

Ensayos reológicos y empíricos de un betún recuperado de testigos y utilizado en la fabricación de una mezcla bituminosa semicaliente con tensoactivos

Rheological and Empirical Tests of Bitumen Recovered from Cores and Used to Produce a Warm Mix Asphalt with Surfactants

Belén Enciso Ramos¹, María Sánchez Pallarés², Rafael Jiménez Sáez^{3*}

Resumen

Con el objetivo de reducir las emisiones en la fabricación y puesta en obra de las mezclas bituminosas se han desarrollado a lo largo de los últimos años nuevos tipos de mezclas que permiten trabajar a temperaturas menores que las de las mezclas bituminosas en caliente. Unas de ellas, las mezclas semicalientes, se fabrican a unos 40 °C por debajo de la temperatura habitual, con lo cual se reduce notablemente la cantidad de gases contaminantes emitidos a la atmósfera. Para obtener estas mezclas semicalientes existen varios métodos, uno de los cuales es adicionar agentes tensoactivos que son capaces de reducir la tensión superficial del betún, disminuyendo el ángulo de contacto entre este y los áridos, y mejorando la trabajabilidad de la mezcla, lo que permite una adecuada envuelta de los áridos a temperaturas menores.

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de realizar ensayos empíricos y prestacionales a betunes recuperados de testigos de un tramo de la autovía A-62, entre los PP.KK. 171+100 y 191+000, en el cual se ha extendido una mezcla semidensa semicaliente fabricada con tensoactivos. Para poder comparar los resultados obtenidos, también se han ensayado los betunes recuperados de otras dos mezclas bituminosas en caliente extendidas en el mismo tramo.

Con este estudio se pretende aportar una mayor información sobre el comportamiento de los betunes utilizados para la fabricación de mezclas semicalientes con tensoactivos.

Palabras clave: mezcla semicaliente, ensayos reológicos, tensoactivo, módulo dinámico, diagrama de Black, curvas maestras.

Abstract

New types of bituminous mixtures have been developed over the last few years in order to reduce greenhouse gas emissions. Warm bituminous mixtures are produced and placed at temperatures some 40 °C lower than hot bituminous mixtures, which significantly reduces the amount of polluting gases emitted into the atmosphere. There are several methods to obtain these warm bituminous mixtures. Surfactants are capable to reduce the bitumen surface tension. This lowers the contact angle between bitumen and aggregates, and improves coverage of aggregates and workability of the mixture at lower temperatures.

This work presents the results obtained from carrying out empirical and performance tests on bitumens recovered from cores of a section of the A-62 highway, between km 171+100 and 191+000, in which a warm semidense bituminous mixture with surfactants added, has been placed. For comparison of the results obtained, bitumens recovered from two different hot bituminous mixtures and placed in the same section have also been tested.

The aim of this study is to provide more information about the behavior of bitumens used for the production of warm bituminous mixtures with surfactants.

Keywords: Warm bituminous mixture, rheological tests, surfactant, dynamic modulus, Black Diagram, master curves.

1. INTRODUCCIÓN

Para conocer en mayor profundidad el comportamiento de las mezclas semidensas semicalientes fabricadas con

betún con tensoactivos, el Centro de Estudios del Transporte (CET), del CEDEX, ha realizado un trabajo en el cual se han recuperado diversos ligantes de mezclas bituminosas extendidas en el tramo de la autovía A-62 entre los PP.KK. 171+100 y 191+000, y se han caracterizado mediante ensayos empíricos y prestacionales. El objetivo del estudio ha sido, además de conocer las características de cada uno de los ligantes tras dos meses de la puesta en obra de las mezclas, poder comparar sus propiedades para determinar si los ligantes utilizados en mezclas semicalientes presentan diferencias en sus características respecto a los convencionales.

* Autor de contacto: rafael.jimenez@cedex.es

¹ Doctora ingeniera industrial. Investigadora I+D+i. Centro de Estudios del Transporte (CEDEX).

² Licenciada en Ciencias Químicas. Directora de Programa. Centro de Estudios del Transporte (CEDEX).

³ Licenciado en Ciencias Químicas. Consejero Técnico. Centro de Estudios del Transporte (CEDEX).

Los ligantes analizados corresponden a testigos de tres mezclas bituminosas diferentes. La primera de ellas es una mezcla en capa base AC 22 S fabricada con un 20 % de asfalto reciclado, y cuyo betún es un B 50/70. La segunda, colocada en capa intermedia, es una mezcla semicaliente AC 22 S, fabricada con un 5 % de asfalto reciclado y un betún BT 35/50 con tensoactivos. La tercera corresponde a la mezcla bituminosa en caliente equivalente a la semicaliente, AC 22 S, es decir, fabricada con los mismos componentes (áridos, filler, material reciclado y curva granulométrica), pero con un betún convencional B35/50.

Las características de los ligantes se han obtenido a través de los ensayos empíricos de penetración, anillo y bola y fragilidad Fraass, y de ensayos prestacionales, realizados mediante reómetro DSR: Determinación de módulos dinámicos/ángulos de fase y ensayo de fluencia-recuperación (MSCR).

2. ENSAYOS EMPÍRICOS

Para la ejecución de los ensayos de penetración, determinación del punto de reblandecimiento y determinación del punto de fragilidad Fraass se han seguido las normas de ensayo UNE-EN 1426 [1], UNE-EN 1427 [2] y UNE-EN 12593 [3] respectivamente. Los ligantes se recuperaron mediante extractor centrífugo y diclorometano según UNE-EN 12697-1 [4], eliminando el disolvente con evaporador rotatorio (UNE-EN 12697-3) [5].

Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados de los ensayos empíricos sobre betunes

	B 50/70 Capa base	BT 35/50 Capa intermedia semicaliente	B 35/50 Capa intermedia
Penetración a 25 °C (0,1 mm)	31	28	33
Punto de reblandecimiento A y B (°C)	55,9	58,4	54,9
Punto de fragilidad Fraass (°C)	-8	-7	-9

En los resultados de penetración se aprecia el envejecimiento propio de cualquier ligante que se recupere de una muestra de mezcla bituminosa, con una disminución de la penetración respecto a los intervalos que debían cumplir los ligantes originales de acuerdo a las especificaciones [6]. En este caso hay que añadir además el efecto del betún envejecido procedente del material reciclado, que ha pasado a formar parte del betún recuperado. Destaca en este aspecto el B50/70 cuya disminución de penetración es muy notable, comparada con la experimentada por los otros dos ligantes, lo que se explicaría debido a que la mezcla de procedencia tiene en su composición un 20 % de material reciclado frente al 5 % de las otras dos muestras.

