

# Reología de los ligantes españoles en el contexto de la nueva versión de la norma EN 12591

**Francisco Barceló Martínez,**  
fbarcelom@repsol.com  
**Cristina Pereira Mozota,**  
cpereira@asesa.es

**María González González,**  
maria.gonzalezg@cepsa.com  
**Vicente Pérez Mena,**  
vicente.perez@cepsa.com

El Reglamento Europeo de Productos de la Construcción que entró en vigor en Julio 2013 pone el foco en definir requisitos prestacionales para los productos de construcción. Para cumplir con las premisas del nuevo Reglamento, la actualización de la norma Europea de ligantes bituminosos para pavimentación (EN 12591) contemplará un conjunto de parámetros reológicos obtenidos mediante las técnicas de DSR (Dynamic Shear Rheometry) y BBR (Bending Beam Rheometry). Estos parámetros son de carácter prestacional y proporcionan una visión global del comportamiento de los ligantes, proporcionando información de interés relacionada con los fenómenos de fatiga, deformaciones plásticas y fisuración a bajas temperaturas.

En este trabajo se ha estudiado el comportamiento reológico de un conjunto representativo de los principales ligantes empleados en España en cuanto a las propiedades propuestas en la nueva versión de la norma EN 12591 se refiere con el objetivo de ofrecer al sector una visión global del comportamiento de los ligantes españoles en el contexto de la nueva normativa.

**Palabras Clave:** Betún, reología, normativa, propiedades prestacionales.

The European Regulation for Construction Products released on July 2013 focuses on defining performance requirements for construction materials. In order to meet the requirements stated in this new Regulation, the new version of the European standard for paving grade bitumen (EN 12591) will include a set of rheological parameters determined by DSR (Dynamic Shear Rheometry) and BBR (Bending Beam Rheometry). The proposed parameters are performance-oriented and provide a global vision on the behaviour of bituminous binders, affording information about fatigue, plastic deformation and low temperature cracking phenomena.

In this work, the rheological behaviour of a set of bituminous binders which effectively represent the Spanish scene has been studied in terms of the properties proposed in the new version of EN 12591 standard. The aim is to provide the construction sector with a global vision of the performance of the Spanish binders in the context of the new regulation.

**Keywords:** Bitumen, rheology, standards, performance.

## 1. Introducción

Durante las últimas décadas se ha realizado un esfuerzo importante enfocado a la identificación y estudio de los mecanismos de fallo en los pavimentos. Los estudios realizados indican que muchas de las propiedades de las mezclas asfálticas vienen definidas por el comportamiento viscoelástico del ligante y que las características convencionales (penetración, punto de reblandecimiento, etc.) fallan a la hora de relacionarlas con el comportamiento en servicio del betún.

## 2. Cambios en las normas EN 12591, EN 13924-1 y EN 13924-2

En Europa, las actividades de normalización se gestionan a través del Comité Europeo de Normalización, CEN (European Committee for Standardization). Dentro de CEN, existen diversos Comités Técnicos (TC) compuestos por representantes designados por los organismos nacionales de normalización, que se encargan de preparar las normas dentro de su ámbito específico de actuación.

# Reología de los ligantes españoles en el contexto de la nueva versión de la norma EN 12591

Concretamente el desarrollo y redacción de los estándares y métodos de ensayo, se delega en Grupos de trabajo (WG) compuestos por expertos, que realizan propuestas de cambio al TC para su aprobación posterior por el mismo.

En el caso de los ligantes bituminosos, el TC encargado de preparar las normas es el CEN/TC 336, que se compone de dos Grupos de trabajo, el WG1 que cubre betunes y betunes modificados y el WG2 que se encarga de las emulsiones bituminosas y betunes fluxados.

Las últimas revisiones de las normas de especificación de producto (EN 12591, EN 13924-1 y EN 13924-2), incluyen nuevos ensayos de carácter prestacional, que tratan de apor-

tar información sobre el comportamiento del betún cuando se somete a esfuerzos a lo largo de su vida, bajo diferentes condiciones climáticas.

## 2.1 Norma EN 12591

El proceso de revisión de la norma EN 12591 "Betunes y ligantes bituminosos. Especificaciones de betunes para pavimentación" comenzó en enero de 2015, y el resultado final de la misma se sometió a votación en 2017, siendo aprobada por los países miembro. Sin embargo, por cuestiones formales todavía no se ha publicado.

**Table B.1 — Informative properties for binders from Tables 1 and 2**

Property	Test method	Unit	Value
Addressing temperature sensitivity: $G^*$ and $\delta$ @ 1,59 Hz ( $10 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ) after short-term ageing <sup>a</sup>	8 mm plate, 2 mm gap Temperature at which $G^* = 5 \text{ MPa}$ ( $T1$ ) <sup>b c d</sup> Value of $\delta$ at $T1$ <sup>d</sup>	°C °	RV RV
	25 mm plate, 1 mm gap Temperature at which $G^* = 50 \text{ kPa}$ ( $T2$ ) <sup>b d</sup> Value of $\delta$ at $T2$ <sup>d</sup>	°C °	RV RV
Low temperature behaviour after long term ageing <sup>a</sup>	Temperature at which $S = 300 \text{ MPa}$ <sup>d</sup>	°C	RV
	Temperature at which $m = 0,3$ <sup>d</sup>	°C	RV
<sup>a</sup> The applicable properties shall be provided for bitumen grades appearing in Table 1; long term ageing includes RTFOT + PAV (100 °C, 20 h ± 10 min) conditioning. <sup>b</sup> The temperatures $T1$ and $T2$ have to be determined by logarithmic interpolation from two temperatures, one below and one above the targeted temperature. Phase angles are based on linear interpolation. <sup>c</sup> If correlation is shown, $T1$ can also be determined using a 25 mm plate. <sup>d</sup> The temperatures at which $S = 300 \text{ MPa}$ has to be determined by logarithmic interpolation from two temperatures, one below and one above the targeted temperature. A gap of 6 °C between these temperatures is recommended. The $m$ -values are based on logarithmic inter- or extrapolation.			

RV A Reported Value is described as a single value which shall be made available by the supplier of the bituminous binder.

Tabla 1: Propiedades informativas en EN 12591

La modificación más importante que ha sufrido dicha norma, es la incorporación de propiedades prestacionales a título informativo. Estas se recogen en una tabla, donde se especifican las condiciones bajo las que deben realizarse los ensayos, y se concretan los parámetros reológicos a determinar.

Cabe destacar que se trata de un conjunto de valores informativos, es decir, todos los valores son igualmente válidos. Cabe esperar que la información recopilada durante los próximos años permita incluir y limitar algunos o todos estos parámetros llegando a formar parte del conjunto de especificaciones en futuras revisiones de la norma.

## 2.2 Norma UNE EN 13924-1 y UNE EN 13924-2

Las normas UNE-EN 13924-1 "Betunes y ligantes bituminosos. Marco para la especificación de los betunes especiales para pavimentación. Parte 1: Betunes duros para pavimentación", y UNE-EN 13924-2 "Betunes y ligantes bituminosos. Marco para la especificación de los betunes especiales para pavimentación Parte 2: Especificaciones de los betunes multigrado para pavimentación" sustituyen y anulan a UNE-EN 13924 "Betunes y ligantes bituminosos. Especificaciones de los betunes duros para pavimentación.

