@ugr.es

**Fernando Moreno,**

fmoreno@ugr.es

Las Mezclas Asfálticas Sostenibles, Automatizadas e Inteligentes (MASAI) se caracterizan por tener altas prestaciones mecánicas y por haber sido producidas a una temperatura máxima de 140 °C. Adicionalmente, pretenden el empleo de materiales procedentes del fresado de pavimentos envejecidos en, al menos, un 20% de su peso, así como el de polímeros reciclados/reutilizados, como el polvo de caucho procedente de neumáticos al final de su vida útil.

Reducir la temperatura de fabricación de las mezclas asfálticas por debajo de los 140°C puede lograrse mediante el empleo de una nueva gama de ligantes especiales (ligantes BT). Estos ligantes pueden ser convencionales o modificados con polímeros, pero también, modificados con caucho procedente de neumáticos al final de su vida útil (NFVU).

El empleo de los betunes modificados con caucho por vía húmeda es ya habitual en la fabricación de mezclas asfálticas en caliente para capas de rodadura, intermedias y bases, siempre que se cumplan ciertos requisitos técnicos para estos ligantes. En la normativa española, se exige el cumplimiento de las especificaciones recogidas en la OC 21/2007 para los betunes mejorados con caucho mientras que, a los modificados con caucho, se les exige cumplir las mismas especificaciones que aplican a los betunes modificados con polímeros, recogidas en la norma europea EN 14023.

A pesar de que estos ligantes contribuyen al reciclado del caucho, y esto supone ya una ventaja medioambiental desde el punto de vista de gestión de residuos, las temperaturas de trabajo adecuadas para los betunes caucho son típicamente superiores a las empleadas con los betunes convencionales y modificados con polímeros y por ello, a igualdad del resto de condiciones (áridos, distancia de la planta a la obra, etc), las emisiones de CO<sub>2</sub> para las mezclas fabricadas con betunes caucho son ligeramente superiores. Esta situación se trata de corregir con el desarrollo de los betunes caucho BT que permitirán fabricar mezclas asfálticas más sostenibles.

En este artículo se presentan las características de diferentes tipos de ligantes Baja Temperatura (incluidos los betunes caucho), que podrán ser empleados en la fabricación de mezclas MASAI. Asimismo, se evalúa el comportamiento mecánico de las mezclas bituminosas fabricadas a menor temperatura de la habitual con estos ligantes BT, comparándolas con mezclas en caliente, para seleccionar las formulaciones más adecuadas de estos nuevos ligantes BT y sus condiciones de empleo.

**Palabras Clave:** Mezclas MASAI, mezclas asfálticas semicalientes, ligantes BT, betunes caucho, reciclado, sostenibilidad.

The Sustainable, Automated and Intelligent Asphalt Mixtures (MASAI) are characterized by having high mechanical performance and for having been produced at a maximum temperature of 140 °C. Additionally, they intend to use materials from the milling of aged pavements in at least 20% of weight, as well as recycled/reused polymers, such as crumb rubber from end-of-life tires.

Reducing the manufacturing temperature of asphalt mixtures below 140°C can be achieved by using a new range of special bitumen (Low Temperature binders). These binders can be conventional or polymer modified, but also crumb rubber modified with rubber from tires (ELTs).

The use of crumb rubber-modified bitumen, by the wet method, is already common in the manufacture of hot asphalt mixtures for wearing, binder and base courses, provided that certain technical requirements for these binders are met. In Spanish regulations, compliance with the specifications in OC 21/2007 is required for rubber-improved bitumen, while crumb rubber-modified bitumen are required to meet the same specifications that apply to polymer-modified bitumen, collected in the European standard EN 14023.

Despite the fact that these binders contribute to the recycling of rubber, and this already represents an environmental advantage from the point of view of waste management, the appropriate working temperatures for crumb rubber bitumen are typically higher than those used with conventional and polymer modified bitumen and therefore, if all other conditions were equal (aggregates, distance from the plant to the work, etc.), the CO<sub>2</sub> emissions for asphalt mixtures produced with crumb rubber bitumen are slightly higher. This situation has been corrected with the development of LT crumb rubber bitumen, that will allow more sustainable asphalt mixtures.

In this paper, the characteristics of different types of Low Temperature binders (including crumb rubber bitumen), which can be used in the manufacture of MASAI mixtures, are presented. Likewise, the mechanical behavior of the bituminous mixes manufactured with these LT binders at lower temperatures than usual is evaluated, comparing them with hot mixes, in order to select the most suitable formulations of these new LT binders and their conditions of use.

**Keywords:** MASAI mixes, warm mix asphalt, LT binders, Crumb rubber bitumen, recycling and sustainability.

### 1. INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad es sin duda una de las componentes clave que deberán tener las mezclas asfálticas en los próximos años. Muestra de ello es el desarrollo de las denominadas mezclas MASAI (Materiales Asfálticos, Sostenibles, Automatizados e Inteligentes), puestas en marcha recientemente en la construcción y rehabilitación de carreteras de Andalucía. En ellas se prima, entre otras cosas, la obtención de pavimentos de altas prestaciones, con temperaturas de fabricación reducida y que contemplen principios de economía circular. Entre estos principios destacan la reutilización de materiales asfálticos procedentes de pavimentos envejecidos y el reciclado de polímeros o subproductos de otras industrias.

Hasta la fecha se han fabricado ya más de 18.500 toneladas de mezclas MASAI y se está realizando un seguimiento del comportamiento mecánico de éstas. No obstante, se sigue trabajando en el desarrollo y optimización de los ligantes asfálticos que mejor permitirán el diseño de estas mezclas para que cumplan con los requisitos mecánicos y funcionales.

Este artículo detalla el trabajo realizado por CEPSA, en colaboración con el Laboratorio de Ingeniería de la Construcción de la Universidad de Granada (LabIC-

UGR), en el desarrollo de ligantes asfálticos capaces de cumplir estas expectativas, lo que se ha evaluado no sólo con los ensayos convencionales sino también con nuevos ensayos reológicos más adaptados para la evaluación de sus prestaciones en las mezclas MASAI.