Respecto a los aumentos del punto de reblandecimiento y del punto Fraass no se dispone de datos de los betunes originales para comparar, aunque según especificaciones, los ligantes recuperados de la capa intermedia aún se encuentran dentro (mezcla convencional con B35/50) o muy cerca (mezcla semicaliente con BT35/50) del intervalo del punto de reblandecimiento definido para un ligante tipo

B35/50 original sin envejecer (50-58 °C), mientras que el B50/70 de la capa base queda fuera de su intervalo (46-54 °C). En cualquier caso, y a pesar del efecto del betún envejecido procedente del fresado, ninguno de los tres ligantes recuperados parece haber superado el incremento máximo permitido del punto de reblandecimiento en ligantes envejecidos a corto plazo: 11° C para un B35/50 y 10° C para un B50/70.

En cuanto al punto de fragilidad Fraass, los tres betunes cumplen la especificación, no superando los valores máximos prescritos para ligantes originales (solo el B50/70 iguala su límite máximo de -8 °C).

Se aprecian ligeras diferencias entre los valores del betún B35/50 y el BT35/50 de baja temperatura, asumiendo que el ligante aditivado se ha obtenido a partir del primero simplemente por incorporación del producto tensoactivo y no se ha partido de otro betún. El punto de reblandecimiento y el de fragilidad Fraass son mayores en el BT35/50, y la penetración es algo menor. Es decir, a pesar de las menores temperaturas de fabricación y extendido aplicadas por la presencia del aditivo, el betún recuperado de la mezcla semicaliente parece haber experimentado una alteración ligeramente mayor debido a la fabricación, puesta en obra y puesta en servicio durante 2 meses, haciéndolo ligeramente más rígido, que el obtenido de la mezcla fabricada con B35/50. El proceso de recuperación de este ligante a partir de la mezcla también ha podido influir, ya que la eliminación del disolvente se prolongó mucho más tiempo del habitual.

3. ENSAYOS REOLÓGICOS

Los ensayos reológicos se han realizado con el fin de determinar características y parámetros de tipo prestacional propios de los ligantes bituminosos que, previsiblemente, formarán parte de futuras especificaciones europeas. Se han realizado los ensayos de módulo dinámico en cizalla y de fluencia-recuperación. Para ello se ha empleado un reómetro de cizallamiento dinámico (DSR).

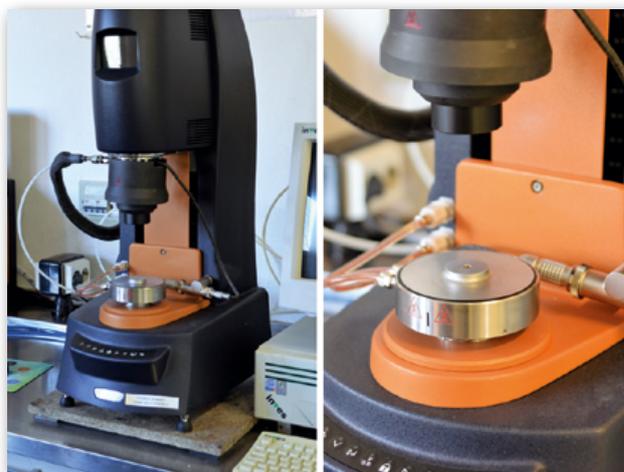


Figura 1. Reómetro DSR.

3.1. Ensayos de módulo dinámico

Para la determinación de módulos dinámicos en cizalla G^* se ha seguido el método descrito en la norma UNE-EN 14770 [7]. Consiste en preparar una muestra del

ligante en forma de disco colocado entre dos placas paralelas concéntricas, una fija y otra oscilante, y se aplica un esfuerzo cortante de oscilación sinusoidal alrededor de la posición inicial de reposo en la muestra. La amplitud cíclica del esfuerzo se mantiene constante durante el ensayo y se mide la amplitud cíclica de deformación relativa producida en la muestra, deformación que también será en forma de onda sinusoidal.

El módulo complejo en cizalla G^* se determina a partir de la relación entre las amplitudes de las ondas de esfuerzo y de deformación. Al ser el ligante un material visco-elástico, tiene lugar un desfase temporal entre ambas ondas, que se mide mediante el ángulo de fase δ .

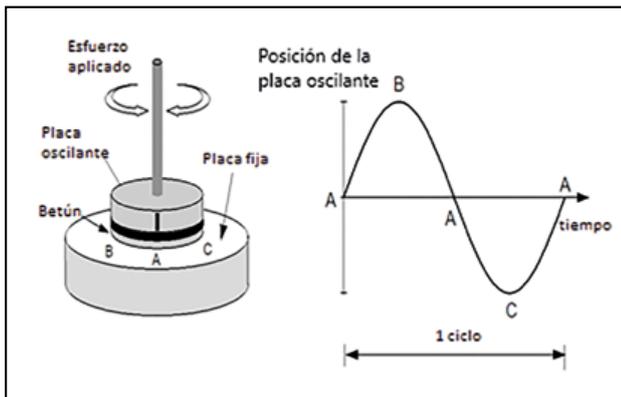


Figura 2. Esfuerzo sinusoidal de corte aplicado en un reómetro DSR para el estudio de ligantes bituminosos.

El módulo G^* , sus dos componentes elástica (o de almacenamiento) y viscosa (o de pérdidas) G' y G'' respectivamente, y el ángulo de fase δ , se determinan a diferentes temperaturas y frecuencias de oscilación, para lo cual se realizan barridos de frecuencia desde 0,1 Hz hasta 10 Hz a temperaturas constantes cubriendo un rango desde 5 °C hasta 85 °C y tomando medidas cada 5 °C, según se indica en la norma UNE-EN 14770. Es importante considerar que

el esfuerzo constante aplicado sea tal que el betún trabaje durante todo el ensayo y todo el rango de temperaturas en su régimen viscoelástico lineal.

A partir de estos parámetros reológicos se pueden obtener distintas representaciones de los mismos, que dan una gran información del comportamiento del ligante analizado:

- El **diagrama de Black** es una representación gráfica de G^* frente a δ que incluye todos los pares de valores obtenidos en las diferentes condiciones de temperatura y frecuencia. El resultado se puede considerar como una especie de “huella dactilar” del ligante, ya que se obtiene una curva característica del material cuya forma puede cambiar mucho según se trate de un betún convencional, modificado con polímeros, o que incorpore algún otro aditivo modificador de sus propiedades reológicas [8]. Asimismo, el estado de envejecimiento del ligante también da lugar a cambios significativos en la forma de las curvas en estos diagramas, con respecto a las de los ligantes originales.

