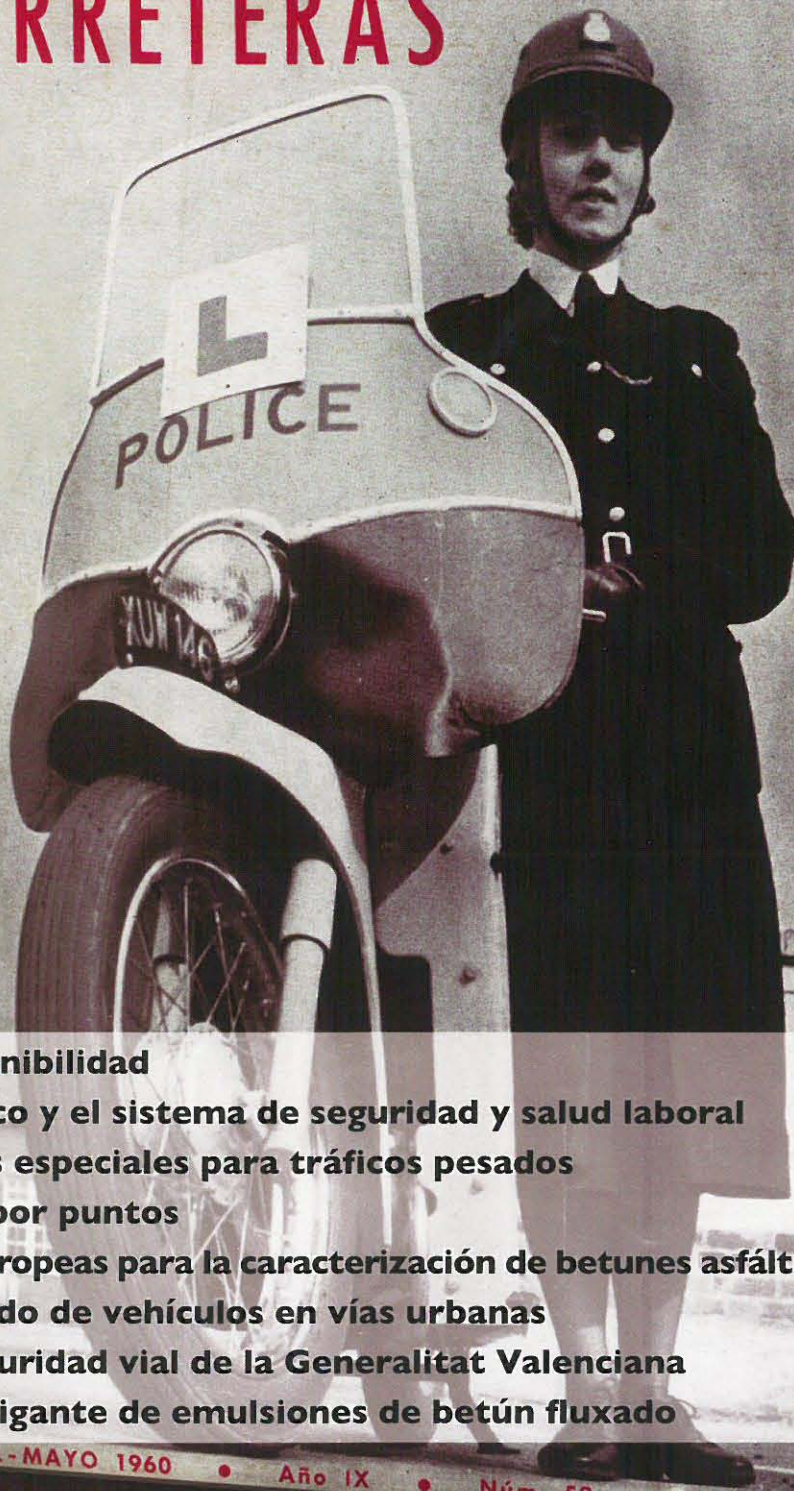


# CARRETERAS



4ª ÉPOCA - NÚM. 152 - MARZO/ABRIL 2007 - REVISTA TÉCNICA DE LA ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE LA CARRETERA

## CARRETERAS



### SUMARIO

*Carreteras dobles, por* Lambert de los Santos Ja-  
lón -- *Países pintorescos:*  
*Besarabia tierra del dolor,*  
*por José Sanz y Díaz --*  
*Ha sido nombrada la* Co-  
*misión Organizadora del*  
*Cuarto Congreso Interna-*  
*cional de Carreteras --*  
*Carreteras de ensayo, por*  
*Olegario Ilamázares Gó-*  
*mez -- Las carreteras in-*  
*ternacionales italianas, por*  
*José Olmo Losada --* Me-  
*morias relativas al Curso*  
*1958-1959 de 'Estudios*  
*sobre Carreteras' --* Mi-  
*llonarios de la Carretera*  
*-- El Rastro automoni-*  
*ástico, por Hineslian Se-*  
*trano, etc., etc.*

PORTADA DE ABRIL - MAYO 1960

**Carreteras y sostenibilidad**

**El promotor público y el sistema de seguridad y salud laboral**

**Firmes y secciones especiales para tráficos pesados**

**Efecto del carnet por puntos**

**Especificaciones europeas para la caracterización de betunes asfálticos**

**Tiempo de recorrido de vehículos en vías urbanas**

**Plan Global de seguridad vial de la Generalitat Valenciana**

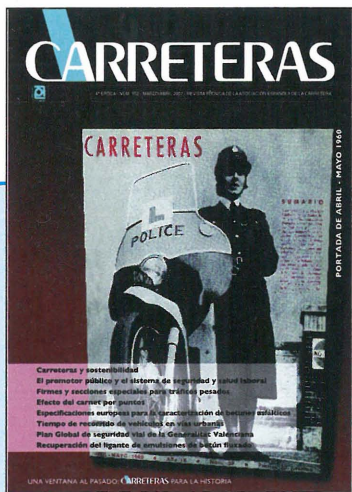
**Recuperación del ligante de emulsiones de betún fluxado**

ABRIL - MAYO 1960

• Año IX

• Núm. 52

• Precio: 20 pesetas



Serie temática 2007:

**UNA VENTANA AL PASADO:  
CARRETERAS PARA LA HISTORIA**

Portada del nº 52 de la revista Carreteras, publicada en abril-mayo de 1960.

**CONSEJO DE REDACCIÓN:**

**Presidente:**

Julio González de Pedroviejo

**Vocales:**

Mercedes Aviñó Bolinches  
Luis Ayuso Sánchez  
Alberto Bardesi Orúe-Echevarría  
Carlos Cristóbal Pinto  
Sebastián de la Rica Castedo  
Federico Fernández Alonso  
José Antonio Hinojosa Cabrera  
Jesús M<sup>a</sup> Leal Bermejo  
José Vicente Martínez Sierra  
Pablo Nobell Rodríguez  
José María Pardillo Mayora  
José Quereda Laviña  
Rodolfo Sáenz de Ugarte Corres  
Liberto Serret Izquierdo  
Luis Alberto Solís Villa  
José Antonio Soto Sánchez  
Ramón Tomás Raz

**PRÉSIDENTE:**

Miguel M<sup>a</sup> Muñoz Medina

**DIRECTOR:**

Jacobo Díaz Pineda

**DIRECTORA EJECUTIVA:**

Marta Rodrigo Pérez

**DIRECTOR TÉCNICO:**

Recaredo Romero Amich

**REDACTORA JEFE:**

Susana Rubio Gutiérrez

**REDACCIÓN:**

Iván Corzo Reina

**DISEÑO Y MAQUETACIÓN:**

Jose María Gil • Cristina López  
Édume Amendariz • Ramón Araujo

**EDICIÓN Y PUBLICIDAD:  
COMUNICACIÓN Y DISEÑO**

O'Donnell, 18 - 5<sup>o</sup> H  
28009 Madrid  
☎ 91 432 43 18 Fax: 91 432 43 19  
e-mail: comdis@cydiseno.com

**ASOCIACIÓN ESPAÑOLA  
DE LA CARRETERA**

Goya, 23 - 3<sup>o</sup> y 4<sup>o</sup> Derecha  
28001 MADRID  
☎ 91 577 99 72 Fax: 91 576 65 22  
e-mail: aec@aecarretera.com  
http://www.aecarretera.com

**SUSCRIPCIÓN ANUAL (Año 2007):**

España: 61 Euros (IVA incluido)  
Europa: 101 Euros • América: 145 \$ / 109 Euros

IMPRIME: Gráficas Marte  
Depósito Legal: M- 19.439-1975  
ISSN: 0212 - 6389

Las opiniones vertidas en las páginas de Carreteras no coinciden necesariamente con las de la Asociación Española de la Carretera o las del Consejo de Redacción de la publicación.