Estas normas experimentaron un proceso de revisión similar al de EN 12591, que dio lugar a la incorporación de un anexo (Anexo B), donde se presenta una lista de propiedades informativas basadas en la caracterización reológica de los ligantes. En este Anexo se recogen los valores obtenidos en los ensayos EN 14771 y EN 14770 a unas condiciones específicas.

Tabla 2: Propiedades informativas

Propiedad	Unidad	Método de ensayo	Dato
TS= 300 MPa, medida por el BBR(a)	°C	EN 14771	TBR
Tm=0,3, medida por el BBR(a)	°C	EN 14771	TBR
G* a 15 °C y 10 Hz medido mediante DSR(b)	MPa	EN 14770	TBR
TG*/senδ = 1 kPa a 1,6 Hz medido mediante DSR(b)	°C	EN 14770	TBR

a BBR = Reómetro de Flexión.

b DSR = Reómetro de corte dinámico (Dynamic Shear Rheometer) o cualquier otro reómetro capaz de medir un módulo complejo.

En el caso de los betunes multigrado, en el Anexo también se incluye información sobre su comportamiento después de envejecimiento por PAV (UNE EN 14769), en concreto valores de penetración retenida, variación de masa e incremento en el

punto de reblandecimiento.

## 3. Modos de fallo y parámetros reológicos

Los principales mecanismos de fallo que se consideran en un pavimento son la deformación plástica (formación de rodaduras), el fallo por fatiga y la fisuración térmica. Estos tres mecanismos están relacionados directamente con el comportamiento viscoelástico del betún en distintas condiciones de temperatura y grado de envejecimiento, por lo que las técnicas reológicas permiten obtener parámetros que reflejan las prestaciones del ligante.

Las técnicas reológicas DSR (Dynamic Shear Rheometer) y BBR (Bending Beam Rheometer) permiten caracterizar el comportamiento frente a un esfuerzo de cizalla y de flexión respectivamente. Ambas técnicas se basan en aplicar un esfuerzo y medir la deformación la cual se expresa en forma de dos propiedades principales:

- la resistencia total del ligante a la deformación expresada mediante el módulo complejo ( $G^*$ ) en DSR o módulo de rigidez ( $S$ ) en BBR
- el grado de contribución a esa resistencia de las componentes elástica (deformación recuperable) y viscosa (deformación permanente) expresada mediante el ángulo de fase ( $\delta$ ) en DSR o la capacidad de disipación de la energía expresada mediante la velocidad de relajación ( $m$ ) en BBR

En función de la temperatura, del esfuerzo y del tiempo de carga al que esté sometido el betún predomina su componente viscosa (capacidad de fluir como un líquido) o su componente elástica (capacidad de disipar la energía como un sólido

# Reología de los ligantes españoles en el contexto de la nueva versión de la norma EN 12591

elástico). De esta forma, a temperaturas intermedias los ligantes bituminosos tenderán a comportarse como semi-sólidos, necesitando una fuerza elevada para inducir su deformación y con una elevada capacidad para recuperar su estado inicial. En términos reológicos, este comportamiento implica valores de  $\delta$  bajos y  $G^*$  elevados. A medida que aumenta la temperatura, el material cada vez se deforma con más facilidad ( $G^*$  disminuye) y su comportamiento se va aproximando al de un líquido ( $\delta$  aumenta). Por el contrario, a temperaturas muy bajas los ligantes bituminosos se comportan como un sólido pudiendo llegar incluso a sufrir fractura vítrea: presenta una elevada rigidez (expresada como un valor elevado de  $S$ ) que induce un elevado desarrollo de tensiones relacionadas con la contracción térmica, aunque presenta una cierta capacidad para relajarlas, expresada como  $m$  (velocidad de relajación). Cuanto mayor sea el valor de  $m$ , mayor será la capacidad del ligante para recuperarse tras una tensión aplicada a baja temperatura.

### 3.1 Fallo por deformaciones plásticas (roderas)

La formación de roderas se debe a las deformaciones plásticas continuadas ocasionadas por el paso repetido de los ve-

hículos. Parte del trabajo de deformación de la capa superficial del pavimento se recupera de forma elástica y parte se disipa en deformaciones permanentes y calor, dando lugar al fallo. Este modo de fallo es relevante a temperaturas medias-altas durante los primeros años en servicio del pavimento, puesto que a medida que va envejeciendo el ligante aumenta su rigidez reduciéndose el riesgo de formación de roderas.

Para una adecuada resistencia a roderas, los ligantes deben presentar una alta resistencia total a deformaciones (un elevado  $G^*$ ) y una componente elástica elevada (valor de  $\delta$  bajo) desde el momento de su aplicación en carretera. En este contexto, la resistencia ante la formación de roderas se evalúa mediante DSR sobre betún envejecido a corto plazo (RTFOT) considerando como valor crítico  $G^* = 50$  kPa y reportando la temperatura a la que se alcanza dicho valor y el valor del ángulo de fase a esa temperatura. Cuanto mayor es la temperatura a la que se cumple el criterio de igualdad y menor delta, más resistente será el pavimento a la formación de roderas. La temperatura  $T_{G^*=50\text{kPa}}$  reportada indica el valor umbral por encima del cual el betún presenta un claro riesgo de formación de roderas.



Ilustración 1: Deformación plástica (roderas)

### 3.2 Fallo por fatiga

La resistencia a fatiga depende de la capacidad del material para recuperarse tras la carga cíclica, por lo que un comportamiento altamente elástico (valores bajos de  $\delta$ ) favorece la resistencia ante este tipo de esfuerzo. En capas finas, la fatiga es un fenómeno controlado por deformación y la resistencia a fatiga se ve favorecida por valores de  $G^*$  bajos. Valores bajos de  $G^*$  implican un menor desarrollo de tensiones ante la deformación inducida por la carga cíclica y por tanto una recuperación más fácil del estado tensional inicial.



Ilustración 2: Fallo por fatiga

La resistencia ante la fatiga se evalúa mediante DSR sobre betún envejecido a corto plazo (RTFOT) considerando como módulo máximo  $G^*=5\text{MPa}$  reportando de igual manera la temperatura a la que se alcanza y el ángulo de fase correspondiente. A temperaturas por debajo de ésta, el valor del módulo es tan elevado que ante la deformación impuesta por la carga cíclica el nivel tensional es tan elevado que puede dar lugar a fallos. De esta forma, los valores de temperatura a los que  $G^*=5\text{MPa}$  serán menores cuanto más resistente sea el ligante a fatiga.

### 3.3 Fisuración térmica

Es el resultado de la acumulación de tensiones debidas a la contracción térmica del pavimento y constituye el mecanismo de fallo predominante a temperaturas bajas. Este mecanismo de fallo es importante en ligantes altamente envejecidos, que se caracterizan por una elevada rigidez y una baja capacidad de relajación de tensiones.