Se representan en la figura 3 los diagramas de Black de los tres betunes recuperados.

Como puede observarse, los tres betunes resultan ser muy similares presentando la misma tipología de curva, propia de los betunes convencionales sin modificar. No se aprecia que la presencia del tensoactivo en el BT35/50 para reducir la temperatura de fabricación haya aportado algún cambio significativo en el comportamiento reológico de ligante, ya que su curva apenas se distingue de las otras dos. Asimismo, el betún B50/70, a pesar de ser de un grado de penetración inicialmente mayor que el de los otros betunes, tampoco muestra diferencias significativas. La presencia de betún envejecido procedente del material reutilizado, en mayor proporción en el B50/70 respecto a los otros dos ligantes también

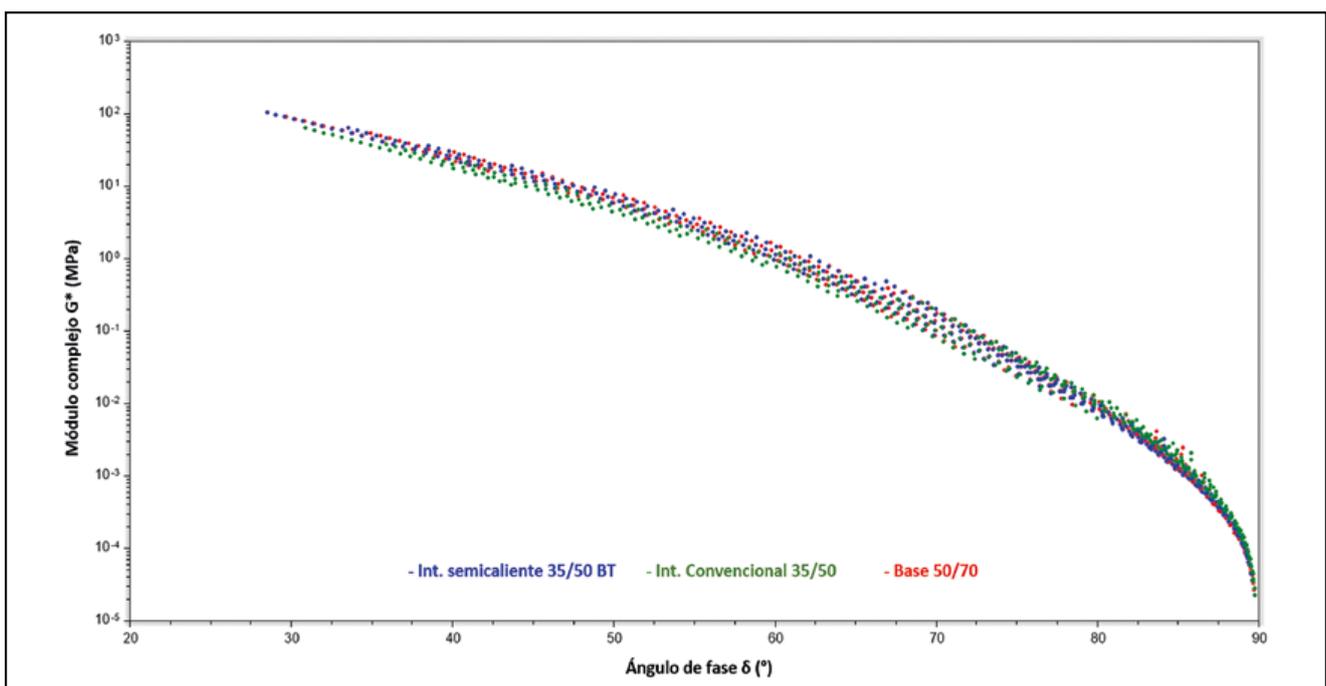


Figura 3. Diagramas de Black de los betunes recuperados.

puede estar contribuyendo a que esta similitud en las características reológicas de los tres ligantes recuperados sea aún mayor.

- **Curvas maestras.** Mediante una combinación de los datos medidos en las distintas condiciones de frecuencia y temperatura se pueden obtener las llamadas curvas maestras, que dan una representación de las magnitudes reológicas en un rango de frecuencias mucho más ampliado respecto a las medidas ensayadas, lo que permite caracterizar cada ligante de una forma más completa [9].

Para ello se toma una temperatura de referencia y se representan los correspondientes valores de G^* y de δ a las distintas frecuencias obteniendo la curva isoterma de referencia. El resto de isotermas obtenidas a las demás temperaturas y las mismas frecuencias son desplazadas a ambos lados de la curva de referencia hasta solapar entre sí, obteniendo una nueva y única isoterma muy ampliada en su rango respecto a las curvas de partida. Los desplazamientos aplicados a las distintas isotermas para formar la isoterma maestra se pueden determinar mediante diferentes métodos de cálculo.

En la figura 4 se muestran las curvas maestras para cada betún representando la variación del módulo complejo y del ángulo de fase frente a la frecuencia. Son isotermas cuya temperatura de referencia es de 20 °C.

El betún con un mayor módulo complejo a lo largo de todo el rango de frecuencias es el betún con tensoactivos de la mezcla semicaliente en capa intermedia (BT 35/50), seguido del betún de la capa base y del B35/50 convencional, que es el menos rígido de los tres. Contrariamente a lo que cabría esperar, su comportamiento se aleja de su homólogo con tensoactivos y se aproxima más al B50/70; esta aproximación se incrementa ligeramente al aumentar la frecuencia de ensayo.

Analizando el ángulo de fase, y a pesar de la mayor variabilidad que presentan los puntos de las curvas maestras en esta magnitud, su variación es acorde con la del módulo: los menores ángulos de fase se obtienen para el betún BT35/50, por lo que, de los tres betunes, además de ser el de mayor módulo es el que presenta un comportamiento más elástico; asimismo los mayores ángulos corresponden al B35/50, siendo por ello, el de mayor carácter viscoso. Se puede observar también, que a las frecuencias más bajas, el comportamiento de los tres betunes es prácticamente viscoso, alcanzando ángulos de fase cercanos a 90°. A medida que la frecuencia aumenta lo hace también la componente elástica, llegando a alcanzar, a las mayores frecuencias, ángulos de fase en torno a los 30°.

