

**74-01-2013**

**ESTUDIO DEL ENVEJECIMIENTO EN LABORATORIO DE LIGANTES  
BITUMINOSOS. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS  
CON DIFERENTES ENSAYOS  
ESTUDO DO ENVELHECIMENTO DOS LIGANTES BETUMINOSOS NO  
LONGO PRAZO. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM  
DIFERENTES ENSAIOS**

Verónica Contreras Ibáñez  
Centro de Tecnología Repsol  
España  
contreras.ibanez.veronica@repsol.com

Ignacio Pérez Barreno  
Cepsa-Proas  
España  
ignacio.perez@cepsa.com

Josep Torres Estrada  
Asesa  
España  
jtorres@asesa.es

Antonio Páez Dueñas  
Centro de Tecnología Repsol  
España  
apaezd@repsol.com

## **Resumen**

En los últimos tiempos existe un interés creciente en la normalización de ensayos para evaluar el envejecimiento de los ligantes bituminosos. Fruto de este interés se han realizado notables esfuerzos que han puesto a punto distintas alternativas.

En este trabajo se presenta un estudio que compara los resultados obtenidos con algunas de esas alternativas sobre betunes de destilación directa o straight run de diferente origen y en tres laboratorios distintos.

En el trabajo se ha estudiado, por una parte, la influencia de la variación de la temperatura de acondicionamiento en el envejecimiento a corto plazo comparando los resultados del ensayo de película fina y rotatoria (RTFOT, EN12607-1) a 163°C y en condiciones de equiviscosidad.

Además se han comparado diferentes métodos de envejecimiento a largo plazo propuestos en la bibliografía, envejecimiento a largo plazo acelerado usando recipiente de envejecimiento a presión (PAV, EN 14769), triple tiempo de RTFOT (3 x RTFOT) y RTFOT modificado empleado en Reino Unido (RTFOT UK)

En los dos primeros casos los ligantes residuales se han estudiado utilizando tanto ensayos convencionales como reológicos, determinación del módulo de corte complejo  $G^*$  y del ángulo de fase  $\delta$  (DSR, EN 14770) y determinación de la resistencia a la flexión (BBR, EN 14771).

Los resultados obtenidos muestran una influencia muy significativa del origen del betún que debe tenerse en cuenta a la hora del desarrollo de las especificaciones.

Los resultados obtenidos en el envejecimiento a corto plazo muestran que, a efectos de comparar la resistencia al envejecimiento a corto plazo de este tipo de materiales, el uso de una temperatura universal de acondicionamiento es adecuado y facilita la realización del ensayo.

Los ensayos de PAV y 3 x RTFOT han dado resultados similares, aunque no idénticos mientras que el RTFOT UK se ha mostrado como un ensayo muy complejo de realizar.

## Resumo

Nos últimos tempos, há um interesse crescente na padronização ensaios para avaliar o envelhecimento dos ligantes betuminosos. Resultado deste interesse fizeram esforços consideráveis atentos alternativas. Neste artigo, apresentamos um estudo comparando os resultados obtidos com algumas destas alternativas betume corrida em linha reta ou em linha reta correr de origem diferente e em três laboratórios diferentes.

No trabalho tem estudado um lado, a influência da variação de temperatura no condicionamento do envelhecimento resultados a curto prazo de teste comparando a película fina e rotativo (RTFOT, EN12607 -1) a 163 ° C e condições equiviscosidad.

Além disso, comparando propostos vários métodos de envelhecimento a longo prazo, na literatura, a longo prazo, o envelhecimento acelerado utilizando pressão do vaso de envelhecimento (PAV, EN 14769), RTFOT tempo tripla (3 x RTFOT) e modificado empregue RTFOT Unido (RTFOT UK).

Nos dois primeiros casos, os ligantes residuais têm sido estudados utilizando ambos os ensaios, como a determinação da reologia de cisalhamento complexo  $G^*$ , e ângulo de fase  $\delta$  (DSR, NA 14770) e determinação da resistência à flexão (BBR, IN 14771).

Os resultados mostram uma significativa influência da origem do betume a ser tida em conta quando o desenvolvimento das especificações.

Os resultados obtidos no termo envelhecimento mostra curtos que, a fim de comparar a resistência a curto prazo de envelhecimento destes materiais, a utilização de um condicionamento da temperatura é apropriada universal e facilita os testes.

Testes e PAV 3 x RTFOT deram resultados semelhantes, embora não idênticas, enquanto RTFOT Unido provou ser um teste muito complexa realizada.

## INTRODUCCION

Últimamente existe un interés creciente en el estudio del envejecimiento a largo plazo en servicio de las mezclas bituminosas. Fruto de este interés se están desarrollando ensayos que pretenden simular las propiedades que tendrían los ligantes asfálticos después de un tiempo determinado en servicio.