Ilustración 3: Fisuración térmica

La resistencia a la fisuración se evalúa mediante BBR sobre betún previamente sometido a un envejecimiento severo (RTFOT seguido de PAV) que simula años de servicio en carretera. Se reportan los valores de temperatura a los que se alcanzan los valores críticos de  $S=300\text{MPa}$  y  $m=0.300$ . Cuanto menores sean ambas temperaturas para un ligante, más resistente a la fisuración térmica será el pavimento fabricado a partir del mismo.

## 4. Descripción de los ensayos

Los parámetros reológicos informativos del ligante bituminoso contemplados en la especificación EN 12591 se pueden dividir en dos categorías:

- Los relacionados con la sensibilidad a temperaturas medias ( $10\text{-}40^\circ\text{C}$ ) y altas ( $40\text{-}80^\circ\text{C}$ )
- Los relacionados con la sensibilidad a bajas temperaturas ( $0\text{-}36^\circ\text{C}$ ).

Por otro lado, se contemplan dos grados de envejecimiento diferenciados:

- A corto plazo (simulado por el proceso de envejecimiento "Rolling Thin Film Oven Test, RTFOT")
- A largo plazo (combina una etapa de envejecimiento por RTFOT seguida de una más agresiva en un dispositivo "Pressure Aging Vessel, PAV").

### 4.1. Procesos de envejecimiento: Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) y Pressure Aging Vessel (PAV)

El proceso de envejecimiento por RTFOT simula el envejecimiento que sufre el ligante bituminoso durante la mezcla en una planta de aglomerado asfáltico y su colocación en la carretera sometiéndolo a efectos similares a los reales, y está des-

## Reología de los ligantes españoles en el contexto de la nueva versión de la norma EN 12591

crita en la norma EN 12607-1. Consiste en envejecer  $35,0 \pm 0,5$  g de betún en cada uno de los recipientes normalizados sometiéndolo a los siguientes efectos:



Ilustración 4: Carrusel de muestras en estufa RTFOT

- **Movimiento:** los recipientes con el ligante están sometidos a un movimiento giratorio de  $15,0 \pm 0,2$  r/min al colocarse horizontalmente en el porta-muestras. Para asegurar el equilibrado del porta-muestras, este debe contener recipientes en todas sus posiciones. De esta forma, el ligante recubre las paredes interiores del recipiente formando una película fina que se asemeja a la formada entre los áridos en la mezcla asfáltica.
- **Temperatura:**  $165 \pm 1$  °C mediante control por termómetro calibrado.
- **Aire:** el equipo inyecta aire a un caudal de  $4,0 \pm 0,2$  l/min en cada recipiente en su paso por la zona, aunque también circula por todo el hogar de la estufa mediante la acción de un ventilador de jaula de grillo instalado en la parte superior que gira a  $1725 \pm 100$  r/min.
- **Tiempo:** los efectos anteriormente mencionados se mantienen durante  $75 \pm 1$  min.

Una vez agotado el tiempo, se recupera el betún envejecido de todos los recipientes homogeneizando la totalidad para los ensayos reológicos posteriores procurando no introducir burbujas de aire en la matriz, puesto que éstas pueden interferir en los ensayos posteriores.

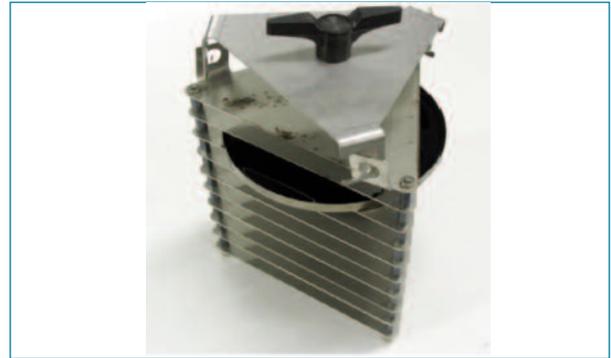


Ilustración 5: Soporte de bandejas en estufa PAV

El ensayo de envejecimiento por PAV simula el envejecimiento a largo plazo que sufre el ligante bituminoso tras años de servicio en la carretera sometiéndolo a unas condiciones extremas que permiten acelerar el proceso reduciendo el tiempo de análisis a valores operativos. Descrito en la norma EN 14769, el proceso consiste en envejecer  $50,0 \pm 0,5$  g de una capa fina de betún previamente envejecido por RTFOT en cada una de las bandejas normalizadas sometiéndolo a los siguientes efectos:

- **Temperatura:**  $100 \pm 0,5$  °C mediante control por termómetro calibrado.
- **Presión:** la estufa está conectada a una botella de aire comprimido que permite mantener una presión de  $2,1 \pm 0,1$  MPa en el interior del recipiente a presión.
- **Tiempo:** los efectos anteriormente mencionados se mantienen durante 20 horas  $\pm$  10 minutos.

La estufa PAV consiste en:

- Un recipiente de presión: fabricado en acero inoxidable de unas dimensiones internas adecuadas que permite albergar el soporte de bandejas con ligante bituminoso. El recipiente está conectado a la botella de aire comprimido y está dotado de un controlador de presión.
- Una estufa de circulación forzada dotada de un sistema de control de temperatura que permite llevar el recipiente presurizado cargado a la temperatura de ensayo manteniéndola en un rango de  $\pm 0,5$ °C en todos los puntos del recipiente tras las dos primeras horas de acondicionamiento.
- Un dispositivo de registro que permite monitorizar la temperatura durante todo el ensayo con una precisión de  $0,1$  °C.

Una vez finalizado el tiempo de ensayo, se retiran las bande-

jas con el ligante envejecido. Las burbujas de aire que pueda contener pueden interferir en los ensayos reológicos posteriores, para evitarlo se eliminan en una estufa de vacío a  $15 \pm 2,5$  kPa. durante  $30 \pm 1$  minutos. Finalmente, el betún envejecido se recupera de las bandejas homogeneizando la totalidad en un único recipiente para los ensayos reológicos posteriores.

#### 4.2. Comportamiento a temperaturas medias-altas: Determinación de $T$ y $\delta$ por DSR

El comportamiento del ligante a medias y altas temperaturas se evalúa mediante las características reológicas  $G^*$  (módulo complejo) y  $\delta$  (ángulo de fase) sobre una muestra de betún envejecida por RTFOT (envejecimiento a corto plazo según la norma EN 12607-1).

El ensayo DSR (Dynamic Shear Rheometer) descrito en la norma EN 14770, se basa en aplicar un esfuerzo cortante constante oscilatorio a una muestra de ligante colocada entre dos platos metálicos paralelos. El ensayo se realiza a temperaturas de  $10^\circ\text{C}$  a  $80^\circ\text{C}$  y a frecuencias entre 0,1 Hz y 10 Hz.