En base a las consideraciones anteriormente planteadas, el objetivo principal del estudio presentado fue desarrollar ligantes modificados con caucho para mezclas de altas prestaciones mecánicas y funcionales, capaces de garantizar una temperatura de fabricación de mezcla inferior a 140 °C y un contenido de polímero reciclado (polvo de caucho en este caso) superior al 0.5% sobre el peso de mezcla. Este último requisito se satisface en el caso de emplear betunes modificados con caucho.

### 2. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

#### 2.1. Materiales

Desde el departamento técnico de asfaltos de CEPSA se ha trabajado en diferentes formulaciones de betunes tipo BC 50/70 (para mezclas continuas) y PMB 45/80-60 C (para mezclas discontinuas), que fueron modificados con distintos porcentajes de polvo de neumático al final de su vida útil (en adelante PNFVU), así como

con distintas tipologías y dosificaciones de aditivos, capaces de permitir una buena trabajabilidad de mezcla y envuelta entre los áridos y el betún a menores temperaturas.

En base a los resultados obtenidos en las diferentes pruebas de diseño de los ligantes a nivel de laboratorio y de planta piloto, y a un estudio exhaustivo de viscosidad y reología con respecto a la temperatura, se seleccionaron 2 formulaciones para cada tipología de betún:

1. Betunes mejorados con caucho: BC 50/70 I y BC 50/70 II
2. Betunes modificados con caucho: PMB 45/80-60 C I y PMB 45/80-60 C II

Estos betunes caucho han sido obtenidos por el proceso de vía húmeda en central empleando betunes seleccionados, PNFVU y aditivos para su empleo en la fabricación de mezclas a temperaturas inferiores a 140°C. Esto se ha conseguido gracias al empleo de diferentes aditivos que se enmarcan en el grupo de los tensioactivos, para los ligantes del tipo I y de las ceras, para los del tipo II. Sus características se recogen en la Tabla 1 adjunta.

Estos 4 betunes se utilizaron en la fabricación de

mezclas bituminosas tipo AC 22 y BBTM 11B a diferentes temperaturas (130, 150 y 165 °C para los BC, y 130, 150 y 170 °C para los PMB-C), partiendo de las mismas fórmulas de trabajo diseñadas para las mezclas bituminosas homólogas fabricadas en caliente, con los betunes tradicionales de estas mezclas que son el B50/70 para las AC22 y el PMB 45/80-60 para las BBTM 11B (Tabla 2).

Las Figuras 1 y 2 recogen los esqueletos minerales utilizados en cada una de las tipologías de mezclas AC22 y BBTM 11B, empleadas durante el estudio de diseño de los ligantes. Notar que, a la hora de diseñar las mezclas BBTM 11B, se decidió optar por curvas granulométricas en la zona inferior del huso con el objetivo de obtener una mezcla más abierta (dentro de los límites establecidos en el PG-3 para las BBTM 11B) de manera que sus características fueran lo más adversas posibles para fabricarlas a bajas temperaturas (las mezclas discontinuas de capa delgada con elevado contenido de huecos son mezclas que se enfrían con mayor rapidez, son menos trabajables y son más vulnerables a las acciones del agua en caso de envueltas deficientes del ligante). De esta manera, se pretende demostrar que, si se consigue fabricar mezclas MASAI bajo estas condiciones, puede llevarse a

Característica	Norma ensayo	B 50/70	BC 50/70 I	BC 50/70 II	PMB 45/80-60	PMB 45/80-60 C I	PMB 45/80-60 C II
Penetración (dmm)	EN 1426	56	62	57	63	45	45
Punto de reblandecimiento (°C)	EN 1427	50	55,7	62,4	63,5	66	79,3
Recuperación elástica (%)		--	40	50	85	63	60
Viscosidad Brookfield:	EN 13302						
$\eta$ @135°C (mPa)		700	905	485	1230	4092	2265
$\eta$ @150°C (mPa)		240	520	270	600	1800	590
$\eta$ @175°C (mPa)		80	180	102	240	450	212
Estabilidad a almacenamiento:	EN 13399						
$\Delta$ penetración (dmm)		--	8	12	0	4	20
$\Delta$ punto rebland (°C)		--	4	6	0	5	12

**Tabla 1. Características de los ligantes empleados en la fabricación de las mezclas estudiadas**

## Nuevos Ligantes BT para Mezclas MASAI

	AC 22 REF	AC 22 BC-I	AC 22 BC-II	BBTM 11B REF	BBTM 11B PMBC-I	BBTM 11B PMBC-II
Contenido de ligante (% sobre peso de mezcla)	4.5	4.5	4.5	5.0	5.0	5.0
Tipología de ligante utilizado	B 50/70	BC 50/70 I	BC 50/70 II	PMB 45/80-60	PMB 45/80-60 C I	PMB 45/80-60 C II
Árido grueso	6/12 mm calizo; 12/18 mm calizo; 18/24 mm calizo	6/12 mm calizo; 12/18 mm calizo; 18/24 mm calizo	6/12 mm calizo; 12/18 mm calizo; 18/24 mm calizo	6/12 mm ofítico	6/12 mm ofítico	6/12 mm ofítico
Árido fino	0/6 mm calizo	0/6 mm calizo	0/6 mm calizo	0/4 mm calizo	0/4 mm calizo	0/4 mm calizo
Filler	Recuperación	Recuperación	Recuperación	Carbonato Cálculo	Carbonato Cálculo	@Carbonato Cálculo