En Europa este interés se ve acrecentado por el inicio del período de revisión de la Norma EN 12591 (Especificaciones de Betunes para Pavimentación) y la pertinencia o no de incluir un ensayo para la simulación del envejecimiento a largo plazo. Además de por el posible desarrollo de Especificaciones Prestacionales para los denominados ligantes complejos (fundamentalmente betunes modificados).

El primer ensayo normalizado y que formó parte de una especificación fue el Pressure Aging Vessel, PAV (CEN. EN 14769). Mediante este ensayo, se simula el envejecimiento del ligante después de un tiempo de Servicio de 7 a 10 años. Este ensayo está ampliamente difundido y forma parte de numerosas especificaciones a lo largo de todo el mundo, aunque no de las Especificaciones Europeas de betunes y betunes modificados. Sin embargo si se encuentra recogido como método de envejecimiento del residuo de emulsiones bituminosas.

Posteriormente, y en el Laboratorio de Carreteras de Bélgica, se desarrolló el ensayo Rotating Cylinder Ageing Test, RCAT (EN 15323) (CEN. EN 15323). Mediante este ensayo se simula el envejecimiento de los betunes después de 20 años de servicio (A.Verhasselt et al.,2003). Este ensayo está Normalizado por el Comité Europeo de Normalización. Frente al PAV presenta la ventaja de que no necesita una primera etapa de envejecimiento, el denominado envejecimiento a corto plazo. Además y desde un punto de vista práctico, se utilizan mayores cantidades de ligante lo que lleva a que solamente sea realice un ensayo cuando se necesiten grandes cantidades de muestra. A pesar de los esfuerzos realizados tanto en su desarrollo como en su Normalización existen muy pocos laboratorios en el mundo equipados para realizar este ensayo, lo que lo descarta a corto plazo como candidato a formar parte de las especificaciones.

Últimamente desde los laboratorios austríacos se ha propuesto un nuevo ensayo de envejecimiento a largo plazo. El ensayo consiste en realizar el procedimiento RTFOT durante tres veces seguidas (225 minutos). Según sus autores, los resultados obtenidos son los equivalentes a los obtenidos en el ensayo PAV sobre los mismos betunes.

Previamente a los ensayos a largo plazo, el betún se somete a ensayos de acondicionamiento o ensayos de envejecimiento a corto plazo. De entre todos los posibles, actualmente las tendencias se decantan por el RTFOT que forma parte tanto de las especificaciones europeas como norteamericanas. Puesto que este ensayo también se utiliza para los betunes modificados con polímeros, en el Reino Unido (Clause 955. UK) se propuso una variante exclusivamente para los betunes modificados con polímeros.

La razón por la que el ensayo de RTFOT (EN 12607-1) ha sido aceptado en las especificaciones europeas es porque simula el envejecimiento al que se ve sometido el ligante durante todos los procesos hasta la puesta en obra. Puesto que el ensayo se desarrolló para los betunes convencionales no se tienen resultados de correlación con otro tipo de betunes como los modificados con polímeros o los de baja temperatura de extendido.

Sin embargo, la puesta en obra a otras temperaturas que las utilizadas en las mezclas convencionales tanto de los betunes modificados con polímeros como los de baja temperatura de extendido, ha hecho que se proponga una variación de la temperatura del ensayo dependiendo de la de la puesta en obra. En este caso puede argumentarse que un ensayo de envejecimiento realizado a 163°C no representa el envejecimiento que sufre un ligante que se ha puesto en obra a 120°C. Puesto que las temperaturas de puesta en obra se relacionan con la viscosidad del ligante, se ha propuesto que el ensayo de RTFOT no se realice a 163°C si no a una temperatura de equiviscosidad que se defina. Esto en la práctica significaría que en el caso de betunes modificados el ensayo se realizaría por encima de 163°C, mientras que en los betunes de baja temperatura de extendido, se realizaría por debajo de esta temperatura.

Para tratar de dar respuesta a algunas de las interrogantes planteadas anteriormente, se planteó un trabajo para evaluar los diferentes resultados obtenidos con los diferentes ensayos de envejecimiento a largo plazo. Adicionalmente se evaluó la influencia del sistema de acondicionamiento. Por último, también se estudió la adaptación de los ensayos RTFOT al sistema de equiviscosidades.

El objetivo final de este documento es poder aportar datos sobre el comportamiento de diferentes betunes españoles cuando se ven sometidos a los diferentes ensayos para simular un mismo comportamiento.