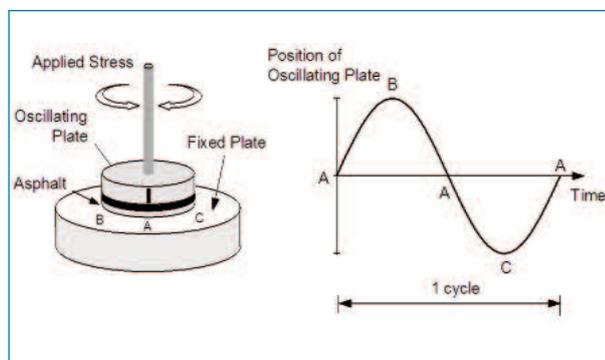


Ilustración 6: Ensayo DSR

La parte experimental del ensayo consiste en:

- Colocar la muestra entre los platos del reómetro, previamente calentados a la temperatura de ensayo. Para ello se emplea una pequeña porción de ligante que previamente se ha moldeado en un molde de silicona. Se ajusta la separación entre platos a una distancia ligeramente superior a la de ensayo, se retira el exceso de muestra de los bordes empleando una espátula y se ajusta la distancia entre platos al espesor adecuado para el ensayo.
- Se inicia el ensayo de cizalla a una temperatura y una

frecuencia de oscilación fijas: mientras el plato inferior permanece fijo, el plato superior realiza un movimiento oscilatorio sinusoidal entre dos puntos a la vez que ejerce un esfuerzo cortante constante. El movimiento completo A  $\downarrow$  B  $\downarrow$  A  $\downarrow$  C  $\downarrow$  A se denomina ciclo de oscilación. La frecuencia de oscilación se define como el nº de ciclos por unidad de tiempo la cual se expresa habitualmente en Hz (nº ciclos/segundo) si bien también puede expresarse según la distancia circunferencial, es decir en radianes por segundo.

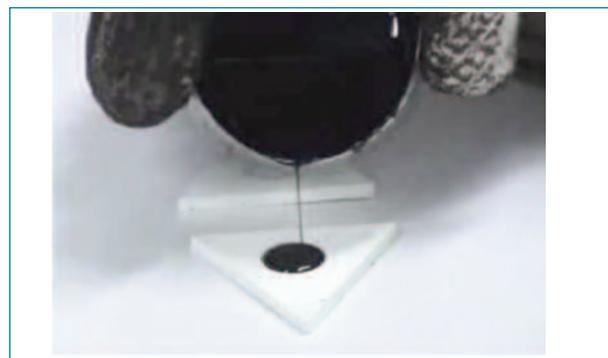


Ilustración 7: Deposición en molde de silicona

La norma EN 14770 define las siguientes condiciones de ensayo:

- **Región de comportamiento viscoelástico lineal:** El ensayo se debe realizar empleando una tensión que asegure un comportamiento de  $G^*$  independiente de la deformación aplicada (intervalo lineal).
- **Geometría:** Metálica tipo plano-paralelo. El diámetro varía en función de la temperatura de ensayo: 8 mm se considera adecuado para temperaturas medias ( $10$  a  $40^\circ\text{C}$ ) y 25 mm para temperaturas altas ( $40$  a  $80^\circ\text{C}$ )
- **Espesor de la muestra:** varía en función del tamaño de plato empleado siendo de 2 mm para el plato de 8 mm (temperaturas medias) y de 1 mm para el plato de 25 mm (temperaturas altas). Para facilitar la preparación de la muestra, se emplea un molde de silicona normalizado.
- **Barrido de frecuencias y temperaturas:** el ensayo se inicia a una temperatura  $T_1$  realizando un barrido de frecuencias al alza desde 0,1 Hz hasta 10 Hz. Se prosigue con la siguiente temperatura en saltos de temperatura inferiores a  $10^\circ\text{C}$ . A cada temperatura y fre-

# Reología de los ligantes españoles en el contexto de la nueva versión de la norma EN 12591

cuencia de oscilación, el equipo mide:

- El módulo complejo de corte ( $G^*$ ): relación entre la amplitud de la tensión y la amplitud de la deformación sufrida por el material
- El ángulo de fase entre la tensión y la deformación

Las temperaturas a las cuales  $G^* = 5 \text{ MPa}$  y  $G^* = 50 \text{ kPa}$  (parámetros que se requerirán en la nueva versión de la EN 12591) se obtienen mediante interpolación logarítmica en la isócrona a una frecuencia de 1,59 Hz, de  $G^*$  vs T. Los ángulos de fase correspondientes se obtienen por interpolación lineal de las temperaturas obtenidas en la curva de  $\delta$  vs. T a dicha frecuencia.

14771, el ensayo consiste en aplicar una carga constante sobre una viga de muestra durante un tiempo determinado y en medir la deflexión en el punto medio. A partir de este ensayo se obtienen el módulo de rigidez (S) y la velocidad de deformación (m).

El ensayo se desarrolla de la siguiente manera:

- Se moldea una viga de muestra de dimensiones normalizadas y se coloca en el equipo sobre los dos puntos de apoyo, uno en cada extremo, diseñados a tal efecto. La muestra durante el ensayo estará completamente sumergida en un baño termostático regulado a la temperatura constante del ensayo.