- Las **curvas isócronas** son otras de las representaciones más habituales y muestran la variación del módulo G^* o de δ frente a la temperatura a un único valor de frecuencia dado (el valor tomado como referencia para ligantes bituminosos es 1,59 Hz (10 rad/s), que equivaldría al paso de un vehículo a unos 75-90 km/h) [10]. A su vez las isócronas se utilizan para la obtención de otros parámetros indicativos de las características intrínsecas del ligante ensayado con respecto a la formación de deterioros por deformaciones plásticas o por fatiga.

Se observa de nuevo que el ligante que presenta un mayor módulo a lo largo de todo el intervalo de temperaturas es el betún con tensoactivos perteneciente a la mezcla semicaliente, BT35/50 y que además, su ángulo de fase es el menor de los tres betunes. Con su homólogo sin tensoactivos, el B35/50, sucede lo contrario, menor módulo y mayor ángulo de fase.

A continuación, se han determinado los valores críticos de temperatura de los tres betunes según el tipo de fallo (deformaciones plásticas o fatiga) aten-

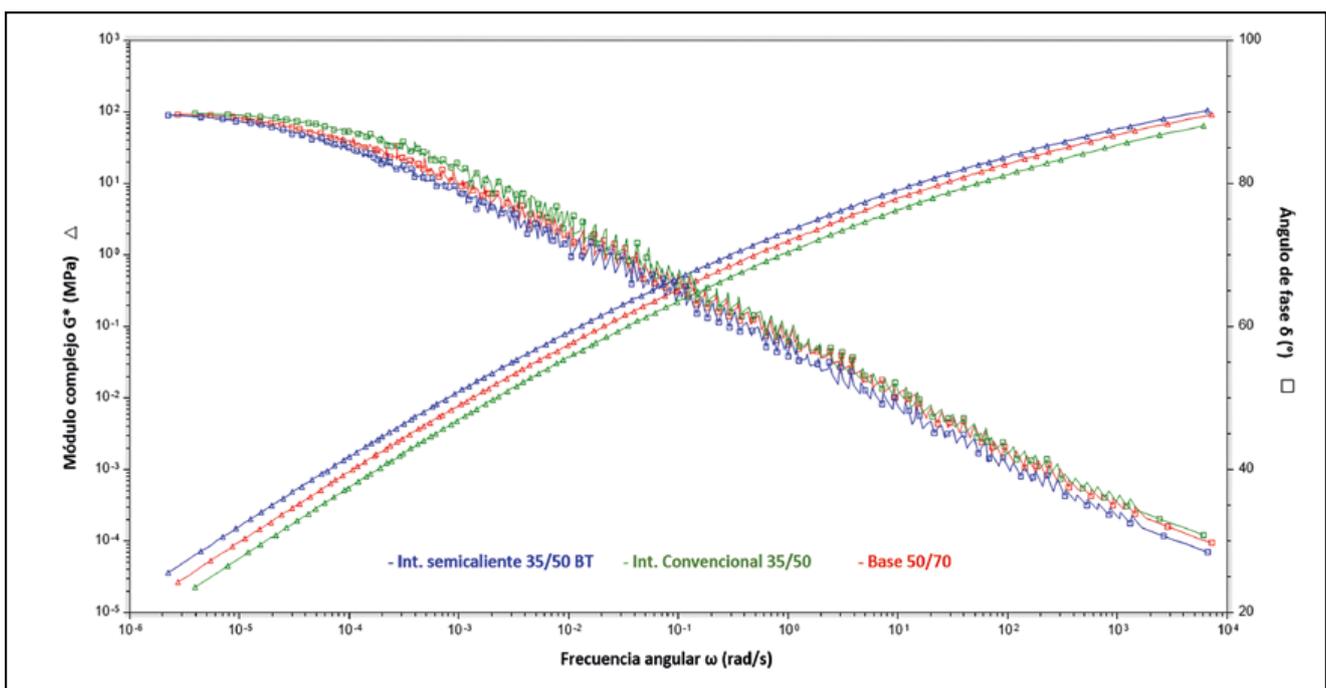


Figura 4. Curvas maestras de G^* y de δ a 20 °C para los tres betunes.

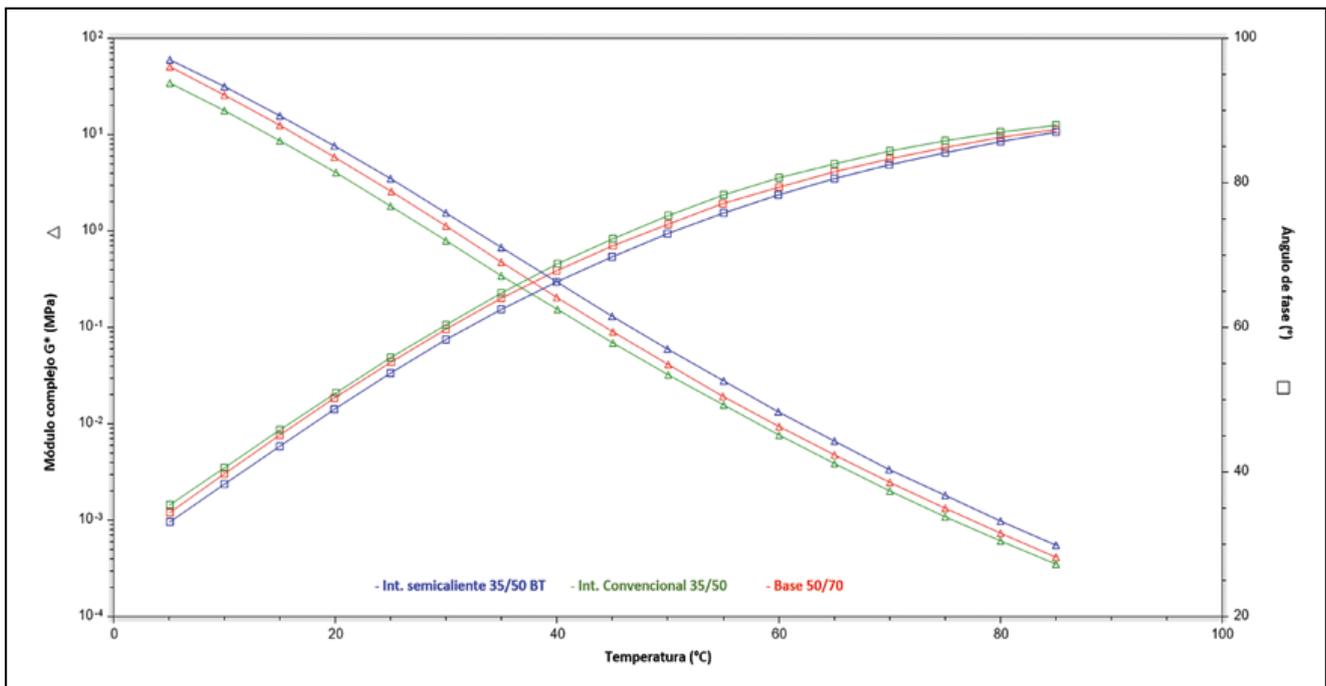


Figura 5. Isócronas de G^* y de δ a 10 rad/s.

diendo a los criterios para posibles especificaciones prestacionales que aún están en valoración y de los cuales todavía no se ha llegado a un consenso en Europa [11].