Tabla 2. Materiales empleados en la fabricación de las mezclas estudiadas

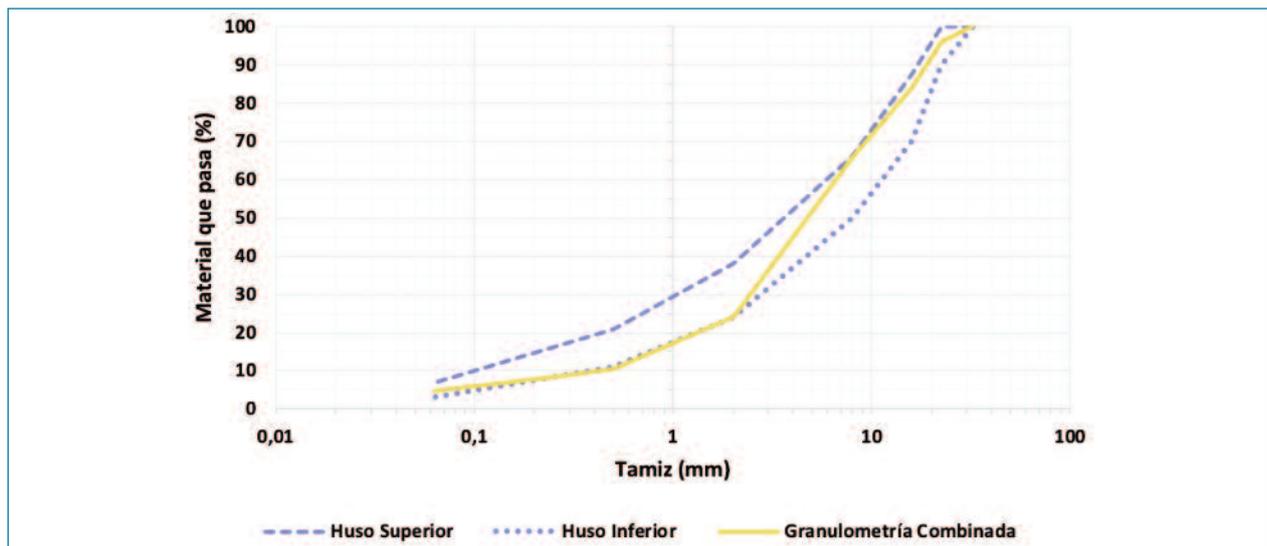


Figura.1 Curva granulométrica de las mezclas AC22 objeto de estudio

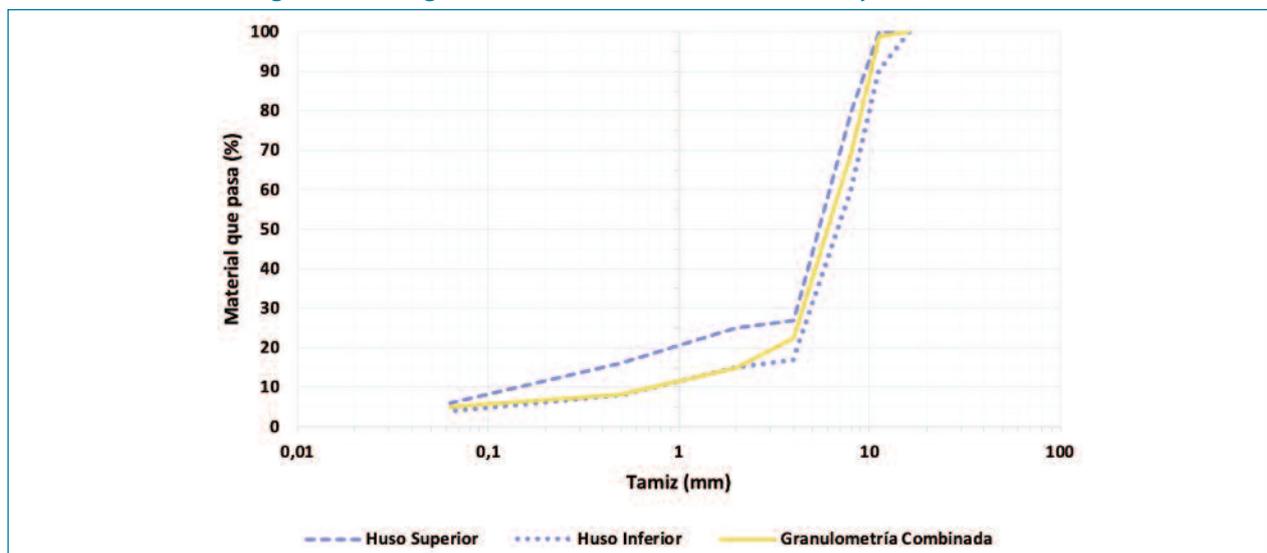


Figura.2 Curva granulométrica de las mezclas BBTM 11B objeto de estudio

cabo bajo cualquier otro conjunto de condiciones más favorables.

## 2.2. Plan de ensayos

La selección de las formulaciones óptimas de los ligantes BT con PNFVU para su empleo en el diseño de mezclas MASAI, fueron establecidas en base a un estudio avanzado de reología que contempló desde barridos de frecuencia a diferentes temperaturas, hasta estudio de la respuesta elástica y de la integración de las diferentes fases en base al ensayo MSCR (Multiple -Stress Creep and Recovery) a diferentes temperaturas.

En base a estas consideraciones, mediante el empleo del reómetro dinámico de corte (DSR) se realizaron ensayos de barridos de frecuencia (entre 0 y 20 Hz) y para un amplio rango de temperaturas (desde 10 a 80°C) realizados a una amplitud de deformación constante de 0.1%. A partir de los resultados de estos barridos, y para analizar la evolución de las propiedades del ligante con la temperatura, se representaron las isocronas para una frecuencia fija de 5 Hz. Por otra parte, para evaluar la simplicidad termo-reológica del material, los datos de ángulo de fase y módulo complejo ( $G^*$ ) se representaron a través de diagramas de Black (Figura 3).

Además, también se utilizó el ensayo Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) (UNE EN 16659) [1] con el objetivo de cuantificar el comportamiento no lineal de

los ligantes bituminosos como medio para predecir su respuesta frente a las deformaciones plásticas y su recuperación elástica. Para la realización del ensayo se fijaron dos temperaturas de 45 y 70°C y en cada una de ellas se suceden ciclos compuestos de carga y recuperación aplicados al ligante. De esta forma cada ciclo se compone de un segundo de carga a cortante (alcanzando un pico de deformación) y nueve segundos de recuperación (Figura 4). Se fijaron un total de 60 ciclos de carga-recuperación (30 para cada nivel de carga) de acuerdo con las recomendaciones de otros autores en relación a la aplicación del ensayo en betunes modificados. Dentro de estas, los treinta primeros ciclos son realizados a una carga cortante de 0.1 kPa (para evaluar el material dentro del rango viscoelástico lineal) e inmediatamente después se realizan otros treinta ciclos en este caso a una carga de 3.2 kPa (para la evaluación del comportamiento mecánico fuera del rango lineal).