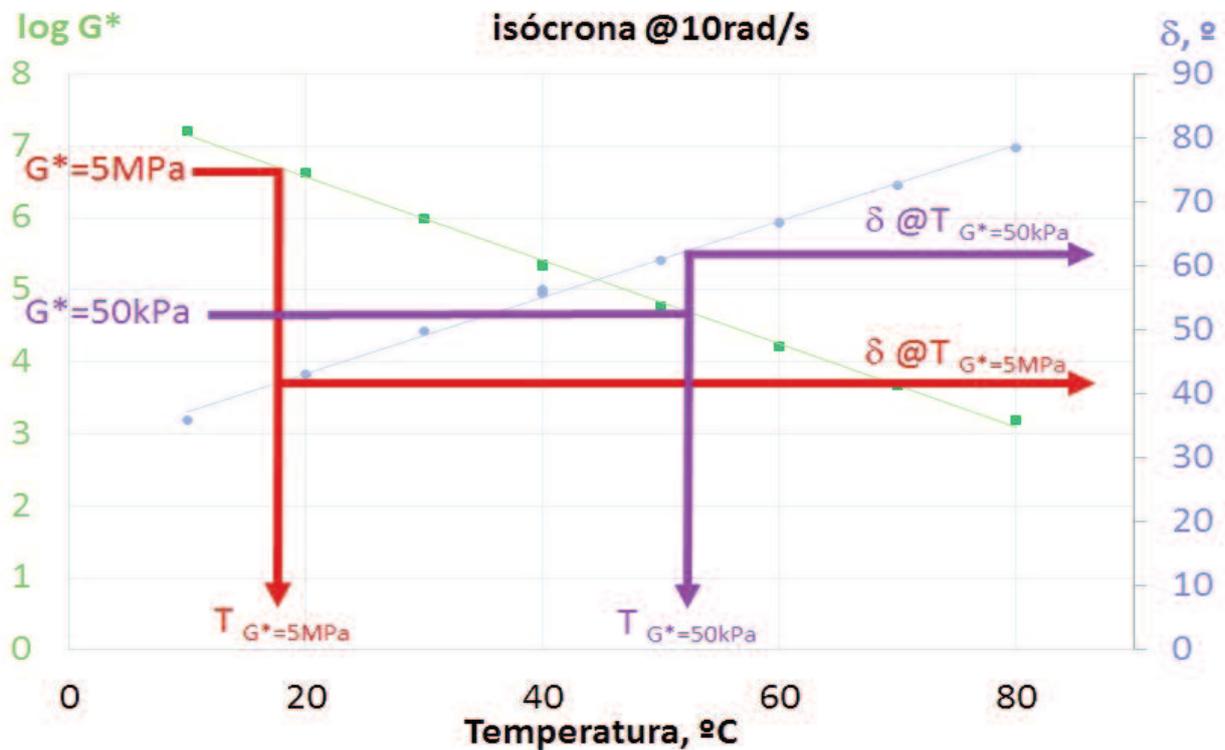


Gráfico 1: Interpolación de parámetros en ensayo DSR

### 4.3. Comportamiento a baja temperatura: Determinación de S y m por BBR

El comportamiento del ligante a bajas temperaturas se evalúa mediante las características reológicas S (módulo de rigidez) y m (velocidad de relajación) sobre la muestra de betún altamente envejecido mediante RTFOT y PAV.

El ensayo de flexión de viga permite medir la resistencia del material a la flexión empleando un reómetro de flexión de viga o BBR (Bending Beam Rheometer). Siguiendo la norma EN



Ilustración 8: Ensayo BBR

- Se inicia el ensayo de flexión: se aplica una carga normalizada constante de  $980 \pm 50$  mN durante 240 segundos, registrando la evolución del valor de deflexión (deformación) el cual se incrementa a lo largo del ensayo.
- Se calcula el módulo de rigidez (S) a los tiempos de carga 8,0 s, 15,0 s, 30,0 s, 60,0 s, 120,0 s y 240,0 s, el cual resulta de la relación entre la tensión y la deformación registrada en cada momento.
- El valor de m es el valor absoluto de la pendiente de la curva  $\log(S)$  vs.  $\log(t)$ .
- Se reportan los parámetros de S y m a 60,0 s.

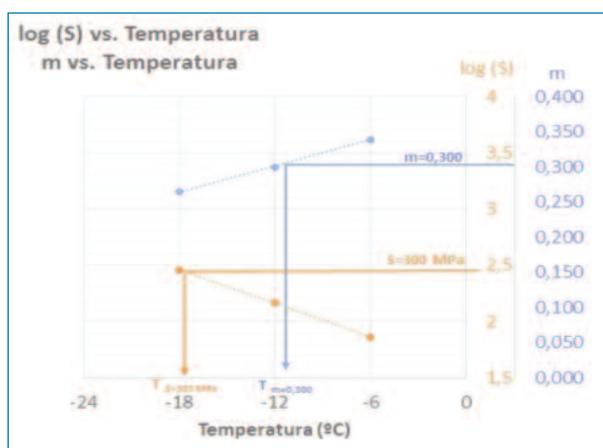


Gráfico 2: interpolación de parámetros en ensayo BBR

El ensayo se repite a diversas temperaturas en intervalos habituales de  $6^{\circ}\text{C}$ , lo cual permite trazar una relación de puntos de S y m a 60,0s frente a la temperatura de ensayo. Las temperaturas críticas a las que  $S=300\text{MPa}$  y  $m=0,300$  se obtienen mediante interpolación logarítmica y lineal respectivamente.

Cuando se diseñó este ensayo, se identificaron como parámetros críticos relacionados con el modo de fallo, los valores de S y m obtenidos a la temperatura real de servicio mediante aplicación de carga durante 2 horas. Para reducir el tiempo de ensayo y mejorar la operatividad en el laboratorio, se optó por reducir el tiempo de aplicación del esfuerzo a 60s y aumentar la temperatura del ensayo en  $10^{\circ}\text{C}$  basándose en el principio de superposición de tiempo-temperatura.

De esta manera, a diferencia de las temperaturas relacionadas con el fallo por fatiga o por deformación plástica, la temperatura reportada mediante el ensayo de BBR es  $10^{\circ}\text{C}$  superior a la temperatura real de servicio por debajo de la cual hay riesgo de fisura térmica.

## 5. Valores típicos de los principales ligantes españoles

Se han determinado las propiedades reológicas recogidas en la especificación EN 12591 sobre una población representativa de los betunes para pavimentación de grado 35/50 y 50/70 producidos en el territorio español. Las muestras han sido analizadas en tres laboratorios diferentes.

Los resultados obtenidos se presentan en la tabla y gráfico siguientes en forma de valor medio e intervalo de resultados obtenidos para cada grado de betún.

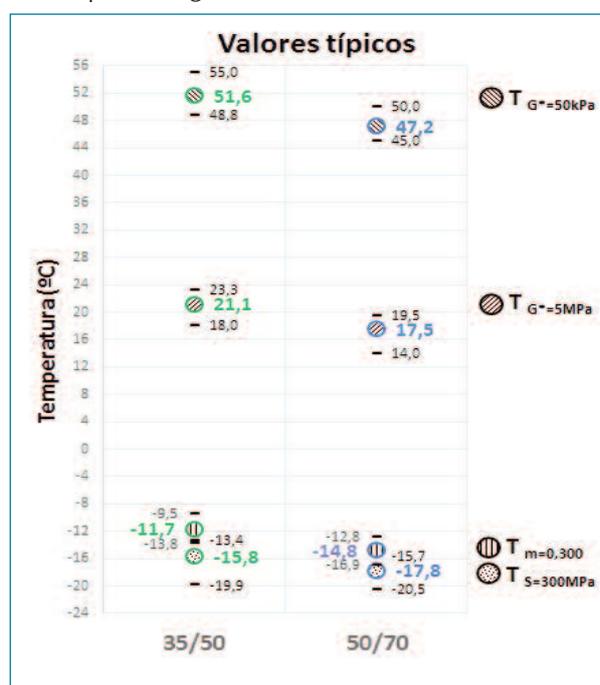


Gráfico 3: Valores medios e intervalos de parámetros reológicos en betunes 35/50 y 50/70 españoles

### 5.1 Comportamiento respecto al fallo por deformaciones plásticas o roderas (temperaturas altas)

En el Gráfico inferior se representa el valor de  $\log(G^*)$  en el rango de temperaturas altas de servicio ( $40-80^{\circ}\text{C}$ ) de ambos grados.

En general, un betún 50/70 cumple el criterio límite de  $G^*=50\text{kPa}$  a temperaturas inferiores que un betún 35/50 y a igualdad de temperaturas altas de servicio presenta una menor resistencia a la deformación plástica (mayor riesgo de formación de roderas).

Sin embargo, en el Gráfico 4 se puede observar que es posible que en algún caso concreto llegue a darse la situación de

# Reología de los ligantes españoles en el contexto de la nueva versión de la norma EN 12591

que un betún más blando presente un comportamiento ante las deformaciones plásticas igual o incluso mejor que un ligante de menor penetración original. Este comportamiento no se podría detectar mediante las características convencionales.