Fallo por deformaciones plásticas (roderas)

La formación de roderas se debe a la acumulación de tensiones por el paso repetido de los vehículos, que son disipadas en forma de deformaciones viscosas, no recuperables, y de calor. Por ello, este modo de fallo es importante a temperaturas medias-altas durante los primeros años en servicio del pavimento, puesto que, a medida que va

envejeciendo aumenta la rigidez del ligante y la formación de roderas es menos probable.

Para betunes convencionales se considera un valor crítico $G^* = 50 \text{ kPa}$, para el cual hay que determinar la temperatura y el ángulo de fase asociados a dicho valor. A continuación, en la figura 6 y la tabla 2, se muestran los resultados obtenidos para los tres betunes en las condiciones citadas a partir de las isócronas a una frecuencia de 1,59 Hz.

Cuanto mayor es la temperatura a la cual el módulo alcanza el valor de 50 kPa y menor es el ángulo de fase (comportamiento más elástico), menor será la tendencia del betún a la formación de roderas.

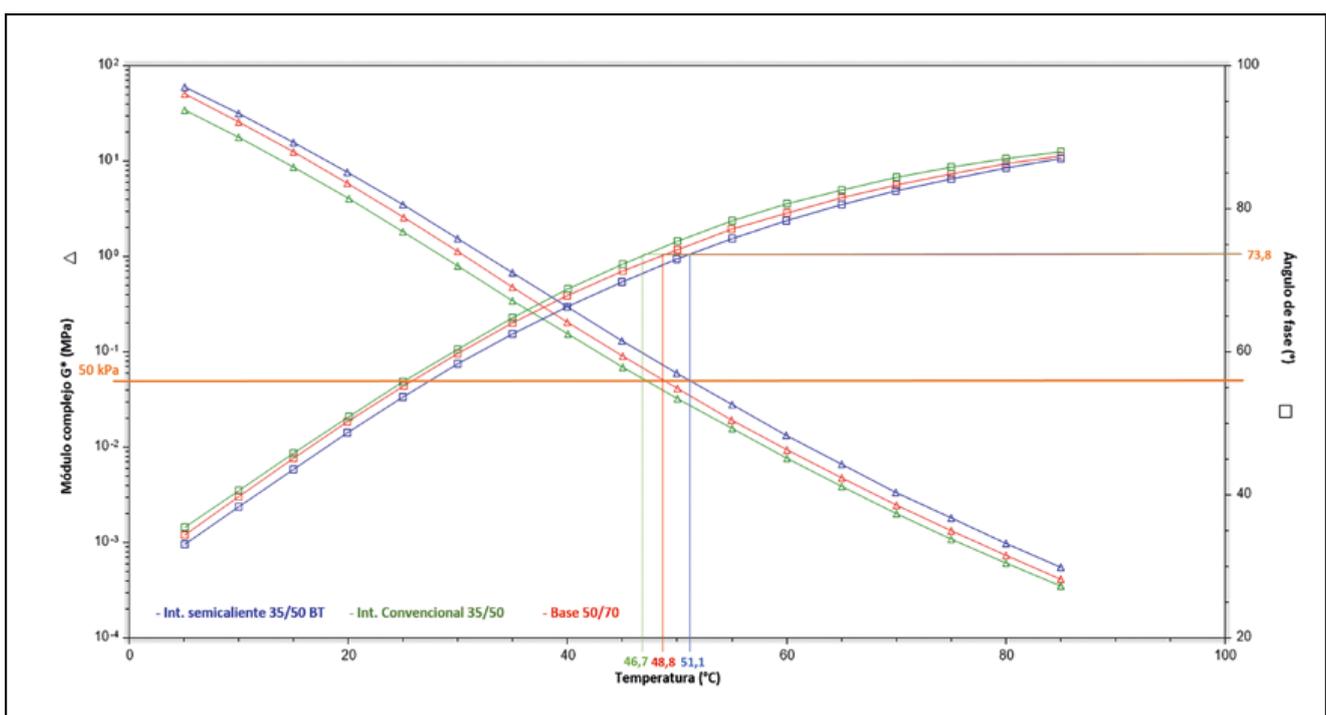


Figura 6. Parámetros de deformaciones plásticas. Cálculo de temperaturas y δ para $G^* = 50 \text{ kPa}$.

Tabla 2. Parámetros de deformaciones plásticas

Ligante	Temperatura (G* = 50 kPa) (°C)	Ángulo de fase (G* = 50 kPa) (°)
B 35/50	46,7	73,8
BT 35/50	51,1	73,8
B 50/70	48,8	73,8

A la vista de los resultados anteriores, el betún que alcanza el valor crítico a la mayor temperatura es el BT 35/50, correspondiente a la mezcla semicaliente; la menor temperatura sería para el B35/50. Estos resultados están en línea con todos los resultados anteriores.

Fallo por fatiga

La fisuración por fatiga se debe a la aplicación repetida de cargas por debajo de la resistencia máxima de la mezcla bituminosa y se suele producir a temperaturas próximas a la temperatura ambiente. La resistencia a fatiga depende de la capacidad del material para recuperarse tras la aplicación de la carga. Por lo tanto, comportamientos muy elásticos (valores bajos de ángulo de fase) favorecen esta recuperación. Pero también una mayor resistencia a fatiga se ve favorecida por valores bajos del módulo complejo, lo cual implica un menor desarrollo de tensiones ante la deformación inducida por la carga y, por tanto, una recuperación más fácil del estado tensional inicial. Esta resistencia se evalúa sobre un betún mediante DSR, considerando como valor crítico $G^* = 5 \text{ MPa}$.