Como parámetros de análisis, se calcula en primer lugar, el porcentaje promedio de recuperación elástica del ligante que es la diferencia entre la recuperación elástica al final de un periodo de recuperación y la deformación pico tras la carga constante y que proporciona información acerca del modo en el que el polímero está trabajando en el ligante. Por otra parte, el parámetro  $J_{nr}$  (non recoverable creep compliance) es una medida de la deformación permanente del material tras los sucesivos ciclos de carga y recuperación y aporta importante

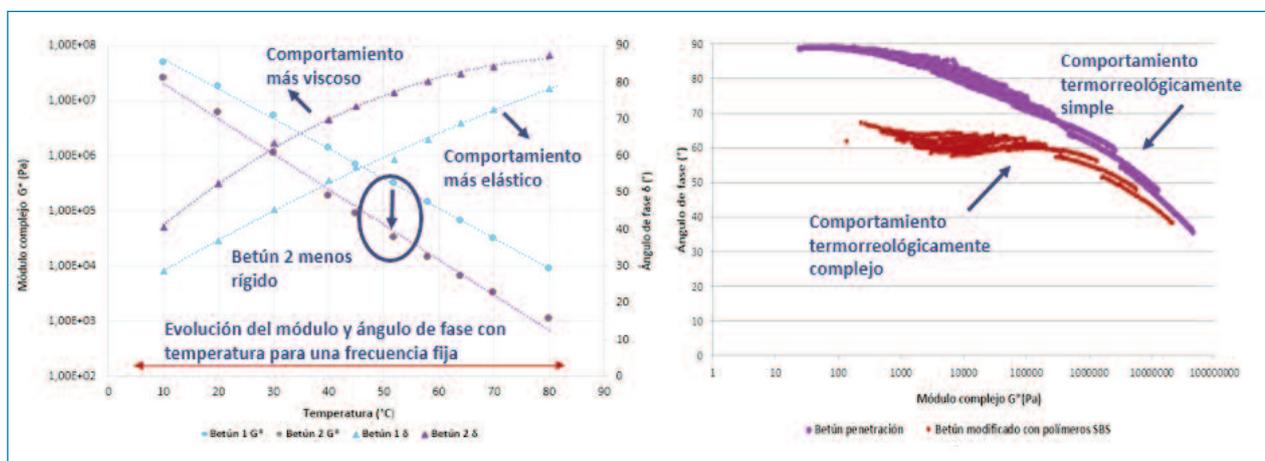


Figura 3. Ejemplo de representación de isocronas (izquierda) y Diagramas de Black (derecha) para distintos betunes.

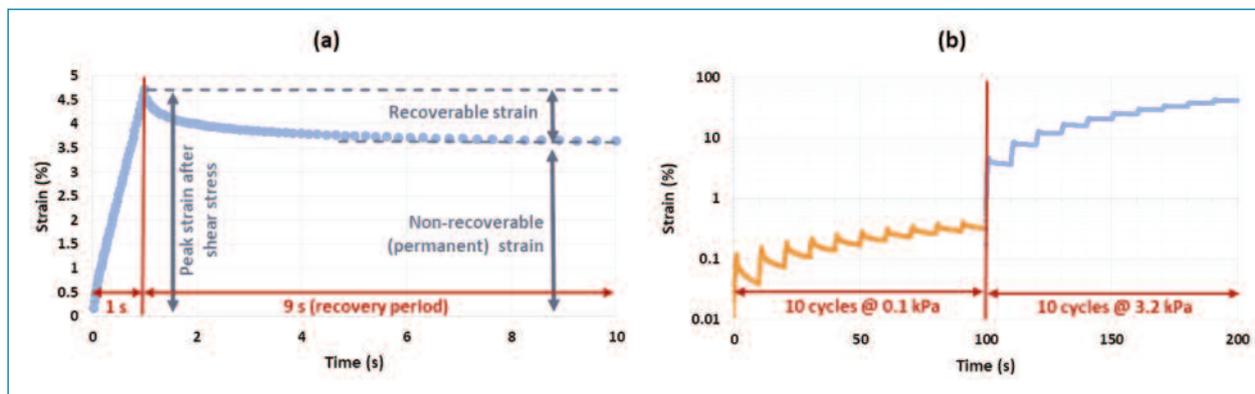


Figura 4. Descripción del ensayo MSCRT: a) Ciclo individual de carga y parámetros calculados; b) Conjunto de ciclos de carga en un ensayo completo a dos niveles de carga (Moreno-Navarro et al. 2019).

información del grado de resistencia de la mezcla que incorpore el ligante analizado frente a las deformaciones permanentes, a través de un ensayo cíclico más cercano al carácter cíclico de la aplicación de las cargas del tráfico.

Además, a partir de los ensayos realizados en las dos condiciones temperatura (45 °C y 70 °C) para una carga de 3.2 kPa, la nueva metodología desarrollada por La-BIC-UGR [2] establece dos nuevos parámetros:

- La tasa de deformación no recuperada (Non-Recoverable Strain Rate,  $\Delta_{Enr}$ , in %/cycles) obtenida mediante la deformación acumulada en los últimos quince ciclos de carga del ensayo
- La deformación media recuperada de los últimos quince ciclos (Average Recovered Strain,  $RS_{15-30}$ ).

Mediante la representación gráfica de estos parámetros se puede entender el comportamiento del ligante frente a la deformación (Figura 5) y se pueden obtener dos parámetros más, el índice de flujo (Flow Index, F) y la capacidad de Recuperación (Recovery Capacity, RC).