**Editorial**

Consistencia de trazado 4

**Artículos Técnicos**

Carreteras y sostenibilidad 6  
Jorge Ortiz Ripoll  
Julio del Cerro Iglesias  
Cristina Moncunill Farré

¿Es clave el promotor público para la eficacia del sistema de seguridad y salud laboral? 22  
Rafael Castañeda García

Comportamiento de firmes y secciones especiales para tráfico pesados 43  
Felix Edmundo Pérez Jiménez

El análisis del efecto del carnet por puntos 55  
Aniceto Zaragoza Ramírez  
Elena de la Peña González

Nuevas especificaciones europeas para la caracterización de betunes asfálticos frente a las deformaciones plásticas 62  
Miguel Ángel Franesqui García  
Felice Giuliani

Análisis del tiempo de recorrido de vehículos en vías urbanas 75  
Ángel Vega Zamanillo  
José Luis Moura Berodía  
Elena Castro Toca

Primer Plan Global de Seguridad Vial de la Generalitat Valenciana 86  
Enrique Casquero de la Cruz  
Rosa M<sup>a</sup> Rodríguez Moya

Evaluación de distintos métodos de recuperación del ligante de una emulsión de betún fluxado 98  
Carole Gueit  
Michel Robert  
Graziella Durand

**Tribuna**

I Congreso Paisaje e Infraestructura 109  
Florencio Zoido Naranjo

Jornada Técnica La Seguridad Vial en Conservación: Accidentalidad con Animales 111  
José Antonio Fernández Sáinz

**Área de Servicio 113**

**Desde el Arcén**

Crónicas viarias postmodernas. La seguridad pasiva de las rotondas 125  
Luis M. Xumini

**Guía profesional de empresas colaboradoras 131**

**EMPRESAS COLABORADORAS**

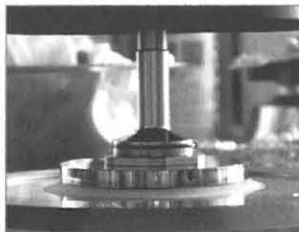


Miguel Ángel FRANESQUI GARCÍA

Ingeniero de Caminos,  
Canales y Puertos  
Profesor del Departamento de  
Ingeniería Civil. Universidad  
de Las Palmas de Gran Canaria

Felice GIULIANI

Prof. Ing., Dipartimento di  
Ingegneria Civile, dell'Ambiente,  
del Territorio e Architettura.  
Università degli Studi di Parma (Italia).



# Nuevas especificaciones europeas para la caracterización de betunes asfálticos frente a las deformaciones plásticas

*New European specifications for characterising asphalt bitumens in relation to plastic deformation*

## RESUMEN

Se presenta un estudio de investigación para comprobar de forma experimental la aplicación del concepto "Temperatura de equiviscosidad" (EVT), relativa a un determinado valor de "Viscosidad de corte a baja velocidad de deformación" (LSV), como parámetro especificador de la temperatura máxima de servicio frente a las deformaciones permanentes de betunes asfálticos. Se analizan los nuevos métodos de caracterización funcional mediante ensayos dinámicos oscilatorios a bajas frecuencias, que se pretenden implementar próximamente en la normativa europea, en betunes con diferentes grados de modificación, originales y envejecidos, comparando los resultados obtenidos con el método de caracterización y especificaciones SHRP-Superpave.

De los resultados obtenidos se puede afirmar que en el criterio de especificación propuesto se aprecia mejor la diferencia de prestaciones entre los betunes naturales y los modificados, resultando especialmente indicado para caracterizar éstos últimos.

**Palabras clave:** Caracterización de betunes, Normalización y especificaciones funcionales, Temperatura de Equiviscosidad (EVT), Viscosidad de corte a baja velocidad de deformación (LSV), Deformaciones plásticas.

## ABSTRACT

An experimental research study to verify the application of the "Equiviscous Temperature" (EVT) concept, related to a defined "Low Shear Viscosity" (LSV), as an indicator for the rutting susceptibility of bitumen is presented in this paper. New paving performance-related characterisation methodologies using dynamic shear tests in low frequency oscillation mode, as expected in future European Standards, are analysed in natural and Polymer-modified Bitumens (with different modification levels), unaged and short-term aged, comparing the results with the specification and characterisation SHRP-Superpave system.

The results show that performance differences between pure and modified bitumens are better taken into account with the new proposed specification criterion, specially suitable for PmBs.

**Keywords:** Bitumen characterisation, Standardisation and performance-related specifications, Equiviscous Temperature (EVT), Low Shear Viscosity (LSV), Rutting.



Los ligantes bituminosos son materiales viscoelásticos que presentan un comportamiento reológico muy complejo. Al someterlos a la acción de una fuerza la respuesta del material tiene dos componentes: una *elástica*, instantánea, en la que el material se deforma almacenando la energía de deformación y recuperando su forma inicial al retirar la carga, y una componente *viscosa* donde la energía aplicada es disipada en forma de calor y en la que el material fluye lentamente con deformaciones en su mayor parte irreversibles. Además, esta respuesta reológica depende de la temperatura y del tiempo de aplicación de las cargas (o frecuencia, en régimen oscilatorio de sollicitación) y, a su vez, la dependencia respecto de estas dos variables puede relacionarse entre sí debido al principio de superposición frecuencia-temperatura. Por tanto, para caracterizar un betún a una temperatura y un tiempo de carga determinados, se deben especificar al menos dos propiedades: la resistencia del material a la deformación y su distribución entre sus componentes elástica y viscosa.

El programa norteamericano SHRP ("Strategic Highway Research Program") de investigación en carreteras (1987-1993) proporcionó los nuevos métodos de caracterización, especificación, ensayo y dosificación SUPERPAVE ("Superior Performing Asphalt Pavements") basados en la idea de especificar y seleccionar los ligantes bituminosos, para un determinado uso, a través de sus propiedades físicas y reológicas fundamentales relacionadas con el comportamiento funcional o en servicio de las mezclas fabricadas con éstos, y no mediante las propiedades empíricas tradicionales.

A raíz de estas investigaciones, la forma experimental más extendida de caracterizar este comportamiento es a través de ensayos dinámicos de oscilación mediante el *Reómetro de Corte Dinámico (DSR)*, especialmente para temperaturas de servicio intermedias y altas (5-85 °C), en los que se determina el *módulo complejo G\**, que representa la rigidez del material, y un *ángulo de fase δ* indicador del retardo o desfase de la deformación con relación a la tensión aplicada, y que también está relacionado con la proporción entre las componentes elástica y viscosa (indicador relativo de las deformaciones recuperables y no recuperables):

$$G^* = \frac{\tau^*(t)}{\gamma^*(t)} = \frac{\tau_0}{\gamma_0} e^{i(\omega t + \delta)} - i\omega t = |G^*| e^{i\delta} = |G^*| \cos \delta + i |G^*| \sin \delta = G' + iG''; \quad (i^2 = -1) \quad [1]$$

donde:

$G^*$ : módulo complejo de rigidez a cortante, expresado en (Pa);

$\tau^*$ : tensión de corte o tangencial (función armónica sinusoidal del tiempo), expresada en (Pa);

$\gamma^*$ : deformación de corte o tangencial (función armónica sinusoidal del tiempo);

$|G^*| = \tau_0/\gamma_0$ : módulo del vector  $G^*$ ; relación entre la amplitud de la tensión y la amplitud de la deformación (de las funciones armónicas sinusoidales);

$\delta$ : ángulo de fase del módulo complejo de rigidez a cortante; desfase entre la tensión y la deformación tangencial en modo oscilatorio sinusoidal;

$G'$ : parte real del módulo complejo de rigidez a cortante, o *módulo elástico (o conservativo)*; esta componente elástica está en fase ( $\delta=0^\circ$ );

$G''$ : parte imaginaria del módulo complejo de rigidez a cortante, o *módulo viscoso (o disipativo)*; esta componente viscosa tiene un ángulo de fase  $\delta=90^\circ$ .

Al aumentar la temperatura o disminuir la frecuencia,  $G^*$  disminuye de forma continua y aumenta  $\delta$ . A muy altas temperaturas (por encima de 85-90 °C)  $\delta$  tiende a  $90^\circ$  para la mayoría de los betunes, lo que representa el comportamiento completamente viscoso del material, el cual generalmente comienza a manifestarse ya a temperaturas superiores a 40-45 °C, pero los valores de  $G^*$  varían para cada betún (diferente consistencia). A estas temperaturas el comportamiento de los betunes también puede ser caracterizado mediante su viscosidad compleja, que a su vez está relacionada con el módulo complejo:

$$\eta^* = \frac{\tau^*}{\dot{\gamma}^*} = \frac{G^*}{i\omega} = \frac{G''}{\omega} - i \frac{G'}{\omega} = \eta' - i\eta''; \quad (i^2 = -1) \quad [2]$$

donde:

$\eta^*$ : viscosidad compleja, expresada en (Pa.s);

$\dot{\gamma}^* = d\gamma^*/dt$ : velocidad de deformación angular (función armónica sinusoidal del tiempo), expresada en (1/s);

$\eta'$ : parte real de la viscosidad compleja (*viscosidad dinámica*);

$\eta''$ : parte imaginaria de la viscosidad compleja;

$\omega$ : frecuencia angular, expresada en (rad/s).

Hay que hacer notar que cuando  $\omega \rightarrow 0$ ,  $\delta \approx 90^\circ$ . En estas condiciones  $\eta'' \approx 0$ , por lo que:

$$\eta = |\eta^*| = \frac{|G^*|}{\omega} \approx \eta' = \frac{G''}{\omega} \quad [3]$$

A temperaturas elevadas (entre 45 y 85 °C), debido al comportamiento viscoso del betún, el principal problema de las mezclas bituminosas son las deformaciones plásticas (formación de roderas) causadas por acumulación de deformaciones permanentes y disipación de parte del trabajo producido sobre el pavimento por las cargas cíclicas de tráfico. Dado que la energía disipada por un material viscoelástico, en fenómenos repetitivos de esfuerzo controlado, es inversamente proporcional a  $(|G^*|/\sin \delta)$ , precisamente éste es el parámetro que utilizan las especificaciones SHRP (definido como *Factor de roderas*) para caracterizar la temperatura máxima de servicio de un betún. En estas especificaciones se ordenan los betunes en función de sus temperaturas máximas y mínimas de uso, denominándose por su "Performance Grade"<sup>(1)</sup> ( $PG T_{máx}-T_{mín}$ ).