Según este criterio, se han obtenido los siguientes resultados (figura 7, tabla 3):

Tabla 3. Parámetros de fallo por fatiga

Ligante	Temperatura (G* = 5 MPa) (°C)	Ángulo de fase (G* = 5 MPa) (°)
B 35/50	18,4	49,5
BT 35/50	22,5	51,9
B 50/70	20,9	51,1

A temperaturas inferiores a la que se obtiene el valor crítico, el módulo complejo es tan elevado que puede dar lugar fácilmente a fisuración bajo cargas repetidas y por tanto es más probable el fallo por fatiga. De esta forma, los ligantes con menores valores de temperatura a la que $G^* = 5 \text{ MPa}$ serán los que, *a priori*, tengan una mayor resistencia a la fisuración por fatiga, al disponer de un rango de temperaturas más amplio sin que este deterioro se produzca en gran medida.

En este caso, la menor temperatura para el valor crítico la proporciona el betún convencional B35/50 de la mezcla de la capa intermedia, que además presenta el valor de ángulo de fase más bajo. En cambio, es el betún BT35/50 el que peor comportamiento a fatiga muestra, según este criterio. Estos resultados confirman de nuevo lo ya obtenido en resultados previos al observar que el betún convencional B35/50 era el de menor módulo, en todo el rango de operación estudiado.

3.2. Ensayos de fluencia-recuperación

En cuanto al ensayo de fluencia-recuperación o MSCR (*Multiple Stress Creep Recovery*), se ha seguido el método descrito en la norma UNE-EN 16659 [12]. Partiendo igualmente de un disco de ligante, en este caso se le aplican diez

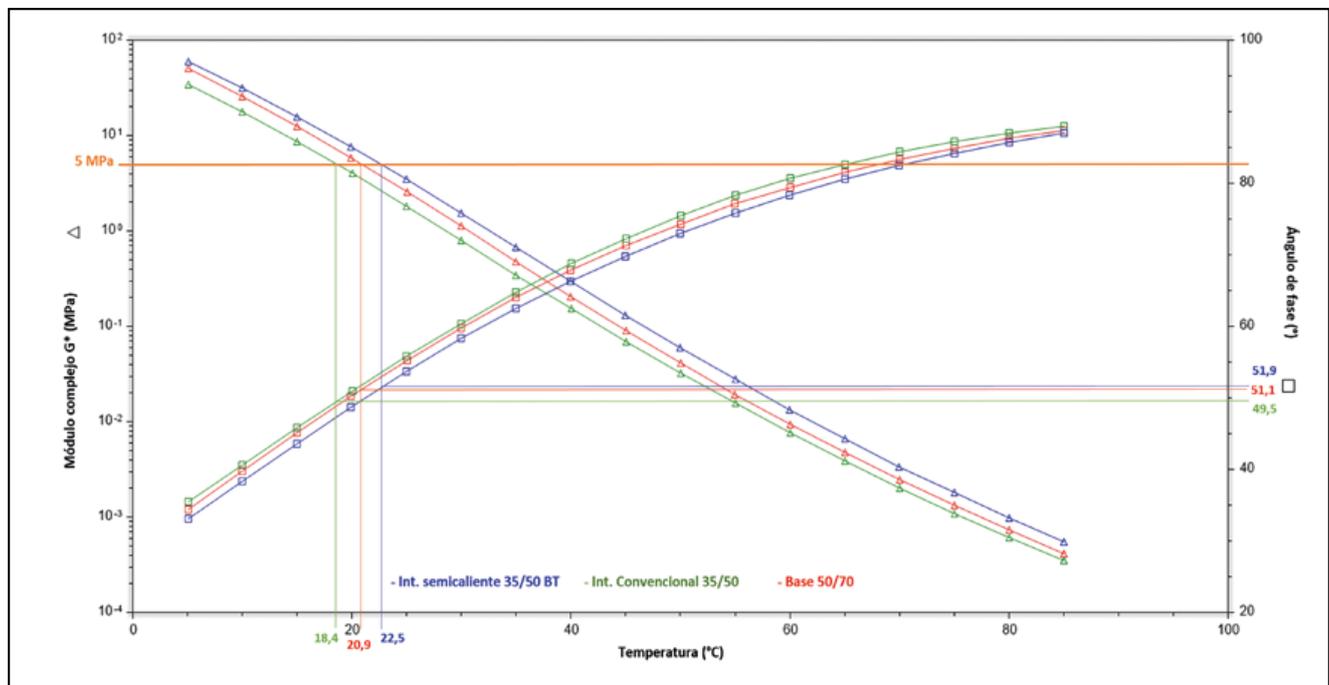


Figura 7. Parámetros de fallo por fatiga. Cálculo de temperaturas y δ para $G^* = 5 \text{ MPa}$.

ciclos sucesivos de esfuerzo-recuperación para dos niveles diferentes de esfuerzo de cizalla (primero a 0,1 kPa y seguidamente a 3,2 kPa). En cada ciclo el esfuerzo de cizalla dura 1 segundo, permitiendo la relajación de la muestra durante los 9 segundos siguientes. Se recogen los datos de porcentajes de deformación recuperada (elástica) y no recuperada (de fluencia) en cada ciclo y se calcula el promedio para los diez ciclos aplicados con cada nivel de esfuerzo.

Con este ensayo se evalúa la respuesta elástica del ligante y cómo varía según el nivel de esfuerzo aplicado. Asimismo, se determina el parámetro denominado *compliance no recuperable de fluencia* (Jnr), que permite valorar la susceptibilidad intrínseca del ligante a las deformaciones plásticas, siendo menor cuanto mayor es su comportamiento elástico y menor es su tendencia a la fluencia [13]. De acuerdo con la propiedad prestacional que se pretende evaluar, los ensayos se realizan en condiciones desfavorables para el ligante, es decir, a una temperatura elevada (entre 50 °C y 80 °C).

El ensayo se ha realizado a una temperatura de 50 °C. En la tabla 4 se muestran, para cada betún, los resultados obtenidos de *porcentajes medios de recuperación* a 0,1 y 3,2 kPa, la *diferencia porcentual de recuperación entre ambos niveles de esfuerzo* (R diff), la *compliance no recuperable* a 0,1 y 3,2 kPa (Jnr) y la *diferencia porcentual entre ambas compliances en fluencia no reversible* (Jnr diff).