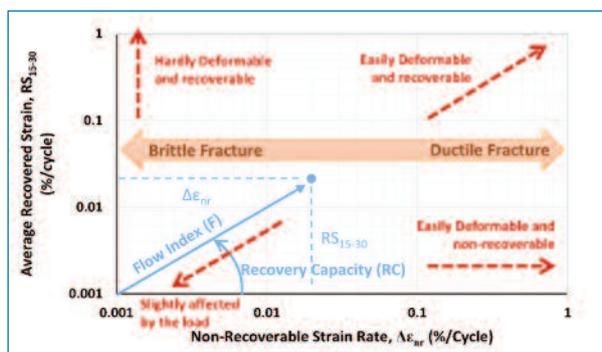


Figura 5. Representación de los parámetros básicos de análisis de la nueva metodología MSCRT [2] (Moreno-Navarro et al. 2019).

El primero (F) es una medida de la capacidad del ligante de deformar frente a la aplicación de una carga. A medida que es más alto, menor será la capacidad de aguantar esfuerzos sin deformar, independientemente de si dicha deformación es recuperable o no. La Capacidad de Recuperación (RC), por su parte, es una medida cuantitativa (no relativa como era el porcentaje de recuperación) de la elasticidad del ligante. Mediante la relación de estos últimos parámetros, se define un nuevo índice de gran utilidad para evaluar la durabilidad de las mezclas que apliquen los betunes ensayados, el L-index. A medida que el índice de flujo crece, la resistencia del material frente a las cargas disminuye mientras que, si el RC aumenta, la resistencia a las deformaciones plásticas y la fatiga se incrementa. Por ello, valores altos de L-index indican una mayor susceptibilidad del ligantes a las cargas y una mayor probabilidad de aparición de problemas debido a la acción del tráfico. Por último, en la metodología se define un índice más que mediante las relaciones entre F y RC a las distintas temperaturas del ensayo permiten evaluar la susceptibilidad térmica de los betunes (T-index). Al igual que ocurre con el L-index mayores valores indican una mayor susceptibilidad a la temperatura.

Por su parte, las mezclas bituminosas estudiadas fueron sometidas a los siguientes ensayos:

- **Densidad y contenido de huecos** (según UNE-EN 12697-5, UNE-EN 12697-6 y UNE-EN 12697-8). Con cada una de las mezclas objeto de estudio se fabricaron probetas tipo Marshall de 101.6 mm de diámetro compactadas con 75 golpes por cara en

el caso de las mezclas AC 22 y 50 golpes por cara en el de las mezclas BBTM 11B, a las que posteriormente se determinó su densidad aparente (UNE-EN 12697-6) utilizando el Procedimiento B Superficie saturada seca en las mezclas AC 22 y el y el Procedimiento D Geométrica en mezclas BBTM 11B. Asimismo, se determinó la densidad máxima de las mezclas fabricadas utilizando el picnómetro según el Procedimiento A Volumétrico (UNE-EN 12697-5). Con los datos de ambas densidades (aparente y máxima), se determinó el contenido de huecos de los materiales estudiados según la norma UNE-EN 12697-8.

- **Sensibilidad al agua** (según UNE-EN 12697-12) [3]. Adicionalmente, con cada una de las mezclas objeto de estudio se fabricaron 6 probetas de 101.6 mm de diámetro con compactador Marshall aplicando 50 golpes por cara, para la realización del ensayo de Sensibilidad al Agua. Para ello, las probetas se acondicionaron dividiéndolas en dos grupos de 3, uno seco y otro húmedo. El grupo seco, se almacenó a temperatura ambiente de laboratorio comprendida entre  $20 \pm 5$  °C, mientras que el grupo húmedo se aplicó el vacío hasta obtener una presión de  $6,7 \pm 0,3$  kPa durante  $30 \pm 5$  minutos, y después, se dejó en condiciones de inmersión a 40°C durante 72 horas. Posteriormente se llevó a cabo la rotura a tracción indirecta de cada una de las probetas (tanto del grupo seco, como del grupo húmedo), a una temperatura de 15 °C, y tras una aclimatación previa de éstas durante 120 minutos a dicha temperatura. Los resultados del ensayo se expresan en función de la resistencia conservada de las probetas obtenidas tras dividir las resistencias de las probetas húmedas entre las de las secas (ITSR, %).

- **Ensayo de rigidez** (según UNE-EN 12697-26, anexo C) [4]. Asimismo, otras tres probetas tipo Marshall (de 101.6 mm de diámetro y compactadas a 50 golpes por cara) se fabricaron con cada una de las mezclas objeto de estudio para la realización del ensayo de rigidez a 20 °C. El ensayo consiste en la determinación del módulo de rigidez a partir de la aplicación de una serie de 15 pulsos de

carga controlada a tracción indirecta (en forma de medio seno), de 3 segundos de duración. Los 10 primeros pulsos se utilizan de acondicionamiento para permitir que el equipo se ajuste a la magnitud de la carga y a su duración, y los 5 siguientes pulsos sirven para determinar el módulo de rigidez de la mezcla, siendo éste la media obtenida de los 5 pulsos. Una vez determinado dicho valor, se giran las probetas y se determina el módulo del diámetro perpendicular, debiendo estar comprendido entre 80% y el 110% del primero, sino el ensayo se considera no válido. El valor final del módulo de rigidez de cada probeta se corresponde con la media obtenida de ambos diámetros, y el de la mezcla con la media obtenida de la rigidez de cada una de sus probetas.

- **Ensayo triaxial** (según UNE-EN 12697-25, Método B) [5]. Una vez realizado el estudio de rigidez, las 3 probetas de cada mezcla fueron empleadas para evaluar su resistencia a deformaciones plásticas a través del ensayo triaxial. Este método de ensayo consiste en la aplicación combinada a temperatura constante de 60 °C, de una carga de confinamiento (en torno a los 120 kPa) y otra axial cíclica sinusoidal desfasada en el origen de valor (en torno a los 300 kPa), bajo una frecuencia de 3 Hz durante 10.000 ciclos de carga. Los parámetros de fluencia (pendiente de la curva de deformación en el tramo de crecimiento estable del ensayo) y deformación permanente (deformación acumulada por la probeta tras los 10000 ciclos de carga) de cada mezcla vienen determinados como la media de los valores obtenidos para cada par de probetas ensayadas.