Los betunes 35/50 y 50/70 presentan valores de  $\delta$  similares a la temperatura a la que se cumple el criterio  $G^*=50\text{kPa}$ , indicando que su capacidad de relajación de tensiones es similar.

Propiedad		Norma de ensayo	35/50		50/70	
			Promedio	Rango	Promedio	Rango
<b>Ensayos tras envejecimiento a corto plazo (EN 12607-1):</b>						
TG*=5MP(a)	°C	EN 14770	21,1	18,0-23,3	17,5	14,0-19,5
$\delta_a$ TG*=5MP(a)	°	EN 14770	47,1	41,5-51,3	48,4	42,0-53,0
TG*=50kP(a)	°C	EN 14770	51,6	48,8-55,0	47,2	45,0-50,0
$\delta_a$ TG*=50kP(a)	°	EN 14770	69,0	61,7-73,3	70,7	61,5-76,0
<b>Ensayos tras envejecimiento a corto plazo (EN 12607-1):</b>						
TG*=5MP(a)	°C	EN 14771	-15,8	-19,9/-13,4	-17,8	-20,5/-15,7
$\delta_a$ TG*=5MP(a)	°C	EN 14771	-11,7	-9,5/-13,8	-14,8	-16,9/76,0

Tabla 3: Resultados obtenidos en ligantes españoles 35/50 y 50/70

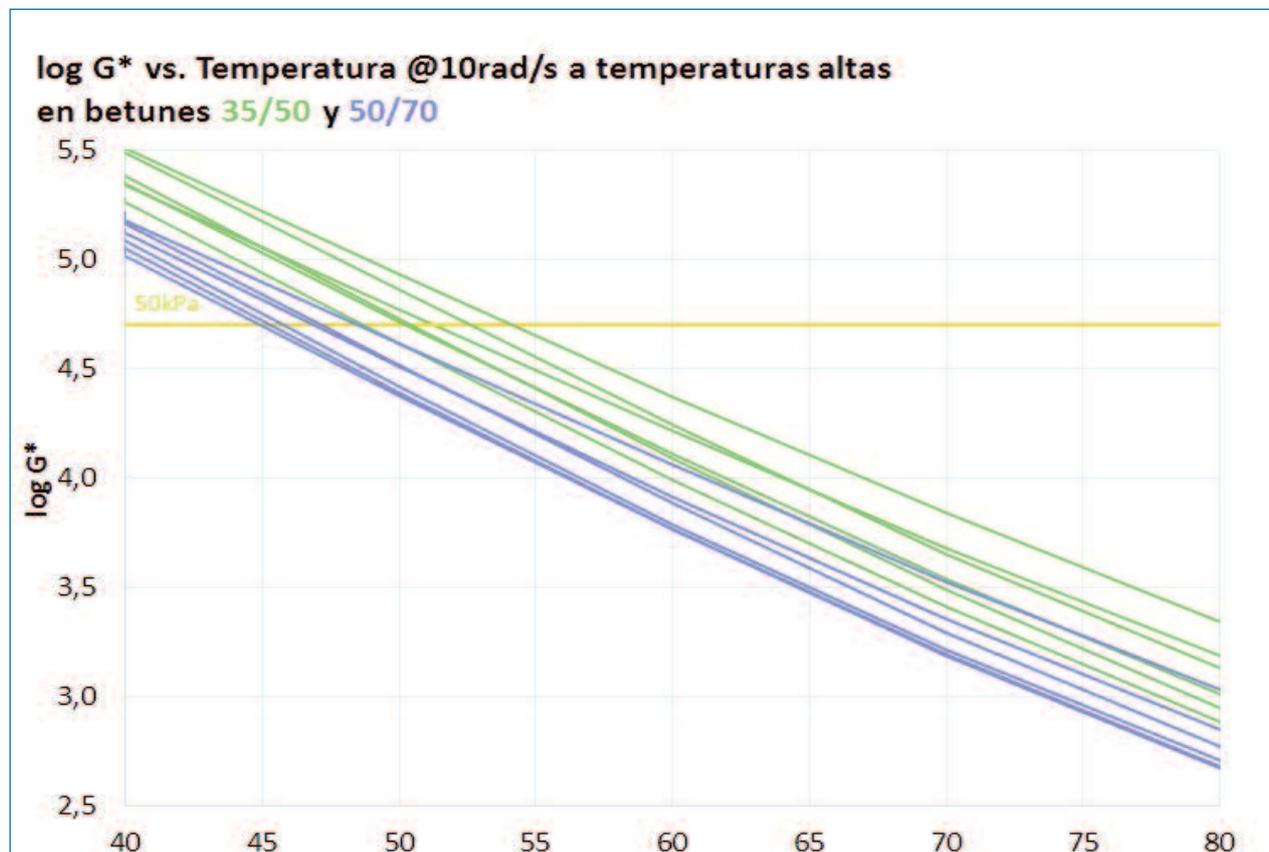


Gráfico 4: Módulo complejo ( $G^*$ ) vs temperatura (intervalo de temperaturas altas)

### 5.2 Comportamiento respecto al fallo por fatiga (temperaturas medias)

Al representar el valor de  $\log(G^*)$  en el rango de temperaturas intermedias de servicio (10-40°C) para distintas muestras de betún 35/50 y 50/70 se observa que generalmente un betún 50/70 cumple el criterio límite de  $G^*=5\text{MPa}$  a temperaturas inferiores que un betún 35/50. Este hecho indica que generalmente un betún 50/70 soporta una menor temperatura media de servicio que un betún 35/50, si bien las diferencias son pequeñas y puntualmente podría darse el caso de comportamiento similar a un 35/50.

Sin embargo, los valores de  $\delta$  a la temperatura crítica son similares en ambos grados, indicando que ambos ligantes tienen una componente elástica similar a esa temperatura, que traduce en una capacidad de relajación similar.

rango de temperaturas bajas de servicio (-6 a -18°C) para distintas muestras de betún 35/50 y 50/70

En general, un betún 50/70 alcanza el valor límite de  $m=0,300$  a temperaturas inferiores que un betún 35/50 y a igualdad de temperaturas bajas de servicio presenta una mayor capacidad de disipar la energía (menor riesgo de fisuración térmica).

Sin embargo el rango de temperaturas a las que se alcanza el valor límite de  $S=300\text{MPa}$  es similar en ambos grados de betún, indicando que el envejecimiento a largo plazo prácticamente no discrimina entre grados de betún y que tras años de servicio ambos tipos de ligante presentan una rigidez similar.