El problema principal del uso del *factor de roderas* SHRP ( $|G^*|/\sin \delta$ ) como parámetro especificador de la temperatura límite de servicio es que no caracteriza necesariamente de forma correcta a determinados betunes, especialmente los modificados, según han puesto de manifiesto diversos estudios y publicaciones<sup>(2,3)</sup>. En primer lugar, hay que tener en cuenta que el desarrollo de las especificaciones SHRP-Superpave se realizó con betunes no modificados. Posteriormente se ha visto que el parámetro  $(|G^*|/\sin \delta)$  presenta poca sensibilidad a las variaciones en el ángulo de fase ( $\delta$ ), lo que implica la posibilidad de que se clasifiquen en un mismo PG betunes que presenten comportamientos muy diferentes ante las deformaciones permanentes, e incluso no identifica la influencia de la naturaleza del modificador (elastómero o plastómero) en la capacidad elástica del betún modificado resultante<sup>(3)</sup>.

La necesidad de conseguir un parámetro que clasifique adecuadamente según su comportamiento a todos los tipos de betunes, ya sean vírgenes o modificados, y que las exigencias a los valores de sus propiedades físicas y reológicas sean las mismas (variando únicamente las temperaturas a las cuales se consiguen), se ha traducido en multitud de investigaciones tratando de establecer nuevos parámetros de caracterización a altas temperaturas. Algunas de ellas han propuesto la modificación del factor de roderas a una función más sensible al ángulo de fase<sup>(2)</sup>.

Desde la publicación de la metodología y resultados del SHRP, en Europa se han realizado importantes esfuerzos de investigación para valorar la eficacia de sus métodos y comprobar la aplicación de éstos y otros ensayos reológicos, a todo tipo de ligantes y mezclas europeas. El parámetro de especificación relacionado con la susceptibilidad a las deformaciones permanentes que se ha venido estudiando es la *Viscosidad de corte cero* ("Zero Shear Viscosity", ZSV)<sup>(4,5,6)</sup>, determinada bien mediante *ensayo oscilatorio a muy baja frecuencia* (velocidades de deformación próximas a cero), o bien mediante *ensayo repetido de fluencia* ("Repeated Creep Test") en el que se determina la ZSV como la viscosidad en estado permanente a baja tensión cortante, aunque este último tipo de ensayo requiere largos tiempos de análisis y más elevados costes operativos.

La viscosidad dinámica de un betún no es constante, sino que depende del nivel de tensión cortante o de la velocidad de deformación, al tratarse de un material no-newtoniano, con un comportamiento llamado *pseudo-plástico* caracterizado por una disminución de la viscosidad al aumentar la tensión de corte ( $\tau$ ) o la velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ ). Su valor máximo es la *Viscosidad de corte cero* (ZSV ó  $\eta_0$ ), que resulta ser una propiedad intrínseca del material, y el mínimo la *Viscosidad límite* ( $\eta_\infty$ ), a valores infinitamente elevados del esfuerzo o velocidad de deformación de corte. La viscosidad dinámica entre los dos valores límite anteriores se denomina *Viscosidad aparente* ( $\eta$ ), porque depende de las condiciones de sollicitación (Figura 1).

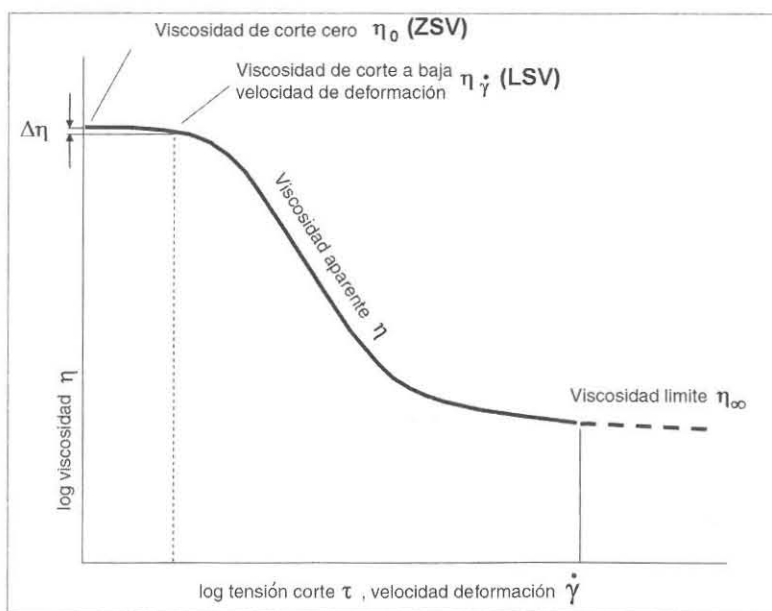


Figura 1. Variación de la viscosidad dinámica en un material no-newtoniano con comportamiento pseudo-plástico, y definiciones de la ZSV, LSV, viscosidad aparente y viscosidad límite.



Se llama *Viscosidad de corte a baja velocidad de deformación* ("Low Shear Viscosity", LSV ó  $\eta_{\dot{\gamma}}$ ) a la viscosidad dinámica a muy baja (aproximándose a cero) tensión de corte o velocidad de deformación de corte. Este concepto se introduce porque puede ser determinada directamente a partir del módulo complejo obtenido en ensayo DSR en modo oscilatorio a muy bajas frecuencias ( $\omega \rightarrow 0$ ), combinadas con bajas amplitudes de deformación (ver ecuación 3). A velocidades de corte tan bajas la viscosidad se hace constante porque la energía se va disipando entre cada una de las capas paralelas a dicho flujo, sin afectar a la estructura del material.

Como se puede observar en la Figura 1, la LSV es menor que la ZSV. Cuanto menores sean la tensión o la velocidad de deformación cortantes a las cuales se mide la LSV, más se aproximará su valor a la ZSV.

$$\eta_0 = \eta_{\dot{\gamma}} + \Delta\eta \quad [4]$$

El objetivo principal de esta investigación ha sido la comprobación experimental de los nuevos métodos dinámicos de caracterización de betunes en fase de estudio actualmente en Europa (y que formarán parte de las especificaciones de las futuras normas europeas) y su aplicación a betunes naturales y modificados, determinando la máxima temperatura de servicio de un betún relacionada con la LSV, como indicador de su susceptibilidad a las deformaciones permanentes.

## EL PROYECTO EUROPEO DE NUEVAS ESPECIFICACIONES Y NORMALIZACIÓN DE LIGANTES BITUMINOSOS

Desde el año 2002 se vienen desarrollando en Europa importantes esfuerzos de investigación para la normalización y preparación de un adecuado sistema de especificaciones, basadas en su *comportamiento en servicio*, para ligantes bituminosos usados en pavimentación viaria. El "European Binder Specification Project" (BiTSpec Project) ha reunido a los principales agentes y organizaciones representativos del sector, como fabricantes y productores de betunes y productos asfálticos, administraciones viarias y laboratorios de investigación europeos, participando 875 entidades de 27 países. El *Comité Técnico de los ligantes bituminosos* (CEN/TC 336, grupo de trabajo WG1) ha venido preparando, y continua trabajando, en la elaboración de un sistema de especificaciones funcionales para betunes ("Specification Framework") que se espera que pueda comenzar a ser implementado en 2007/08.

En la actualidad también se trabaja en la elaboración de un proyecto de norma europea (prEN 15325<sup>(7)</sup>) que establecerá la metodología y ensayos para la caracterización de los ligantes bituminosos frente a las deformaciones plásticas mediante la *Temperatura de equiviscosidad* (EVT) basada en la LSV obtenida en *ensayo DSR en modo oscilatorio a baja frecuencia*.

El proceso de normalización comprende las siguientes fases:

- en primer lugar, identificar las propiedades de todos los ligantes bituminosos relacionadas con el comportamiento de las mezclas asfálticas en los firmes;
- en segundo lugar, seleccionar y normalizar los nuevos métodos de ensayo para medir dichas propiedades;
- a continuación validar, mediante suficientes experiencias, las nuevas especificaciones, y,
- por último, revisar el sistema de clasificación actual de betunes según esas nuevas especificaciones.

Con relación a los primeros puntos, es preciso mencionar que ya se han estandarizado determinados ensayos:

- el DSR para la determinación de las propiedades a temperaturas intermedias y altas;
- el BBR ("Bending Beam Rheometer"), para las propiedades a bajas temperaturas;
- el RTFOT ("Rolling Thin Film Oven Test"), que simula el envejecimiento producido por endurecimiento y fragilización oxidativos al calentar el ligante para la fabricación de la mezcla; y
- el PAV ("Pressure Ageing Vessel"), para simular de forma acelerada en las muestras de betún el envejecimiento a largo plazo.

Sin embargo, recientemente, la cohesión, la adhesión y la fatiga han sido identificadas como propiedades para las cuales se precisa más investigación y mejorar sus métodos de ensayo.