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1. Estudio a nivel de ligantes

La respuesta reológica en base a la frecuencia y la temperatura (diagramas de Black) pone de manifiesto el efecto de los modificadores (PNFVU y aditivos) utilizados en el diseño de los betunes (Figuras 6 y 7). En ellas se puede observar cómo los ligantes modificados con

PNFVU presentan una menor rigidez (menor módulo complejo) y mayor elasticidad (menor ángulo de fase) que los ligantes convencionales, independientemente de la temperatura o frecuencia de ensayo. Asimismo, se ha demostrado cómo la incorporación de estos modificadores conlleva un cambio en la respuesta viscoelástica de los ligantes, ofreciendo un comportamiento termo-reológico complejo (en el que pueden obtenerse similares respuestas viscoelásticas bajo distintas condiciones de frecuencia y temperatura).

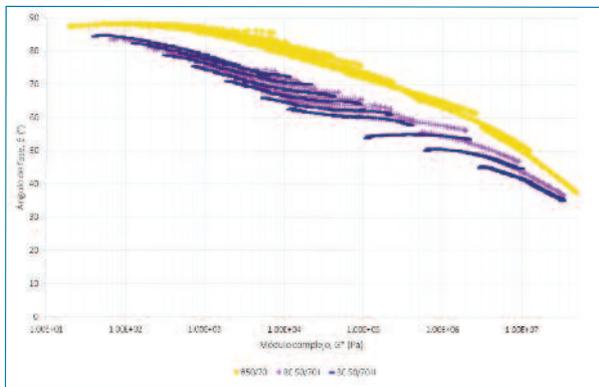


Figura 6. Diagramas de Black de los betunes BC para mezclas a baja temperatura desarrollados.

En comparación con un ligante modificado con SBS tradicional, los PMB C ofrecen un comportamiento bastante similar, no obstante, en función del aditivo empleado, este comportamiento puede verse alterado, especialmente a bajas temperaturas. En este sentido, se observó que el aditivo II es menos estable ante las variaciones térmicas, ofreciendo los betunes modificados con él, una mayor variación en la respuesta viscoelástica en función de la temperatura, como se observa en la figura 7.

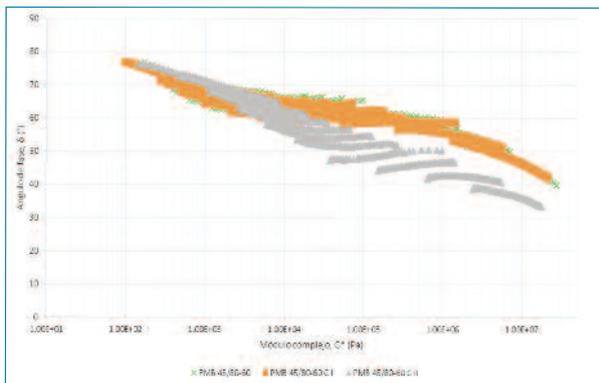


Figura 7. Diagramas de Black de los betunes PMB C para mezclas a baja temperatura desarrollados.

Por su parte, los resultados obtenidos en el ensayo MSCR (Figuras 8 y 9) muestran como la incorporación del PNFVU permite garantizar una mayor recuperación elástica en los ligantes, así como una menor susceptibilidad ante las cargas mecánicas. De esta forma, y a pesar de que a elevadas temperaturas (70 °C), no llegan a ofrecer una respuesta mecánica de tan alto grado como los ligantes modificados con SBS tradicionales (especialmente en los ligantes con el aditivo II), a temperaturas altas de servicio (45 °C) su resistencia ante cargas es del mismo orden de magnitud.

De todos estos resultados se obtienen los parámetros del índice de flujo (Flow Index, F) y la capacidad de Recuperación (Recovery Capacity, RC) y de la relación de estos últimos se calcula el L-index que es de gran utilidad para evaluar la durabilidad de las mezclas y T-index para evaluar la susceptibilidad térmica de los betunes, que muestran los valores recogidos en la Tabla 3

Tabla 3. Valores de L-Index y T-Index obtenidos a diferentes temperaturas para los ligantes estudiados.

	L-Index (45°C)	L-Index (70°C)	L-Index
B 50/70	4.301	-	36.35
BC 50/70 I	0.368	538.37	16.89
BC 50/70 II	0.542	3790.75	35.90
PMB 45/80-60	0.105	10.25	3.40
PMB 45/80-60 CI	0.159	43.33	7.78
PMB 45/80-60 CII	0.095	277.43	12.51

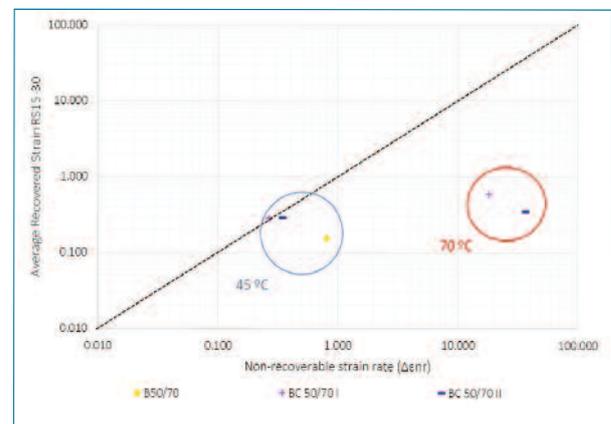


Figura 8. Resultados en ensayo MSCR de los ligantes BC.

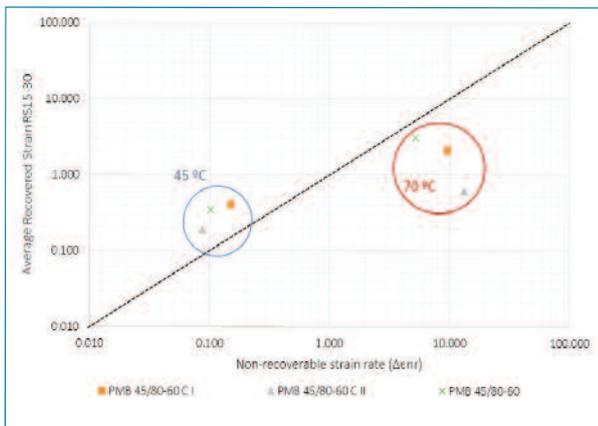


Figura 9. Resultados en el ensayo MSCR de los ligantes PMB C.