Es de remarcar que los betunes estudiados, independientemente del grado de penetración, presentan una  $T_m=0,300$  superior a la  $T_S=300\text{MPa}$ . Este hecho indica que los ligantes analizados son más sensibles al punto crítico del valor de  $m$  que el

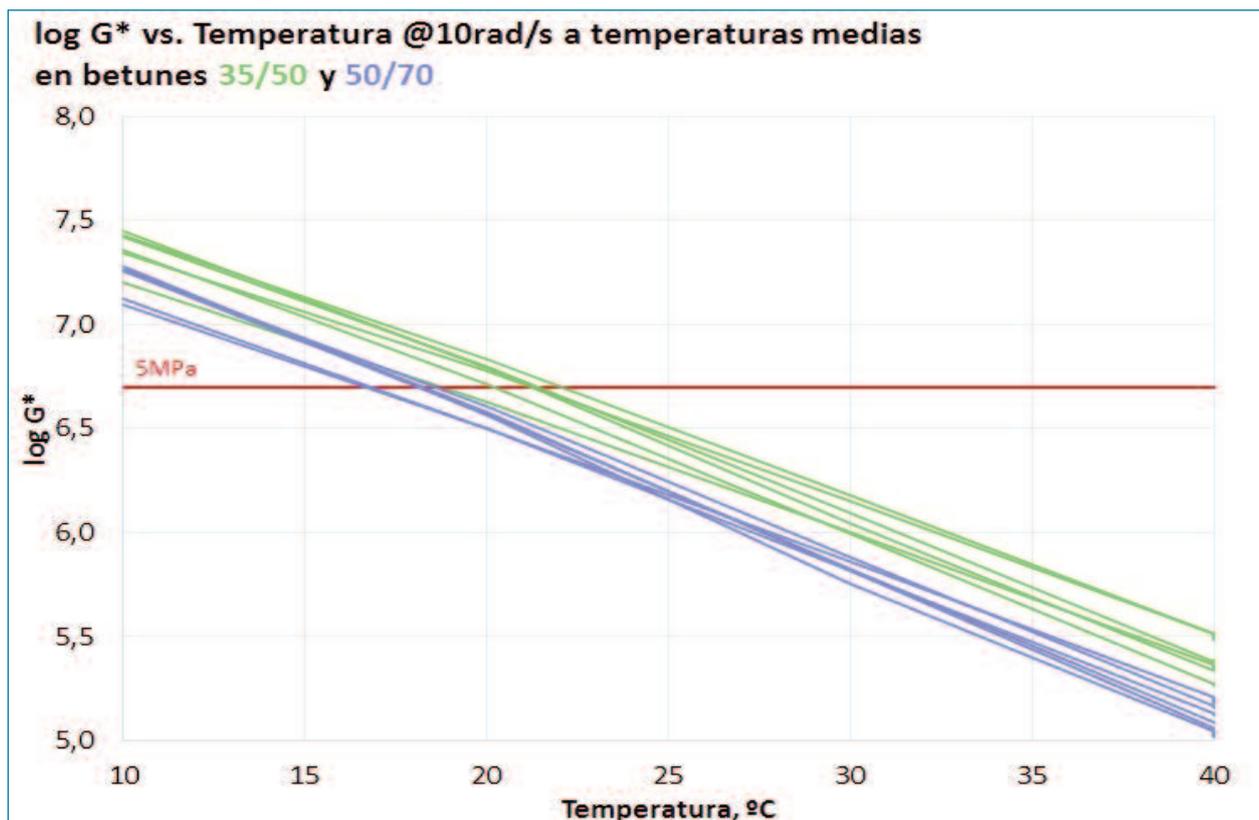


Gráfico 5: Módulo complejo ( $G^*$ ) vs temperatura (intervalo de temperaturas medias)

### 5.3 Comportamiento respecto al fallo por fisuración térmica (temperaturas bajas)

En los gráficos 6 y 7 se representan los valores de  $S$  y  $m$  en el

de  $S$ , y por tanto la fractura ocurre por llegar al límite de la capacidad de disipación y no por rigidez del ligante.