En todos los casos, parece necesario que este proceso de normalización pase por un proceso intermedio de *transición* ("Transition Framework") durante el cual convivan las especificaciones mediante las *propiedades empíricas tradicionales* con el nuevo sistema de especificaciones *basado en propiedades* relacionadas con su

PARTE 1: PROPIEDADES EMPÍRICAS TRADICIONALES (A NIVEL INFORMATIVO) <sup>(1)</sup>				
Propiedades del betún	Norma europea de referencia	Valores de referencia	Valores declarados por el fabricante	
Penetración a 25 °C [0,1 mm]	EN 1426	70-100	65-90	
Punto de reblandecimiento anillo y bola [°C]	EN 1427	43	70-75	
Punto de fragilidad Fraass [°C]	EN 12593	-10	-15	
Recuperación elástica a 25 °C [%]				
Resistencia al endurecimiento	EN 12607-1			
Variación de masa [% en peso]	EN 12607-1	0.8	0.5	
Penetración mantenida a 25 °C [%]	EN 1426	46	54	
Incremento del punto de reblandecimiento anillo y bola [°C]	EN 1427	+9 a +11	+10	
Punto de inflamación [°C]	EN 22719			
Densidad a XX °C [g/cm <sup>3</sup> ]	EN ISO 3838			
Solubilidad [%]	EN 12592			
PARTE 2: CARACTERIZACIÓN MEDIANTE PROPIEDADES RELACIONADAS CON SU COMPORTAMIENTO <sup>(1)</sup>				
Propiedades del betún	Norma europea de referencia	Betún original (no envejecido)	Betún envejecido a corto plazo <sup>(2)</sup>	Betún envejecido a largo plazo <sup>(2)</sup>
<b>Propiedades a elevadas temperaturas de servicio:</b>				
Punto de reblandecimiento [°C]	EN 1427	72	80	-
G* a 60 °C y 1,59 Hz [kPa]	prEN	-	X	-
ZSV (en ensayo DSR o de fluencia) a 60 °C [kPa.s]	prEN	-	-	-
Viscosidad dinámica a 60 °C [Pa.s]	prEN	-	Y	-
Viscosidad capilar por vacío a 60 °C [Pa.s]	EN 12596	-	-	-
<b>Propiedades a bajas temperaturas de servicio:</b>				
Punto de fragilidad Fraass [°C]	EN 12593	-	-12	-
Temperatura para (S<300MPa, m>0,3) en ensayo BBR [°C]	prEN	-	-	-18
Temperatura para (ε <sub>rotura</sub> >1% a 1mm/min) en ensayo DTT [°C]	prEN	-	-	-18
<b>Propiedades relacionadas con la resistencia estructural:</b>				
G* a 15 °C y 10 Hz [MPa]				
G* a 25 °C y 10 Hz [MPa]				
Ensayo de tracción (a XX °C):	EN 13589			
Energía total, o energía para un desplazamiento dado [J]		X	X	-
Carga máxima [N]		Y	Y	-
Deformación bajo carga máxima [%]		Z	Z	-

(1) Podrían ser añadidas algunas otras propiedades.

(2) El método de envejecimiento a corto plazo y/o a largo plazo debe ser especificado por el fabricante.

Tabla 1. Ejemplo de sistema de transición propuesto sobre especificaciones para betunes relacionadas con su comportamiento ("Transition Framework")<sup>(3)</sup>.

comportamiento mecánico y reológico, como así ha sugerido el mencionado Comité Técnico CEN/TC 336 WG1 (TG5). Esto permitiría recoger experiencia suficiente y disponer de datos con los nuevos métodos de ensayo. Un posible ejemplo de sistema de transición propuesto sobre especificaciones para betunes es el que se representa en la Tabla 1.

Existen algunos otros aspectos no resueltos, como por ejemplo si las anteriores propiedades propuestas son suficientes para garantizar la constancia de calidad y nivel de comportamiento de los betunes modificados con polímeros (PmB); que ciertos ensayos empíricos se han demostrado inadecuados para éstos (Fraass, Anillo & Bola) por lo que no deberían mantener-

se demasiado tiempo entre sus especificaciones; y que no todos los métodos de especificación a altas temperaturas de servicio (ej. SHRP "Performance Grade") guardan una perfecta correlación con el comportamiento frente a deformaciones plásticas, especialmente en el caso de betunes modificados, como ya se ha puesto de manifiesto anteriormente. Además, se ha propuesto expresar el concepto de ZSV como una temperatura de igual viscosidad y no como un valor de viscosidad a una temperatura establecida, tal como figura en la Tabla 1 (aspecto que se analiza experimentalmente en este artículo).

Comprobar la adecuación de las propiedades anteriores para caracterizar el comportamiento de los betunes modificados con polímeros ha sido el objetivo fundamental de esta investigación cuya metodología y resultados se describen en los apartados siguientes.

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La Temperatura de Equiviscosidad ("EquiViscous Temperature", EVT) relacionada con una determinada LSV, o temperatura a la cual un betún o ligante bituminoso presenta un valor definido de la viscosidad de corte a baja velocidad de deformación (LSV) para un valor fijado de tensión o velocidad de deformación de corte, es un indicador de su susceptibilidad a las deformaciones plásticas (formación de roderas). Así, está relacionada con el comportamiento de las mezclas asfálticas a elevadas temperaturas del firme y la contribución parcial del ligante a este fenómeno. De esta manera, la EVT puede ser un parámetro utilizado para comparar o clasificar a diferentes ligantes frente a las roderas (ya sean vírgenes o modificados, originales o envejecidos, o incluso reciclados) siempre que se base en el mismo valor de LSV y sea medida en condiciones de igual tensión cortante o velocidad de deformación.

Nomenclatura utilizada para los betunes ensayados	B 50/70 Virgen		PmB (3,5% SBS)		PmB (6% SBS)	
Tipología	Natural virgen		Ligeramente modificado		Altamente modificado	
Porcentaje de modificación y tipo de polímero	0%		3,5% polímero SBS		6,0% polímero SBS	
	Original	Envejecido en RTFOT	Original	Envejecido en RTFOT	Original	Envejecido en RTFOT
Penetración a 25 °C [0,1 mm]	52	33	56	42	55	41
Punto de reblandecimiento anillo y bola [°C]	49,5	56	57,5	60	93,5	86,5
Índice de penetración	-1,2	-	0,8	-	6,2	-
Punto de fragilidad Fraass [°C]	-4	-	-11	-	-13	-
Punto de inflamación [°C]	310	-	330	-	340	-
Viscosidad 160°C [Poise]	1,1	-	3,0	-	7,1	-
Viscosidad a 60°C [Poise]	2570	-	-	-	-	-
Ductilidad [cm]	-	-	>100	-	>100	-
Recuperación elástica [%]	-	-	75	-	92	-

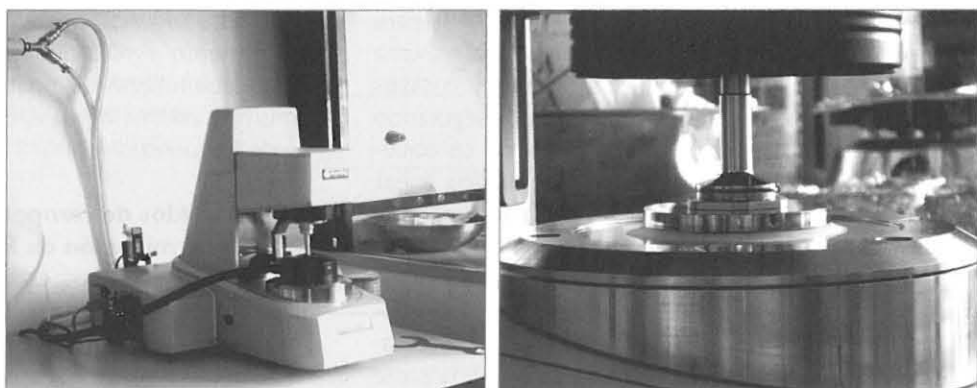
**Tabla 2.** Propiedades empíricas fundamentales de los betunes sometidos a ensayo (en su estado original y de su residuo de Rolling).

Para betunes altamente modificados es más apropiado hablar en términos de LSV que de ZSV porque la extrapolación de los valores de viscosidad a frecuencias casi cero puede producir errores importantes, ya que la viscosidad compleja cambia muy rápidamente en ese rango de bajas frecuencias. Tampoco es posible, en determinados casos, probar la existencia de la ZSV en betunes con muy elevadas proporciones de polímeros (betunes muy duros) o de caucho (superiores al 20%)<sup>(9)</sup>.

En este estudio se ha pretendido comprobar de forma experimental la aplicación del concepto EVT, relativo a un determinado valor de LSV, como parámetro especificador de la temperatura máxima de servicio frente a las deformaciones permanentes de betunes vírgenes y modificados, y tanto en estado original como previamente envejecidos mediante RTFOT. De esta manera se intenta comprobar la validez de las nuevas metodologías de caracterización funcional mediante ensayos dinámicos en modo oscilatorio, que se pretenden implementar próximamente en la normativa europea, en betunes asfálticos con diferentes grados de modificación y comparar los resultados obtenidos

con el método de caracterización y especificaciones SHRP-Superpave.