Tabla 4. Resultados de los ensayos de fluencia-recuperación a 50 °C

Ligante	R _{0,1kPa} (%)	R _{3,2kPa} (%)	Jnr _{0,1kPa} (kPa-1)	Jnr _{3,2kPa} (kPa-1)	R diff (%)	Jnr diff (%)
B 35/50	5,81	4,80	105,36	113,45	17,37	7,67
BT 35/50	7,92	6,85	59,26	63,22	13,43	6,68
B 50/70	6,82	5,69	88,72	95,48	16,69	7,62

La figura 8 representa la evolución de cada betún en los porcentajes de deformación al aplicar los diez ciclos de

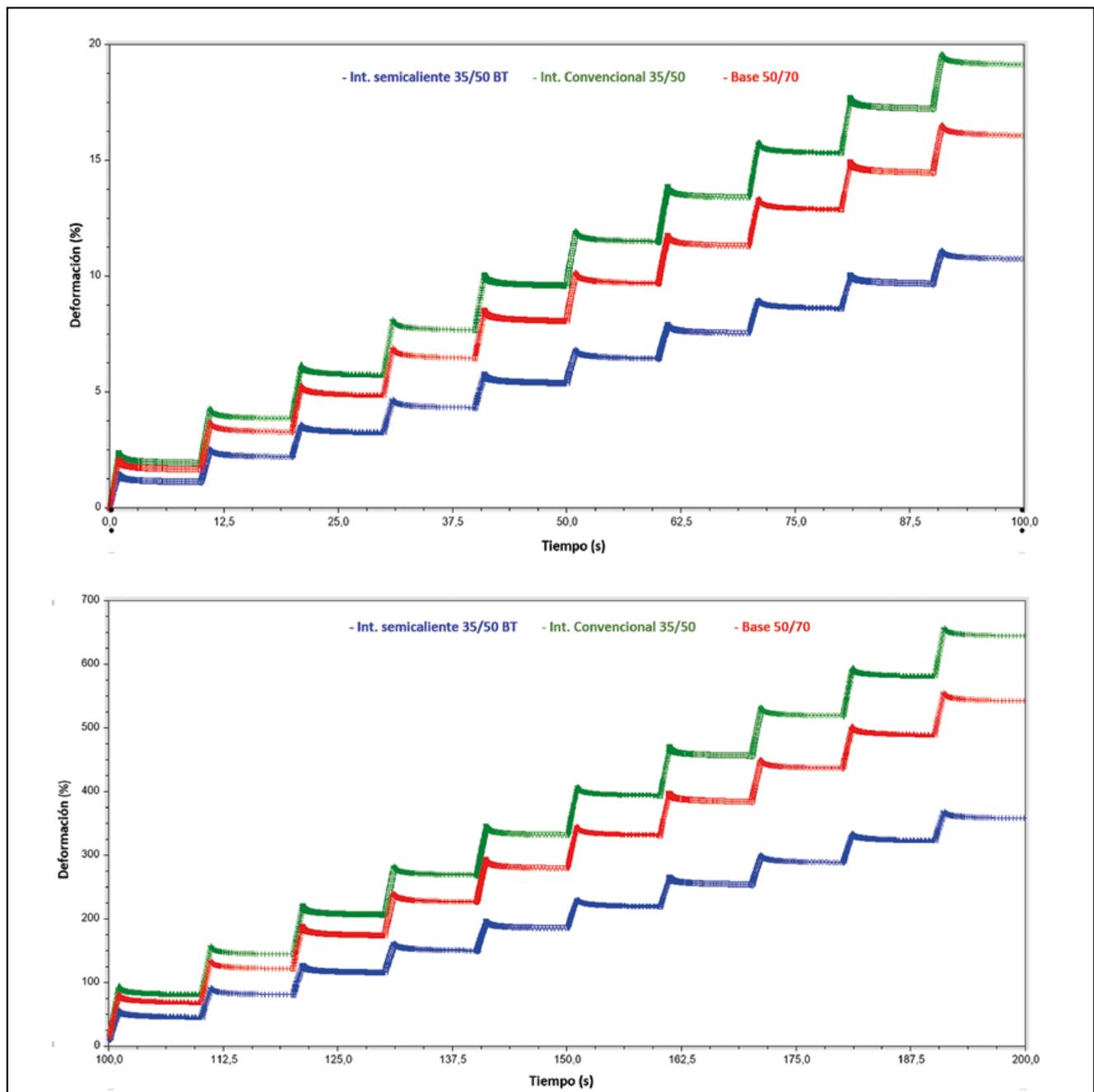


Figura 8. Ensayos de Fluencia- Recuperación a 0,1 kPa (superior) y 3,2 kPa (inferior).

esfuerzo / recuperación a 0,1 kPa (gráfico superior) y 3,2 kPa (gráfico inferior).

A la vista de los resultados, y en línea con los obtenidos en los ensayos de módulo complejo para $G^* = 50$ kPa, el betún BT35/50 presentaría el mejor comportamiento, ya que es el que mayor porcentaje de deformación recupera (comportamiento más elástico), alcanzando así un menor valor de deformación acumulada al completarse los diez ciclos. Se observa, en general, un comportamiento algo más cercano entre el betún de la capa base, B50/70, y el B35/50 sin tensoactivos, siendo este último el que peor tendencia reflejaría desde el punto de vista de las deformaciones plásticas permanentes.

El betún BT35/50 es también el que muestra una menor dependencia respecto a la intensidad del esfuerzo aplicado, proporcionando los valores más bajos de R_{diff} y $J_{nr, diff}$. Aquí también presentan mayor similitud entre sí los otros dos betunes.

4. CONCLUSIONES

Los análisis realizados sobre los betunes de las diferentes mezclas recuperados a partir de los testigos indican que las características empíricas de los tres ligantes son bastante parecidas. Básicamente, a pesar de que incorporan betún envejecido procedente del material bituminoso reutilizado, y de haber experimentado también un envejecimiento durante la fabricación y puesta en obra de las mezclas, los tres cumplen las especificaciones en cuanto a penetración retenida y aumento de la temperatura anillo y bola.

El B50/70 procedente de la capa base es el que más alteración parece presentar respecto al ligante original, dado que también incorpora mayor proporción de ligante envejecido del fresado, lo que ha aproximado sus características a las de los otros betunes usados en la capa intermedia, en principio más duros.

En el betún recuperado de la mezcla semicaliente fabricada con BT35/50, a pesar de la reducción en las temperaturas de trabajo gracias a la presencia del aditivo, se aprecia una alteración ligeramente mayor que en el recuperado de la mezcla fabricada con B35/50. La heterogeneidad asociada al fresado y la propia variabilidad del proceso de recuperación de los ligantes pueden haber sido responsables en parte de estas diferencias, dejando al margen la influencia que pueda haber tenido el tensoactivo en las propiedades del betún de la mezcla semicaliente.