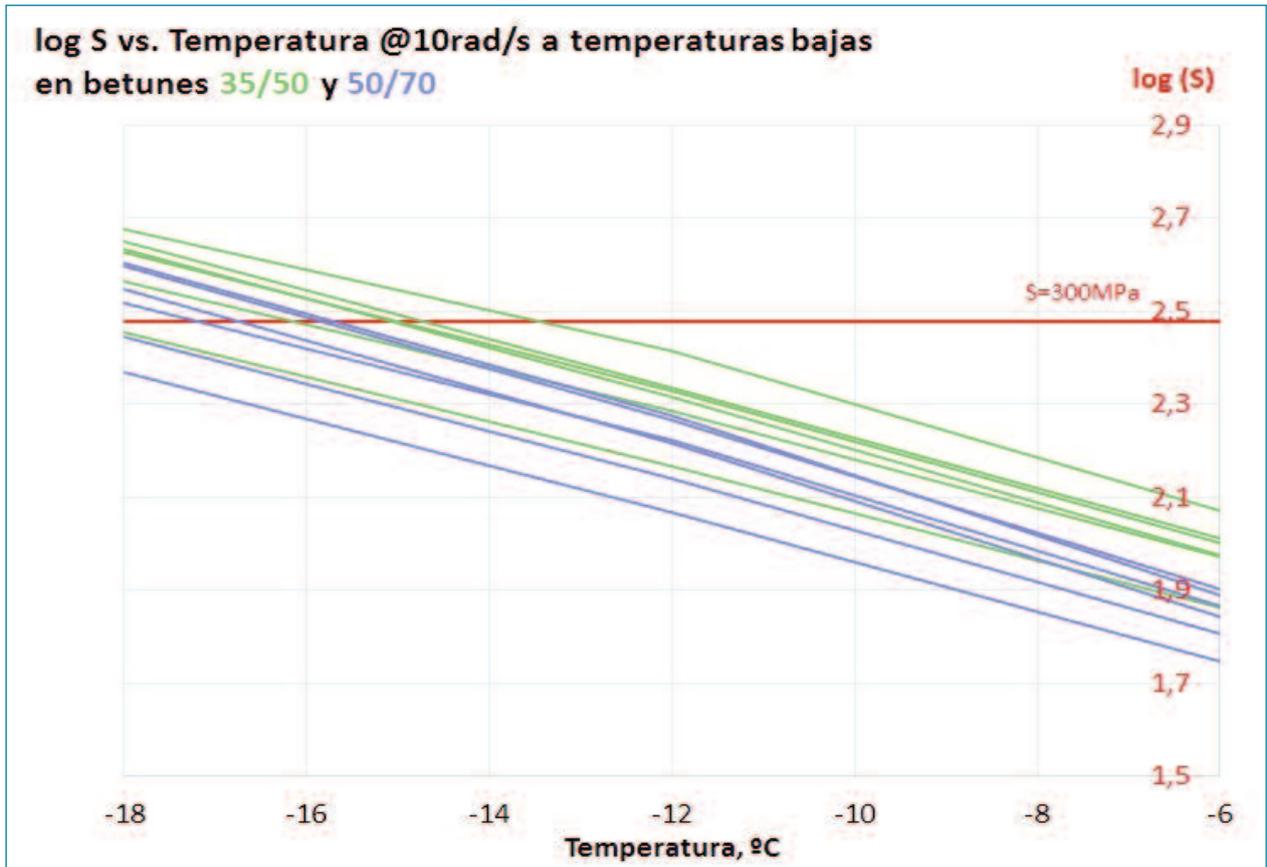


Gráfico 6: Rigidez (log S) vs temperatura

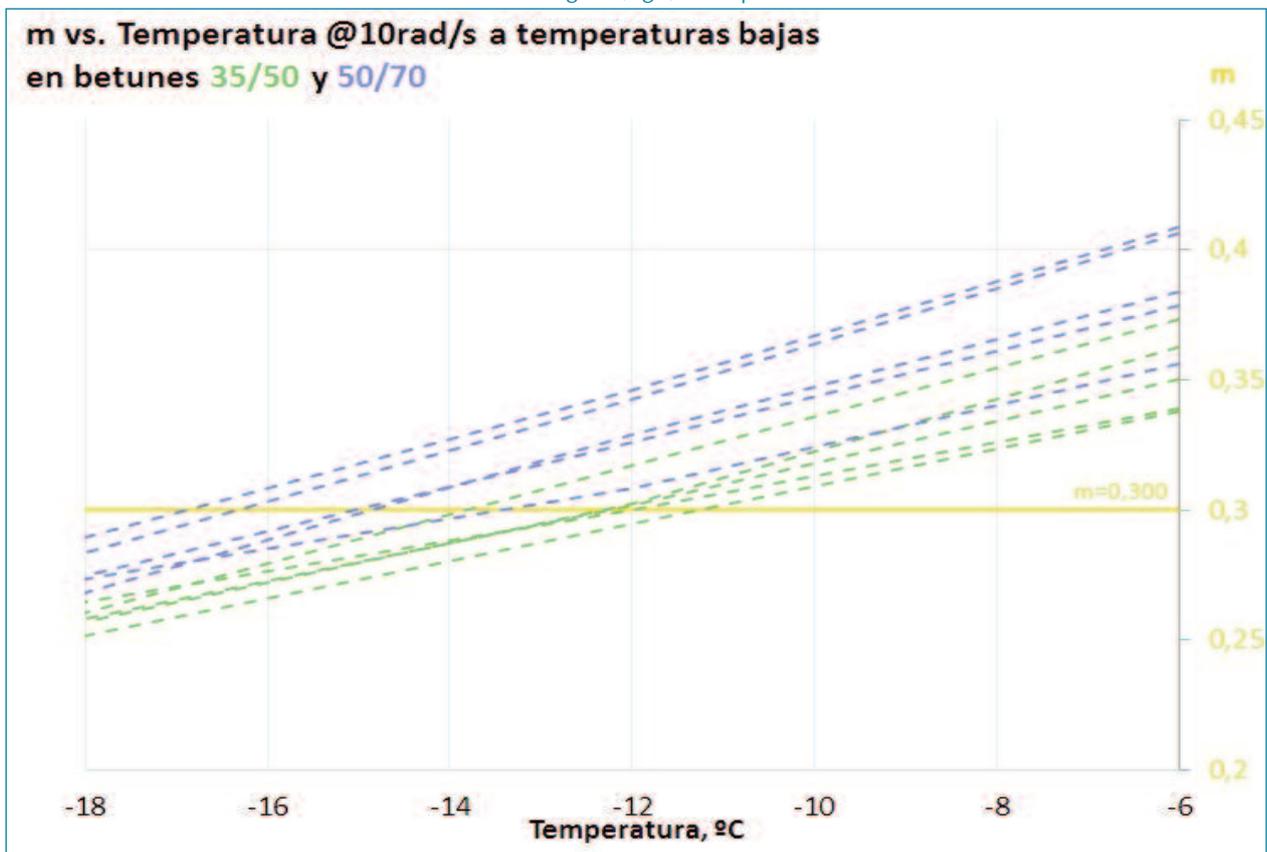


Gráfico 7: Velocidad de relajación (m) vs temperatura

## 6. Conclusiones

- Actualmente hay un interés por definir nuevas propiedades de los ligantes que permitan determinar propiedades prestacionales que las características convencionales no alcanzan a describir. Las especificaciones europeas de ligantes bituminosos están incluyendo en su última revisión un conjunto de propiedades prestacionales informativas que permiten al sector empezar a familiarizarse con ellas.
- Las técnicas reológicas evalúan el comportamiento viscoelástico del betún simulando las condiciones reales (esfuerzos de cizalla y flexión y temperatura del pavimento) permitiendo así correlacionar los parámetros medidos con los modos de fallo del pavimento, no predecibles mediante los ensayos convencionales. Además, a diferencia de las propiedades convencionales, las propiedades prestacionales evalúan el comportamiento del ligante tras años de servicio.
- Las temperaturas a las que se cumplen los criterios de  $G^* = 5$  MPa (relacionado con la fatiga),  $G^* = 50$  kPa (relacionado con la resistencia a la formación de rodadas) y  $S = 300$  MPa y  $m = 0,300$  (relacionado con la resistencia a fisuración térmica) son superiores en los betunes 35/50 que en los 50/70. Sin embargo, la contribución elástica ( $\delta$ ) a la resistencia a la deformación es similar en ambos grados.
- Atendiendo a los criterios relacionados con la fisuración térmica a bajas temperaturas de servicio, no cabe esperar que los betunes Españoles fallen debido a su rigidez. Su comportamiento a bajas temperaturas está limitado por su capacidad de disipación de energía.
- En el futuro, las propiedades reológicas pueden llegar a permitir la definición de criterios de selección del betún para cada aplicación concreta considerando las condiciones de exposición y uso (condiciones ambientales, categoría de tráfico, etc.) del material, contribuyendo así a optimizar el diseño de las mezclas asfálticas.

## 7. Bibliografía

- [1] H.U. Bahia, D.A. Anderson. "The new proposed rheological properties of asphalt binders: why are they required and how do they compare to conventional properties". Physical properties of cement binders ASTM STP 1241, John C. Hardin Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia 1995
- [2] G. Schramm. "A practical approach to rheology and rheometry". Gebrueder Haake. 1998.
- [3] Eurobitume workshop 99. "Performance properties for bituminous binders". Luxemburgo, 1999.
- [4] Thoma W. Kennedy. "Testing and specifying Superpave binders". Technical workshop on new specifications for bituminous products, El programa SHRP y las Normativas Europeas ponencias, Barcelona 1995
- [5] CEN EN 12591 Especificaciones de betunes para pavimentación
  - Normas de ensayo:
    - UNE EN 14769:2012 Acondicionamiento por envejecimiento a largo plazo acelerado usando un recipiente de envejecimiento a presión (PAV)
    - UNE EN 14770:2012 Determinación del módulo complejo de corte y del ángulo de fase usando un reómetro de corte dinámico [(Dynamic Shear Rheometer (DSR)]
    - UNE EN 14771:2012 Determinación de la resistencia a la flexión. Reómetro de flexión (BBR)
- [7] Ilustración 1 obtenida de <https://www.pavementinteractive.org>
- [8] Ilustración 2 obtenida de <http://www.radiosieve.it>
- [9] Ilustración 3 obtenida de "Evaluation of Low-Temperature Cracking Performance of Asphalt Pavements Using Acoustic Emission: A Review".
- [10] Ilustración 4: <http://rahabitumen.com>
- [11] Imágenes ensayos reológicos (ilustraciones 5, 7 y 8): <http://www.pavementinteractive.org>