Se han tomado muestras de tres tipos de betunes comerciales de penetración 50/70 de producción italiana y se han preparado éstas para los ensayos según la norma EN 12594. Los betunes han sido seleccionados con la misma penetración pero con diferente grado de modificación mediante polímero SBS, de manera que se pueda apreciar la influencia del porcentaje de modificación en la variación de sus propiedades reológicas, y por tanto en la aplicación de la metodología descrita. En la Tabla 2 se resumen las características y propiedades empíricas principales de los betunes ensayados, tanto en su estado original como tras un envejecimiento acelerado en laboratorio mediante RTFOT.



**Foto 1.** Reómetro de corte dinámico (DSR) utilizado para los ensayos dinámicos en régimen de sollicitación oscilatoria, y detalle de los platos y de la cámara ambiental.



La instrumentación utilizada para la investigación ha sido un Reómetro de Corte Dinámico (DSR) Anton Paar-Physica MCR 101 de última generación, dotado de un sistema de suspensión de los elementos de rotación para reducir al mínimo los rozamientos (ver Foto 1). El sistema consta de dos platos metálicos: un plato base y otro oscilatorio superior de diámetros  $25 \pm 0,05$  mm, con una separación de  $1 \pm 0,05$  mm. La temperatura se controla mediante la cámara ambiental con sistema de control mediante termopares, capaz de mantenerla en el rango de  $5 \pm 0,1$  °C a  $85 \pm 0,1$  °C. El dispositivo de carga del reómetro debe poder determinar  $|G^*|$  entre 10 Pa y 10 MPa ( $\pm 2\%$ ), pudiendo trabajar en modo de tensión controlada o de deformación controlada. Se ha trabajado con frecuencias entre 0,003 Hz y 10 Hz, dependiendo del tipo de ensayo.

### 1. Determinación del Límite de Visco-Elasticidad Lineal (LVE) mediante barridos de deformación

Los siguientes ensayos sólo resultan válidos si se realizan en rangos de tensiones y deformaciones de corte dentro de la región visco-elástica lineal. Si el módulo complejo  $G^* = \tau^*/\gamma^*$  no es constante, sino dependiente del nivel de tensiones o deformaciones, durante los ensayos se podría estar afectando a la propia estructura del material. Por ello, se ha determinado previamente el LVE según establece la metodología SHRP (modelo viscoelástico lineal PSU) para los tres tipos de betunes, tanto en estado original como de su residuo de "Rolling".

Se han realizado barridos de deformación entre el 1% y 200% de amplitud  $\gamma$ , en modo de deformación controlada, todos ellos a la frecuencia de 0,016 Hz, la misma a la que se realizan posteriormente los ensayos para determinar la EVT. Con ello se determina la máxima amplitud de deformación para los siguientes ensayos de barridos de frecuencias y temperaturas, asegurando que los resultados de esta experimentación se obtienen siempre dentro del dominio viscoelástico lineal. Las temperaturas elegidas han sido 40 °C para el betún virgen y 60 °C para los modificados.

Si se representan en doble escala logarítmica los valores del módulo complejo  $G^*$  en función de la deformación de corte  $\gamma$  (o de la tensión de corte  $\tau$ ), la parte horizontal de la curva representa la región lineal visco-elástica. Se define como LVE al valor de la deformación

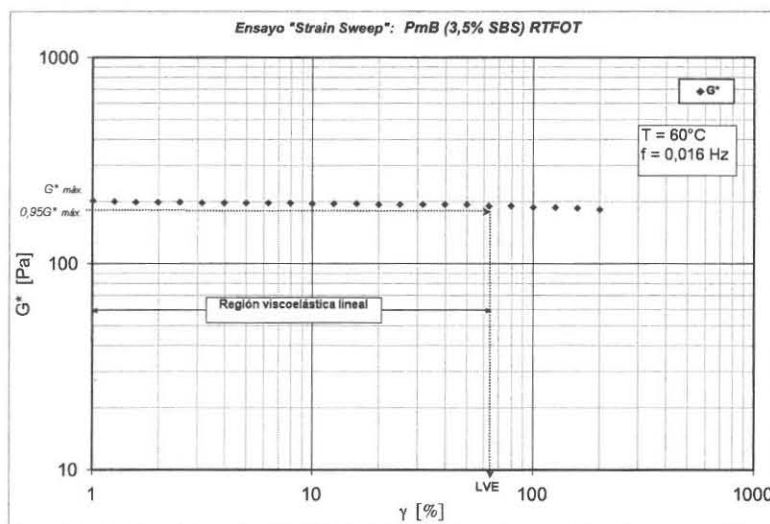


Figura 2. Obtención del LVE en la curva módulo complejo vs. deformación, obtenida en un barrido de deformación.

o tensión de corte para la cual el módulo complejo  $G^*$  desciende al 95% de su valor máximo (Figura 2).

### 2. Temperaturas de Equiviscosidad (EVT) relacionadas con la LSV

La determinación de la EVT se compone de dos fases: en la primera de ellas se realiza un barrido de temperaturas para una primera aproximación a la temperatura de equiviscosidad (EVTI) relacionada con un valor determinado de LSV (usualmente 2 kPa.s) a baja frecuencia (pero aún suficientemente operativa) y baja amplitud de deformación.

En la segunda fase se realiza un barrido de frecuencias a la temperatura EVTI constante, para extrapolar los valores de viscosidad a frecuencias muy próximas a cero, lo que proporcionará un valor más elevado de la LSV que resultará una mejor aproximación a la ZSV teórica, y por tanto también a la EVT. Particularmente para PmBs, las experiencias realizadas han revelado que esta segunda parte del ensayo proporcionan un incremento significativo en la EVT. Además, es recomendable utilizar sistemáticamente en los ensayos los mismos valores de LSV, de amplitud de deformación y de frecuencia.

#### 2.1. Barridos de temperatura: determinación de EVTI

Los barridos de temperatura, en modo oscilatorio de deformación controlada, se han realizado entre 30 y 50 °C para las muestras de betún natural y entre 50 y 70 °C para los PmBs, a incrementos de 1 °C, rangos que comprenden las máximas temperaturas de servicio para cada tipo de ligante. Puesto que la amplitud de

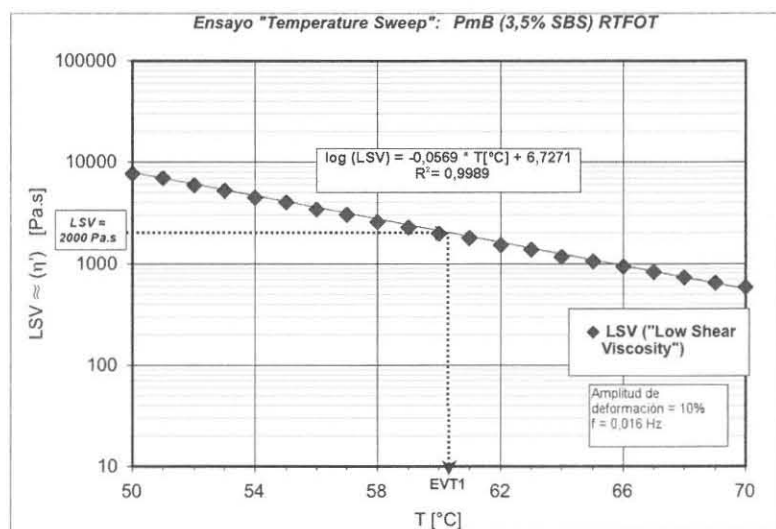


Figura 3. Determinación de EVT1 (para LSV=2,0 kPa.s) mediante ajuste de regresión lineal en la curva log-viscosidad vs. temperatura, obtenida en un barrido de temperaturas.

deformación máxima no debe superar el LVE obtenido anteriormente para cada tipo de betún, se han realizando todos los ensayos con deformaciones máximas del 10% y a una misma baja frecuencia de 0,016 Hz. Esto corresponde con una velocidad de deformación de 0,0063 s<sup>-1</sup>.

A cada temperatura ensayada se han monitorizado dos ciclos completos permitiendo el tiempo suficiente para alcanzar el equilibrio térmico, calculándose los valores de η' (parte real de la viscosidad compleja) como una aproximación de la LSV (η<sub>γ</sub>') en cada ciclo (ver ecuación [3]), para obtener el valor medio como variable que se representará en escala logarítmica en función de la temperatura (Figura 3). En esta representación puede realizarse un muy buen ajuste de regresión a una función del tipo:

$$\log \eta_s = -a \cdot T(^{\circ}\text{C}) + b \quad [5]$$

La temperatura de equiviscosidad EVT1 correspondiente a una determinada LSV (relacionada con el comportamiento funcional del betún a altas temperaturas) puede obtenerse entonces mediante la expresión [6]:

$$\text{EVT1} = \frac{(\log \eta_s - b)}{-a} \quad [6]$$

Se recomienda que el valor de LSV adoptado para el cálculo de la EVT1 sea de 2,0 kPa.s, lo que resulta válido para determinar la máxima temperatura de servicio relacionada con las deformaciones permanentes de las mezclas bituminosas para cualquier tipo de

betún empleado. Los ensayos de pista de laboratorio sobre mezclas bituminosas fabricadas con betunes modificados revelan que las roderas se incrementan drásticamente cuando la viscosidad alcanza dicho valor<sup>(6)</sup>, la cual corresponde a unas temperaturas máximas notablemente inferiores a las del punto de reblandecimiento (con valores normalmente considerados para la viscosidad de 1,0 a 1,2 kPa.s), especialmente para los betunes altamente modificados.