### 3.2. Estudio a nivel de mezcla bituminosa

Los resultados obtenidos a nivel de mezclas demuestran que las características de éstas (densidad y contenido de huecos) no se ven afectadas para la misma energía de compactación, independientemente del contenido de caucho utilizado ni de la temperatura de fabricación de las mezclas (Figuras 10 y 11). Este hecho pone de manifiesto la trabajabilidad de los betunes BT para mezclas MASAI desarrollados al amparo de esta investigación.

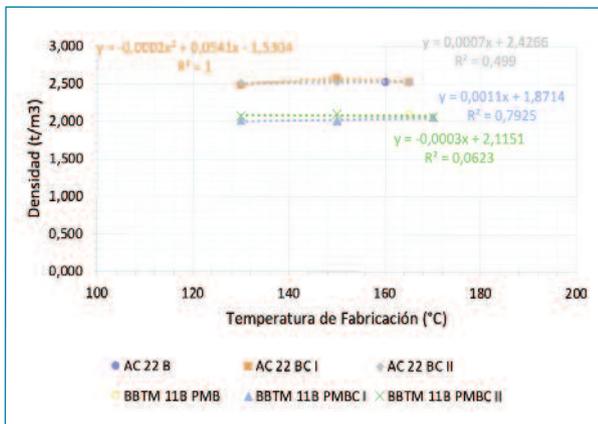


Fig.10 Variación de la densidad de las mezclas con la temperatura de fabricación de las mezclas con cada ligante

De la misma forma, en términos de deformaciones plásticas, y a pesar de reducir la temperatura de fabricación de las mezclas en unos 30 °C, las mezclas AC 22 fabricadas con los betunes BT con PNFVU no ven afectada su resistencia mecánica (Figura 12). En el caso de las

mezclas BBTM 11B se observa que, para temperaturas de fabricación inferiores a 140 °C, la resistencia a deformación de las mezclas estudiadas empieza a verse considerablemente afectada, situándose por encima del 3%.

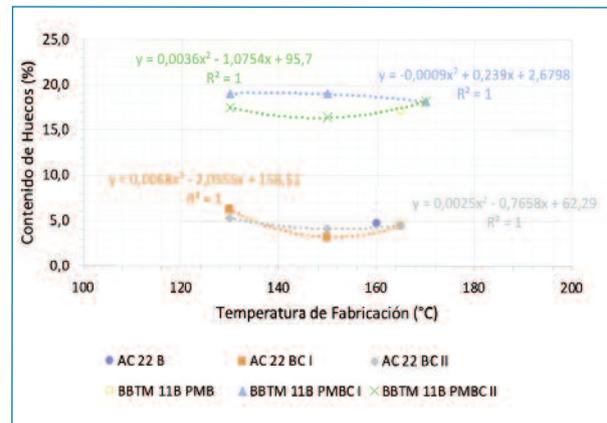


Fig.11 Variación del contenido de huecos de las mezclas a cada temperatura de fabricación de las mezclas con cada ligante

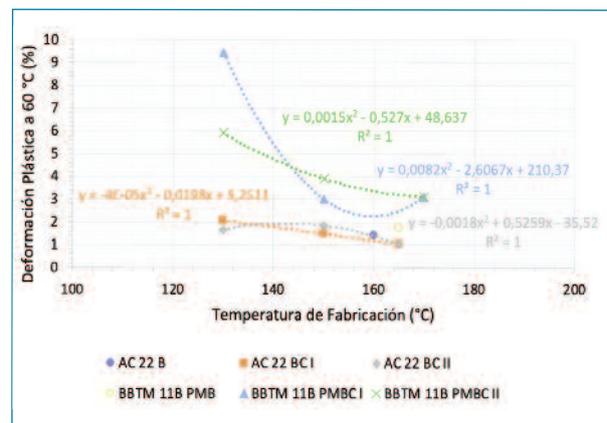


Fig.12 Valores medios de deformaciones permanentes a 60°C de las mezclas a distintas temperaturas de fabricación

Las mezclas fabricadas con los betunes BT con PNFVU ofrecen una menor rigidez que las mezclas de referencia independientemente a la temperatura de fabricación utilizada (Figura 13). No obstante, esta rigidez se muestra más o menos estable hasta temperaturas del entorno de los 140 C, a partir de los cuales ésta empieza a verse más afectada.

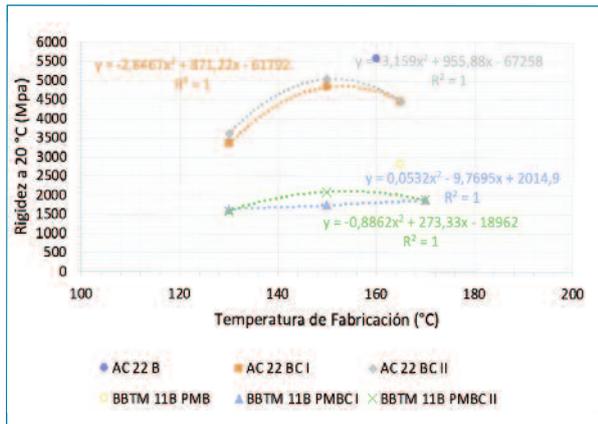


Fig.13 Valores medios de la rigidez a 20°C de las mezclas a distintas temperaturas de fabricación

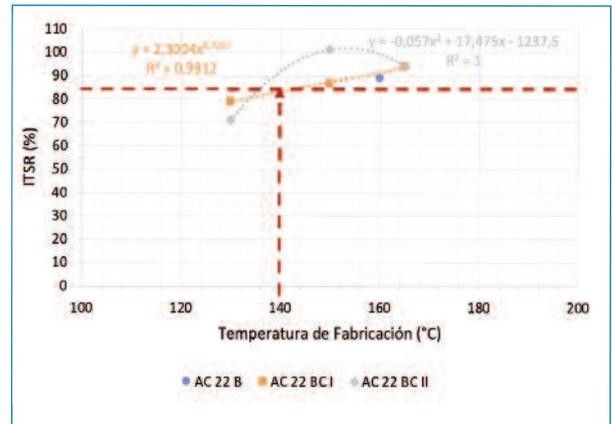


Fig.15 Valores medios de resistencia conservada de las mezclas AC22 a distintas temperaturas de fabricación

Al igual que ocurriera en términos de rigidez, la resistencia a tracción indirecta de las mezclas fabricadas con los betunes BT con PNFVU es ligeramente inferior a la de los betunes de referencia (Figura 14), viéndose afectada de forma lineal con la temperatura (a menor temperatura de fabricación, menor resistencia a tracción indirecta).