En cuanto a los análisis reológicos realizados, las diversas representaciones de los datos de módulo y ángulo de fase medidos a distintas frecuencias y temperaturas (diagrama de Black, curvas maestras y curvas isócronas) también confirman la similitud entre los tres betunes recuperados, con pequeñas diferencias. En el ligante de la mezcla semicaliente no se aprecia que el tensoactivo empleado haya producido cambios especialmente significativos en su comportamiento reológico respecto a los otros dos betunes no aditivados.

Las curvas maestras (isotermas a 20 °C) indican que el betún con mayor módulo G^* y mayor carácter elástico (menor ángulo de fase) para todas las frecuencias de ensayo es el BT35/50, siendo el B35/50 el que presenta menor módulo y mayor carácter viscoso (mayor ángulo de fase).

Los ensayos empíricos de los betunes muestran tendencias acordes con estas características.

Las curvas isócronas a 1,59 Hz muestran que este mismo comportamiento de los ligantes se mantiene también en todo el intervalo de temperaturas de ensayo. La mayor temperatura para el fallo por deformaciones plásticas (valor crítico de $G^* = 50$ kPa) la ha dado el BT35/50 y la menor el B35/50, con ángulos de fase idénticos en los tres betunes. Para el fallo por fatiga (valor crítico de $G^* = 5$ MPa), la menor temperatura y el menor ángulo de fase se han obtenido con el B35/50 y los mayores valores con el BT35/50. Por tanto, el ligante recuperado que presenta a priori mejores características frente a las deformaciones plásticas es el BT35/50 y el menos adecuado el B35/50; con respecto al fallo por fatiga sucedería al contrario.

Respecto a los ensayos de fluencia-recuperación (MSCR) a 50 °C, el ligante obtenido de la mezcla semicaliente (BT 35/50) es, de nuevo, el que presentaría mejores propiedades frente a las deformaciones plásticas ya que, gracias a su mayor elasticidad, es capaz de recuperar un mayor porcentaje de deformación para los dos niveles de esfuerzo ensayados; también el que menos dependencia muestra frente a la intensidad del esfuerzo. Asimismo, el B35/50 vuelve a ser el de peor comportamiento según este ensayo. En cuanto al B50/70, sus propiedades se asemejan más al BT35/50 que al B35/50.

Por lo tanto, a la vista de todos los resultados obtenidos en los ensayos realizados, el ligante utilizado para la mezcla semicaliente, BT 35/50, en el que se ha adicionado un agente tensoactivo para bajar la temperatura de fabricación, presentaría en principio unas características algo más favorables que el betún convencional sin aditivar, B 35/50 respecto a la resistencia a las deformaciones plásticas, y menos favorables frente al comportamiento a fatiga.

En cualquier caso, debe tenerse en cuenta respecto al ligante aditivado, que el proceso de recuperación también ha podido influir en las características del material obtenido y analizado posteriormente, dado que dicho proceso resultó bastante más prolongado que con los otros dos ligantes convencionales. Por ello, también debe profundizarse, mediante más experimentación, y comprobar si el método actualmente empleado para recuperar los ligantes de las mezclas para su ensayo sigue siendo suficientemente fiable en los casos en que se incorporen estos nuevos tipos de aditivos, sin que se alteren de forma excesiva las características del ligante respecto a las que presenta en la mezcla.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su gratitud a la Dirección General de Carreteras del MITMA, a su Demarcación de Carreteras en Castilla y León Occidental y a la empresa HERGON S.A.U., por las facilidades dadas para la realización del trabajo descrito en este artículo, así como a J. Cirugeda, O. Leonis, E. Marull y E. Sosa por su colaboración en la realización de los ensayos.

6. REFERENCIAS

[1] Norma UNE-EN 1426:2015 (versión corregida en 2016). Betunes y ligantes bituminosos. Determinación de la penetración con aguja. Madrid: AENOR.

[2] Norma UNE-EN 1427:2015. Betunes y ligantes bituminosos. Determinación del punto de reblandecimiento. Método del anillo y bola. Madrid: AENOR.

[3] Norma UNE-EN 12593:2015. Betunes y ligantes bituminosos. Determinación del punto de fragilidad Fraass. Madrid: AENOR.

[4] Norma UNE-EN 12697-1:2013. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayos para mezclas bituminosas en caliente. Parte 1: Contenido de ligante soluble. Madrid: AENOR.

[5] Norma UNE-EN 12697-3:2013+A1:2020. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo. Parte 3: Recuperación de betún. Evaporador rotatorio. Madrid: AENOR.

[6] Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). Artículo 211. Betunes asfálticos (última revisión publicada en Orden FOM 2523/2014). Madrid: Ministerio de Fomento.

[7] Norma UNE-EN 14770:2012. Betunes y ligantes bituminosos. Determinación del módulo complejo de corte y del ángulo de fase usando un reómetro de corte dinámico [Dynamic Shear Rheometer (DSR)]. Madrid: AENOR.

[8] Sol-Sánchez, M., Jiménez del Barco Carrión, A., Hidalgo-Arroyo, A., Moreno-Navarro, F., Saiz, L., y Rubio-Gámez, M.C. (2020). Viability of producing sustainable asphalt mixtures with crumb rubber bitumen at reduced temperatures. *Construction and Building Materials*, 265(1): 120154. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120154>

[9] Yu, J., Guo, Y., Peng, L., F. Guo, F., y Yu, H. (2020). Rejuvenating effect of soft bitumen, liquid surfactant, and bio-rejuvenator on artificial aged asphalt. *Construction and Building Materials*, Vol. 254, pp. 119336. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119336>

[10] Airey, G.D. (2003). Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens. *Fuel*, 82(14): pp. 1709–1719. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00146-7](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00146-7)

[11] Barceló Martínez, F., Pereira Mozota, C., González González, M., y Pérez Mena, V. (2018). Reología de los ligantes españoles en el contexto del anexo informativo de la nueva EN 12591 (2015). Comunicación presentada en la *XIII Jornada Nacional ASEFMA, Madrid, 2018*.

[12] Norma UNE-EN 16659:2016. Betunes y ligantes bituminosos. Ensayos de la fluencia-recuperación bajo múltiples esfuerzos repetidos (ensayo MSCR). Madrid: AENOR.

[13] Liu, H., Zeiada, W., Al-Khateeb, G.G., Shanableh, A., y Samarai, M. Use of the multiple stress creep recovery (MSCR) test to characterize the rutting potential of asphalt binders: A literature review. *Construction and Building Materials*, Vol. 269, p. 121320, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121320>