### 2.2. Barridos de frecuencia: determinación de ΔT y EVT2

En esta segunda fase se han realizado barridos de frecuencia, también en modo de deformación controlada, a temperatura constante EVT1 (calculada en la fase anterior para cada tipo de betún), desde la frecuencia de 1Hz, bajando hasta una frecuencia aún menor (0,003 Hz). De igual manera, para trabajar dentro del dominio viscoelástico lineal, se han realizando todos los ensayos con deformaciones máximas del 10%.

Análogamente, se han representado los valores obtenidos de η' (como una aproximación de la LSV, η<sub>γ</sub>') en función del logaritmo de la frecuencia (Figura 4), realizándose un ajuste por mínimos cuadrados, con una correlación suficiente, a una función del tipo:

$$\eta_s = -c \cdot \ln(f) + d \quad [7]$$

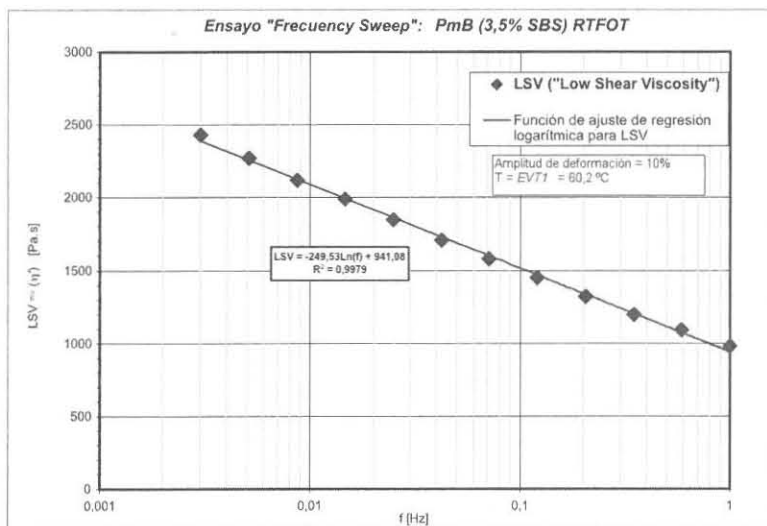


Figura 4. Ajuste de regresión logarítmica en la curva viscosidad vs. Ln-frecuencia, obtenida en un barrido de frecuencias, para la extrapolación a frecuencias próximas a cero (aproximación a la ZSV).

Usando esta función se pueden determinar los valores de LSV a la frecuencia de 0,016 Hz ( $\eta_{\dot{\gamma}_1}$ ) en que se realizó el barrido de temperaturas y, extrapolando, a una frecuencia muy próxima a cero (0,0001 Hz). Esta última viscosidad se ha denominado (LSV2 ó  $\eta_{\dot{\gamma}_2}$ ). De esta manera, se puede calcular el incremento en la temperatura de equiviscosidad EVT1 en la función de ajuste obtenida en la fase I (ecuación [5]) al pasar de  $\eta_{\dot{\gamma}_1}$  a  $\eta_{\dot{\gamma}_2}$ , cuyo valor será más alto y por tanto más aproximado a la ZSV.

$$\Delta T = \frac{\Delta \log(\eta)}{-a} = \frac{\log \eta_{\dot{\gamma}_1} - \log \eta_{\dot{\gamma}_2}}{-a} = \frac{\log \frac{\eta_{\dot{\gamma}_1}}{\eta_{\dot{\gamma}_2}}}{-a} \quad [8]$$

Físicamente,  $\Delta T$  es el incremento en la EVT1 que se obtendría si el ensayo de barrido de temperaturas de la fase I fuese llevado a cabo a la frecuencia de 0,0001 Hz, en lugar de 0,016 Hz, pero tendría el inconveniente de unos tiempos de ensayo notablemente superiores y un mayor coste, resultando inoperativo. Esto corresponde con una muy baja velocidad de deformación de 0,000063 s<sup>-1</sup>. Por tanto, la temperatura de equiviscosidad real del material más relacionada con el concepto de ZSV será:

$$\text{EVT2 (}^\circ\text{C)} = \text{EVT1 (}^\circ\text{C)} + \Delta T (^\circ\text{C)} \quad [9]$$

que representa la máxima temperatura de ejercicio sobre el pavimento del material.

### 3. Temperaturas máximas de servicio según metodología SHRP

Con el fin de poder comparar la metodología propuesta para determinar la máxima temperatura funcional de un betún compatible con la resistencia a la formación de roderas, con el método propuesto por las especificaciones Superpave, se han realizado ensayos de barrido de frecuencias entre 0,1 y 10 Hz a temperaturas comprendidas entre 40 °C y 65 °C, en modo de tensión controlada, con amplitud de tensión máxima 1 kPa. Esto ha permitido, además, medir las propiedades dinámicas básicas de cada material ( $G^*$  y  $\delta$ ) a distintas frecuencias y temperaturas.

Las temperaturas límite de servicio, según dichas especificaciones, corresponden con aquellas para las que el factor de roderas SHRP ( $|G^*|/\sin \delta$ ) vale 1,0 kPa, para betunes originales, y 2,2 kPa para su residuo de "Rolling", a una frecuencia de 10 rad/s (=1,59 Hz) lo que simula el tráfico circulando a 75-90 km/h. Se ha podido establecer un ajuste de regresión lineal del tipo:

$$\log(|G^*|/\sin \delta) = -m \cdot T(^\circ\text{C}) + s \quad [10]$$

con coeficientes de correlación suficientemente elevados (superiores a 0,99 en todos los casos). De esta manera, las temperaturas máximas de servicio que definen el PG de cada betún pueden obtenerse estableciendo los valores mínimos anteriores para el parámetro SHRP.

## RESULTADOS

### I. Límites de Visco-Elasticidad Lineal (LVE) experimentales obtenidos y comparación con los empíricos

Se ha procedido a comparar los valores obtenidos para el LVE experimentalmente a partir de las curvas  $G^*$  vs.  $\gamma$  (obtenidas mediante barridos de deformación) con los deducidos a partir de las relaciones empíricas dadas por Petersen<sup>(7,10)</sup> (ver Tabla 3):

$$\gamma_{LVE}(\%) = 12/(G^*_{m\acute{a}x.})^{0,29}; \quad \tau_{LVE} = 0,12 \cdot (G^*_{m\acute{a}x.})^{0,71} \quad [11]$$

En todos los casos, los límites predichos por las relaciones empíricas resultan inferiores a los determinados en los ensayos. Como las amplitudes de deformación máximas utilizadas en los barridos de frecuencias y de

	B 50/70 Virgen		PmB (3,5% SBS)		PmB (6% SBS)	
	T=40 °C, f=0,016 Hz		T=60 °C, f=0,016 Hz		T=60 °C, f=0,016 Hz	
	Original	Envejecido en RTFOT	Original	Envejecido en RTFOT	Original	Envejecido en RTFOT
$G^*_{m\acute{a}x.}$ (kPa)	1,17	3,68	0,132	0,201	0,496	0,535
$\gamma_{LVE}$ exp. (%)	<b>56,6</b>	<b>55,4</b>	<b>66,3</b>	<b>65,0</b>	<b>78,1</b>	<b>65,2</b>
$\gamma_{LVE}$ emp. (%)	11,47	8,22	21,59	19,11	14,71	14,39
$\tau_{LVE}$ exp. (Pa)	<b>137,5</b>	<b>420,4</b>	<b>56,7</b>	<b>63,8</b>	<b>170,2</b>	<b>145,3</b>
$\tau_{LVE}$ emp. (Pa)	134,15	302,65	28,50	38,41	72,94	76,97

Tabla 3. Límites de viscoelasticidad lineal (LVE) obtenidos experimentalmente y a partir de relaciones empíricas.

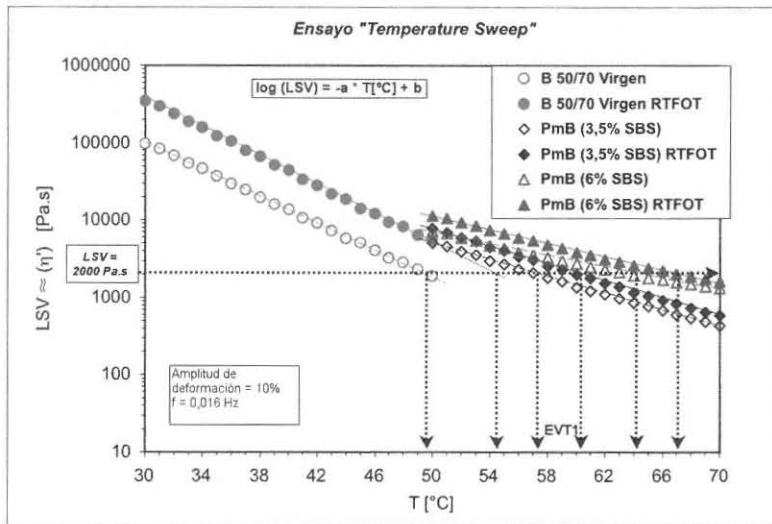


Figura 5. Resultados de los barridos de temperatura para los diferentes tipos de betunes y obtención de las temperaturas de equiviscosidad EVTI.