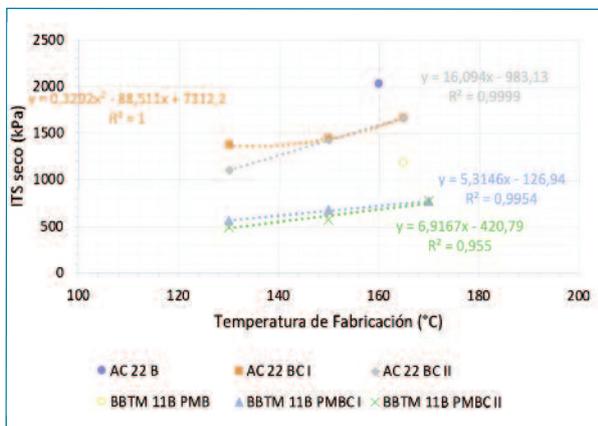


Fig.14 Valores medios de la resistencia a tracción indirecta de las mezclas a distintas temperaturas de fabricación

En términos de resistencia conservada, los valores se mantienen adecuados hasta temperaturas del entorno de los 140° C tanto para las mezclas AC22 (Figura 15) como para las mezclas BBTM 11B (Figura 16)

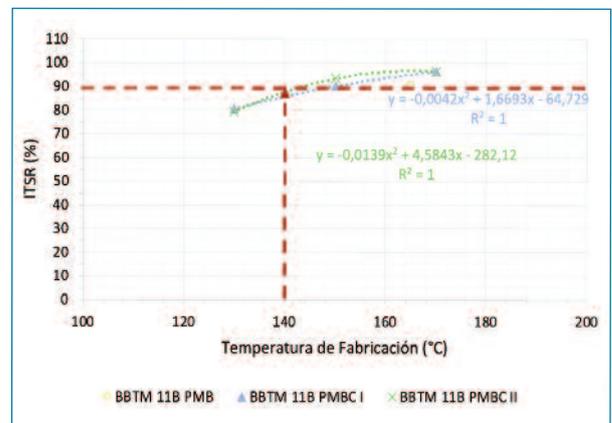


Fig.16 Valores medios de resistencia conservada de las mezclas BBTM 11B a distintas temperaturas de fabricación

## 4. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos puede decirse que se ha desarrollado una gama de betunes mejorados y modificados con caucho, adecuados para fabricar mezclas MASAI a temperaturas iguales o inferiores a 140 °C.

Otras conclusiones que podemos extraer del trabajo realizado, en el que se han evaluado más de 58 mezclas asfálticas, son las siguientes:

- Los contenidos de huecos y densidad pueden no ser los parámetros de control adecuados en la evaluación de la mezcla: se han obtenido rigideces y resistencias mucho menores, a temperaturas bajas, donde se habían alcanzado, sin embargo, densidades y huecos similares.

- La resistencia conservada en sensibilidad al agua, igualmente, puede no ser un parámetro óptimo por sí sólo. Hemos comprobado que, en algunos casos, una mezcla podía tener mayores resistencias a tracción indirecta tanto en seco como en húmedo que otra y, sin embargo, presentar ratios ITSR menores.

- El estudio reológico de los ligantes muestra que la incorporación del PNFVU y de los aditivos BT conlleva un cambio en la respuesta viscoelástica de los ligantes y que los nuevos parámetros L-index y T-index son de gran utilidad para evaluar la durabilidad y la susceptibilidad térmica de los betunes, siendo mejores los resultados obtenidos para los betunes caucho con el aditivo tipo I (tensoactivos).

- Las mezclas a baja temperatura, como en general cualquier otra, requiere un diseño específico considerando la temperatura de trabajo a la que se vaya a fabricar y compactar, de manera que se puedan optimizar sus prestaciones en base a los contenidos de ligante y encaje granulométrico que ofrezca los mejores resultados. Por tanto, pueden ser necesarios, y beneficiosos, ajustes en ambos (contenido de ligante y granulometría), con respecto a las mezclas convencionales de referencia, para asegurar el mejor desempeño posible ya que se trata de mezclas con una casuística diferente.

Seguiremos trabajando en la mejora de las prestaciones mecánicas de estos ligantes y mezclas, a través de la incorporación de nuevos modificadores sostenibles y métodos de ensayos más avanzados que nos permitan garantizar materiales asfálticos óptimos para la próxima generación de carreteras.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] EN 16659:2015 Bitumen and Bituminous Binders - Multiple Stress Creep and Recovery Test (MSCRT)
- [2] Fernando Moreno-Navarro, Raúl Tauste, Miguel Sol-Sánchez & M<sup>a</sup> Carmen Rubio-Gámez (2019) New approach for characterising the performance of asphalt binders through the multiple stress creep and recovery test, Road Materials and Pavement Design, 20:sup1, S500-S520, DOI: 10.1080/14680629.2019.1595094
- [3] EN 12697-12:2018. Bituminous mixtures - Test methods - Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens 1.
- [4] EN 12697-26:2018 annex C. Bituminous mixtures - Test methods - Part 26: Stiffness
- [5] EN 12697-25:2016, Method B. Bituminous mixtures - Test methods - Part 25: Cyclic compression test Triaxial cyclic compression test.