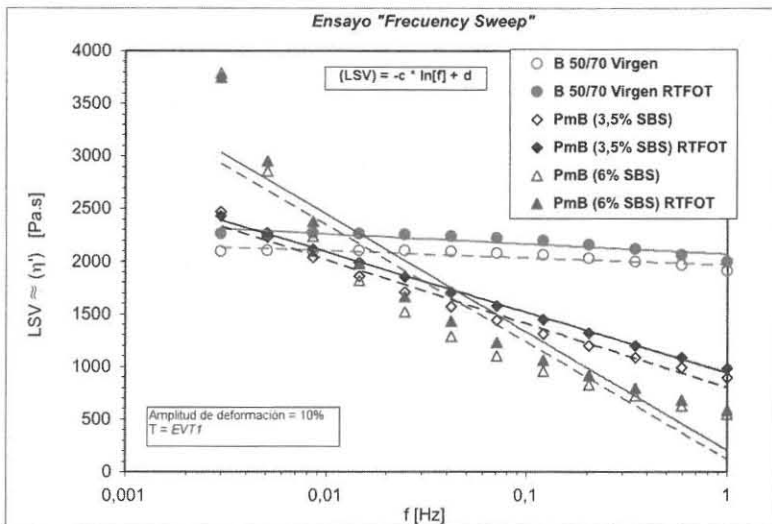


Figura 6. Resultados de los barridos de frecuencia para los diferentes tipos de betunes ensayados.

temperaturas han sido del 10% (se recomienda que no superen  $2/3 * LVE$ ), se puede asegurar que todos los ensayos de esta investigación fueron realizados en el dominio viscoelástico lineal.

**2. Máximas temperaturas de servicio (EVT) obtenidas experimentalmente**

Aplicando la metodología descrita en un apartado anterior se han podido obtener las temperaturas de equiviscosidad de cada betún relativas a una viscosidad de corte muy aproximada a la ZSV, y por tanto, relacionada con la máxima temperatura de servicio de cada ligante (ver Figuras 5 y 6). Éstas se expresan en la Tabla 4.

**3. Máximas temperaturas de servicio según metodología SHRP**

En la Figura 7 puede observarse la variación del factor de roderas SHRP con la temperatura para todas las muestras de betunes ensayados, y la obtención de las temperaturas máximas de servicio según el método establecido en las especificaciones Superpave, cuyos valores se resumen en la Tabla 5.

**DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

La obtención de la EVT en dos fases (barrido de temperaturas y posteriormente barrido de frecuencias) permite una mejor aproximación de dicha viscosidad a la ZSV teórica, pudiéndose obtener por extrapolación la viscosidad a velocidades de deformación tan reducidas como  $0,000063 \text{ s}^{-1}$ , pero con unos tiempos de ensayo y costes notablemente inferiores. Para ensayos de control de calidad rutinarios es posible una simplificación importante del método midiendo solamente EVT1 mediante un barrido de temperaturas a una baja frecuencia en torno a 0,016 Hz.

Los ajustes de regresión realizados con los resultados obtenidos en los barridos de temperatura presentan una muy buena correlación, ya que para todos los betunes (natural y modificados, y tanto originales como envejecidos) se han obtenido coeficientes de correlación superiores a 0,99. Sin embargo, la regresión logarítmica realizada a partir de los datos de barridos de frecuencia sólo presenta una muy buena correlación en el caso de betunes modificados, especialmente para el PmB (3,5% SBS) RTFOT, siendo la correlación más baja en el caso de betún virgen no envejecido ( $R^2=0,754$ ). Como era de esperar, los betunes altamente modificados presentan una notable mayor viscosidad a altas temperaturas y muy bajas frecuencias.

Tanto las temperaturas de servicio máximas EVT1 como EVT2 aumentan con el porcentaje de modificación del betún (ver Figura 8), tanto si el betún se ensaya en su estado original como previamente envejecido



		B 50/70 Virgen		PmB (3,5% SBS)		PmB (6% SBS)		
		Original	Envejecido en RTFOT	Original	Envejecido en RTFOT	Original	Envejecido en RTFOT	
<b>Ensayo: "Barrido de temperaturas"</b> [f=0,016 Hz; $\gamma_0=0,1$ ]	Ajuste de regresión: $\log(LSV) = -a \cdot T + b$	a	0,0865	0,0917	0,0539	0,0569	0,0376	0,0434
		b	7,5886	8,2973	6,3871	6,7271	5,7121	6,2133
		R <sup>2</sup>	0,9996	0,9993	0,9987	0,9989	0,9927	0,9964
	<b>EVT1 (°C)</b> [para LSV=2,0 kPa.s]		49,6	54,5	57,3	60,2	64,1	67,1
<b>Ensayo: "Barrido de frecuencias"</b> [ $\gamma_0=0,1$ ; T=EVT1]	Ajuste de regresión: $LSV = -c \cdot \ln(f) + d$	c	28,80	41,64	263,45	249,53	484,48	487,21
		d	1967,20	2069,90	801,63	941,08	118,47	204,65
		R <sup>2</sup>	0,7537	0,8072	0,9825	0,9979	0,8549	0,8908
	$\Delta T$ (°C) [para LSV <sub>2</sub> a f=0,0001 Hz]		<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>4,3</b>	<b>3,8</b>	<b>8,9</b>	<b>8,7</b>
	<b>EVT2 (°C)</b>		<b>49,9</b>	<b>54,9</b>	<b>61,6</b>	<b>64,0</b>	<b>73,0</b>	<b>75,8</b>

Tabla 4. Temperaturas de equiviscosidad obtenidas experimentalmente, relacionadas con las máximas de servicio, para cada tipo de betún ensayado.

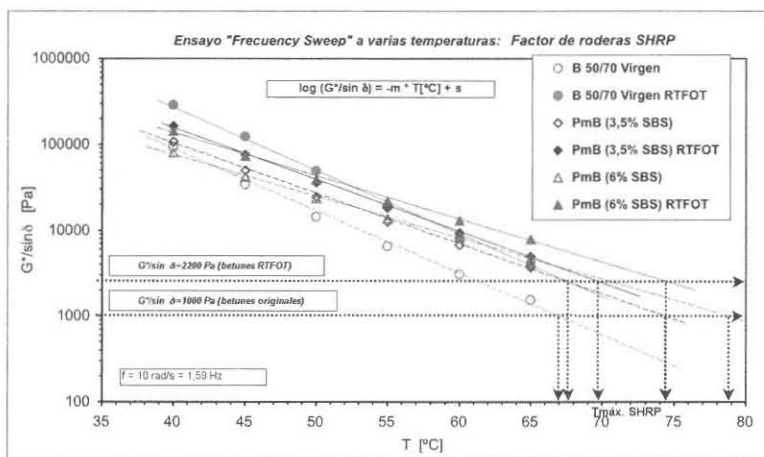


Figura 7. Representación del factor de roderas SHRP a diferentes temperaturas y obtención de la máxima temperatura de servicio SHRP.

mediante RTFOT, siendo además más altas, en todos los casos, sobre los residuos de "Rolling". El incremento de temperatura máxima debido a la segunda fase de los ensayos (barrido de frecuencias para aproximación a la ZSV) es especialmente importante para los betu-

nes altamente modificados, tanto originales como envejecidos, y especialmente en los primeros, alcanzando valores cercanos al 14% para la muestra de PmB (6% SBS). Sin embargo, no hay gran diferencia al comparar cada muestra original con la del mismo betún sometido a RTFOT, tendiendo a reducirse ligeramente al envejecer.

La comparación de las temperaturas máximas funcionales frente a la formación de roderas obtenidas por la metodología seguida en este estudio con las que proporciona el método de las especificaciones americanas SHRP se representa gráficamente en la Figura 9. Se observa que para todos los betunes ensayados, el criterio de las especificaciones Superpave proporciona tem-

peraturas límite claramente superiores, tanto para las muestras de betunes originales como sobre sus residuos de RTFOT. Esta diferencia es máxima en el caso del betún natural o virgen (23 a 34%) y mínima para

		B 50/70 Virgen		PmB (3,5% SBS)		PmB (6% SBS)	
		Original	Envejecido en RTFOT	Original	Envejecido en RTFOT	Original	Envejecido en RTFOT
<b>Ensayo: "Barrido de frecuencias a diferentes temperaturas"</b> [ $\sigma_0=1$ kPa; f=1,59 Hz]	<b>T máx. SHRP (°C)</b>	66,9	67,7	74,3	70,4	78,8	75,3

Tabla 5. Temperaturas máximas de servicio según metodología SHRP.

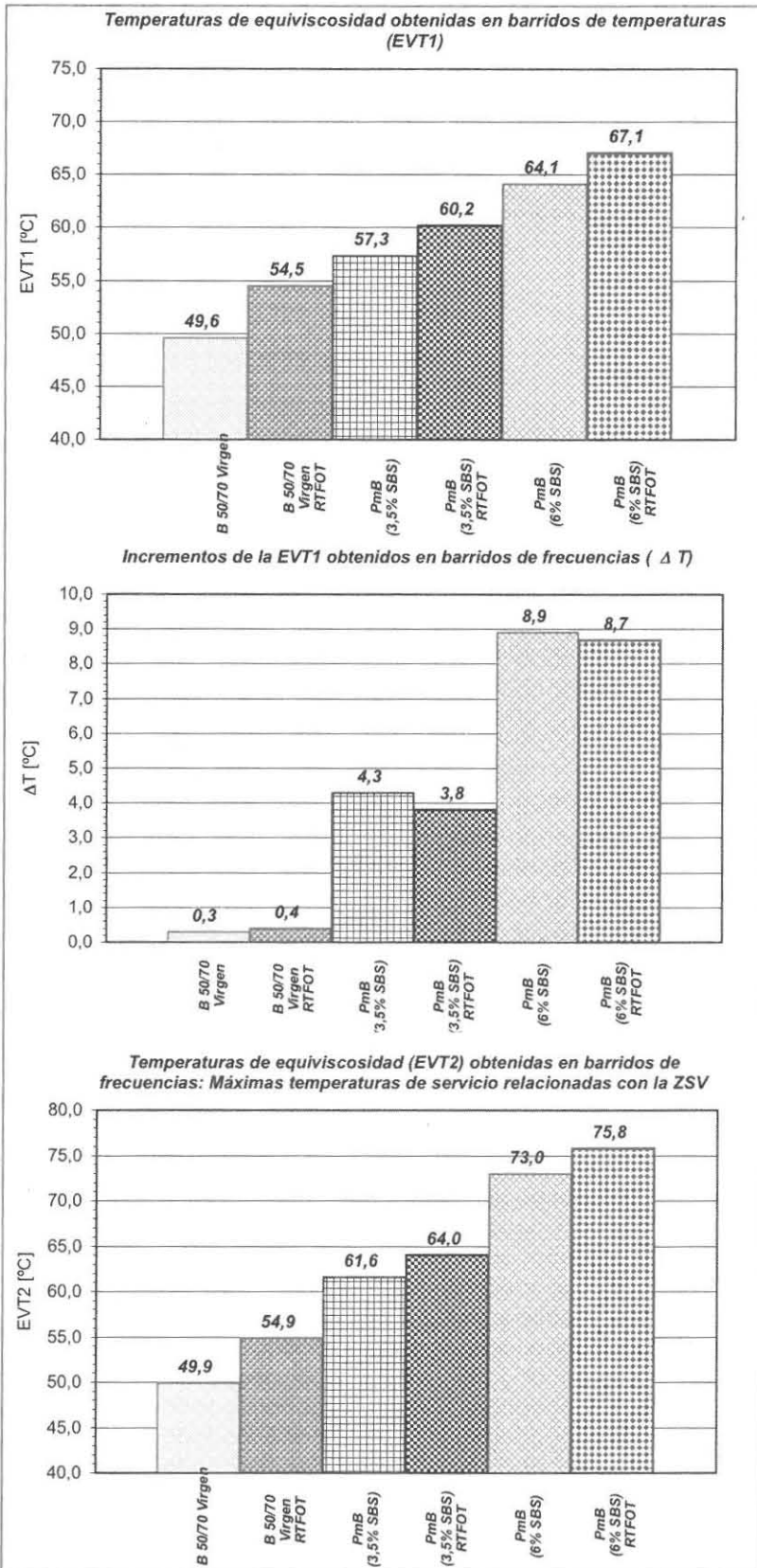


Figura 8. Comparación de las temperaturas de equiviscosidad para los distintos tipos de betunes analizados.

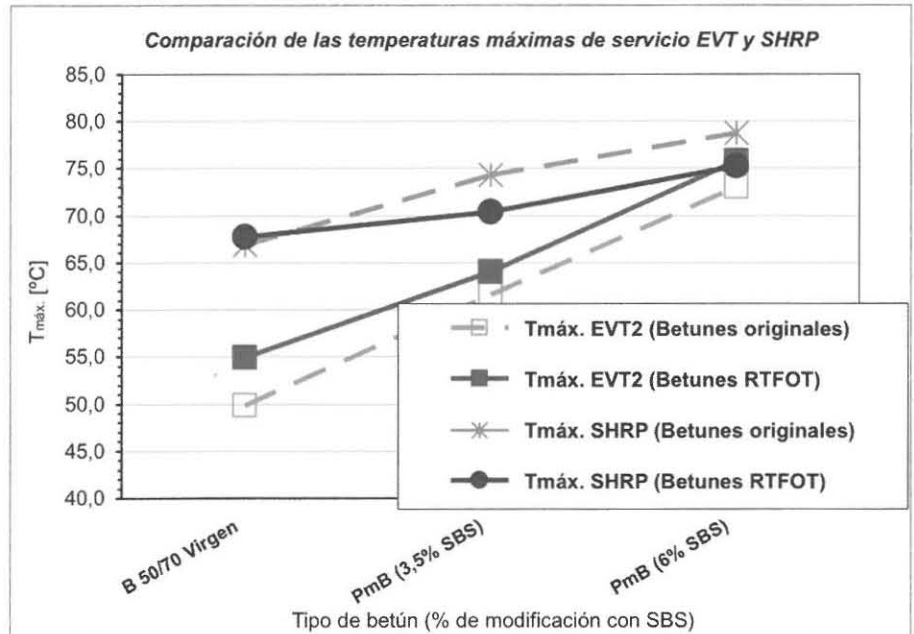
el PmB altamente modificado (1 a 8%). Además, en el criterio EVT2 se aprecia mejor la diferencia de prestaciones entre los betunes modificados y los naturales, ya que la pendiente de las curvas  $T_{m\acute{a}x.}$  vs. porcentaje modificación es mayor.

Por tanto, como conclusiones finales de este trabajo, es posible establecer que:

- El criterio de las especificaciones Superpave proporciona temperaturas máximas de servicio, relacionadas con la susceptibilidad a las deformaciones plásticas, claramente superiores, lo que estaría del lado de la inseguridad. Por otra parte, con el criterio EVT2 se aprecia mejor la diferencia de prestaciones entre los betunes naturales y los modificados, resultando especialmente indicado para caracterizar éstos últimos.
- Así pues, las especificaciones de la futura normativa europea para la caracterización funcional de ligantes bituminosos frente a las deformaciones permanentes mediante la Temperatura de equiviscosidad (EVT) relacionada con una determinada LSV (obtenida en ensayo DSR en modo oscilatorio a baja frecuencia) pueden resultar apropiadas para todos los tipos de betunes. Especialmente en los modificados permite apreciar la influencia del agente modificador en la capacidad de recuperación de deformaciones permanentes del betún resultante. Por tanto, los resultados obtenidos en esta investigación constituyen valiosos datos para la validación del futuro marco europeo de especificaciones y la constitución del período adaptativo de transición.
- Del análisis de las temperaturas máximas de servicio EVT2, comparadas con las obtenidas en la primera fase de ensayos (EVT1), se deduce la importancia de realizar dichas determinaciones en un doble proceso de barridos de temperaturas y de frecuencias, especialmente para los betunes altamente modificados. Esto permite aproximar

mejor las viscosidades (a las que están referidas dichas temperaturas máximas) a la ZSV, pero con unos tiempos de ensayo y costes más reducidos y operativos, y por tanto, optimizados.

- La comparación de estos resultados experimentales con ensayos de medida directa de las deformaciones plásticas de las mezclas bituminosas fabricadas con dichos betunes (ej. ensayos de pista de laboratorio), permitiría validar en la práctica los criterios utilizados en esta investigación, en especial el valor límite LSV adoptado para el cálculo de la EVT I (2,0 kPa.s en este trabajo).



**Figura 9.** Comparación de las temperaturas máximas de servicio obtenidas en esta investigación con las de la metodología SHRP.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASPHALT INSTITUTE. "Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing". Asphalt Institute SUPERPAVE Series N° I (SP-1).
2. Shenoy, A. (2001). "Refinement of the Superpave specification parameter for Performance Grading of asphalt". Journal of Transportation Engineering. Vol. 127, 357-362.
3. Cremades, I., Sandoval I. (2006). "Caracterización de betunes mediante la Viscosidad de Corte Cero". Revista Carreteras, n° 147. AEC. Madrid.
4. Phillips, M.C., Robertus, C. (1995). "Rheological characterisation of bitumen binders in connection with permanent deformation in asphaltic pavements: the zero-shear viscosity concept". Eurobitume Workshop. Paper N° 50. Brussels.
5. Sybilski, D. (1996). "Zero shear viscosity: Phenomenons at measurement, interpretation and relation to permanent deformation". 1st Eurasphalt & Eurobitume Congress. Strasbourg, 1996.
6. Fabb, T. (2000). "Performance-related bitumen specifications for Europe: simple and soon". 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress. Barcelona 2000, Book 1, p. 248.
7. Technical Committee CEN/TC 336. (2006). "Bitumen and bituminous binders: Determination of Equiviscous Temperature based on Low Shear Viscosity using a Dynamic Shear Rheometer in low frequency oscillation mode" (CEN 336 WI00336067-prEN 15325) [Borrador de norma europea].
8. Stawiarski, A., Beuving, E., Soraas, K., Teugels W. (2004). "European BITSpec Seminars 2002-2003: A communication project to support the development of the European bitumen standardisation". 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress. Vienna 2004, Book II, Paper 294, p. 2111-2119.
9. Giuliani, F., Merusi, F., Antunes, I., (2006). "Creep flow behaviour of asphalt rubber binder: The Zero-Shear Viscosity analysis". Asphalt Rubber 2006 Conference. Palm Springs, California. Oct. 2006.
10. Petersen, J.C. et al. (1994). "Binder Characterisation, Volume 4: Test Methods". SHRP-A-370, Strategic Highways Research Program. National Research Council. Washington, D.C. ■