## **PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

### **Determinación de la resistencia al envejecimiento por efecto del calor y del aire. RTFOT a temperatura de isoviscosidad de 200 cP**

En el proceso de fabricación de la mezcla, el betún es sometido a altas temperaturas, así como durante el almacenamiento, a temperatura menor, pero constante. Posteriormente a la aplicación también es habitual que el betún sufra cierto grado de oxidación por el aire que será más intensa en la media que las temperaturas a las que esté expuesto sean mayores. El ensayo RTFOT a 163°C simula el efecto de envejecimiento del betún en el momento de fabricación de mezclas bituminosa. Dependiendo del tipo de mezcla y del tipo de betún la temperatura de mezcla, y por tanto la temperatura a la cual se encuentra el ligante, varía. Puesto que la temperatura de fabricación de mezcla está directamente relacionada con la viscosidad del ligante, con el ensayo de RTFOT a temperatura de isoviscosidad a 200cP se pretende simular el efecto de envejecimiento en fabricación de mezcla en función de la viscosidad habitual del ligante en el momento de la mezcla, siendo la temperatura a la que se realiza el ensayo diferente para cada tipo ligante. De esta forma se realiza curva de viscosidad del betún y se obtiene la temperatura correspondiente a 200cP.

### **Determinación de la resistencia al envejecimiento por efecto del calor y del aire. RTFOT a triple tiempo (3 x RTFOT)**

Los laboratorios austriacos iniciaron un proyecto de investigación cuyo objeto era la evaluación del envejecimiento de las mezclas asfálticas. En este proyecto al betún se le sometió a diferentes tipos de ensayos entre los que se encontraba el ensayo de RTFOT a 163°C con diferentes tiempos: 75 minutos, 150 minutos y 225 minutos. Según sus autores, los resultados obtenidos a triple tiempo son los equivalentes a los obtenidos en el ensayo PAV sobre los mismos betunes. La realización del ensayo de RTFOT a 225 minutos se denominará RTFOT a triple tiempo (3 x RTFOT).

### **Determinación de la resistencia al envejecimiento por efecto del calor y del aire. Método RTFOT Modificado (Reino Unido) (Clause 955. UK)**

La variante respecto al RTFOT de la norma europea EN 12607-1, consiste en el empleo de tubos de PTFE (politetrafluoroetileno, teflón) en lugar de tubos de vidrio y con un tornillo de acero inoxidable en su interior que aceleraría el proceso de envejecimiento. Consta de dos etapas, una primera en el que tiempo de ensayo es de 45 minutos a 163°C para realizar la determinación de variación de masa. En la segunda etapa, la temperatura de ensayo para el envejecimiento será de 145°C. Se definen tres tiempos de ensayo: 4 horas, 8 horas y 22 horas. Siendo denominado como “Ligante Envejecido” la muestra recogida a las 8 horas. Además, la masa a pesar en cada uno de los tubos es de 19 gramos, en lugar de los 35 gramos que indica la norma EN 12607-1.

## **Determinación de las propiedades reológicas**

Se ha determinación del módulo complejo ( $G^*$ ) y el ángulo de fase  $\delta$  a diferentes temperaturas y frecuencias utilizando el DSR (Dynamic Shear Rheometer, EN 14770).

Se han realizado barridos de frecuencia de 0,1 Hz a 10 Hz a cada una de las siguientes temperaturas: 10°C, 20°C, 30°C, 40°C, 50°C, 60°C, 70°C y 80°C.

El barrido de frecuencias para las temperaturas altas de servicio (40°C a 80°C) se ha realizado con el plato de 25mm y un espesor de muestra de 1mm entre platos paralelos.

El barrido de frecuencias para las temperaturas intermedias de servicio (10°C a 40°C) se ha realizado con el plato de 8mm y con un espesor de muestra de 2mm entre platos paralelos.

Además se ha realizado determinación de la resistencia a la flexión (EN 14771), empleando un reómetro de flexión (BBR, Bending Beam Rheometer). El reómetro de flexión de viga se usa para medir la deflexión en el punto medio, de una viga de ligante bituminoso apoyada en tres puntos. Se aplica una carga constante (comprendida entre 930mN y 1.030mN) en el punto medio de la probeta de ensayo, durante un tiempo de carga definido (240 segundos) y se mide la deflexión en función del tiempo. El módulo de rigidez (S) de la probeta de ensayo para los tiempos específicos de carga se calcula a partir de la tensión a flexión y la deformación.

## **ENVEJECIMIENTO A CORTO PLAZO**

El envejecimiento a corto plazo en los ligantes bituminosos se asocia habitualmente al que sufren estos materiales durante la fabricación y extendido de las mezclas bituminosas, justo antes de la entrada en servicio de las carreteras (C.A. Bell y BiTVal Project, 2006).

Durante estos procesos, en los que el betún se encuentra a temperaturas elevadas y formando películas de espesor muy reducido, la relación superficie-volumen se incrementa quedando la mayor parte del material en contacto con el oxígeno del aire facilitándose así los procesos de oxidación y pérdida de compuestos ligeros y dando lugar a un cambio importante en las propiedades reológicas del material (C.A. Bell y BiTVal Project, 2006).

La existencia de estos procesos implica, por tanto, la existencia de una diferencia entre las propiedades del betún asfáltico utilizado en el proceso de mezcla y el que está en la mezcla asfáltica cuando comienza la vida útil de la misma, al acabar su extendido y compactación.

El ensayo de película fina y rotatoria RTFOT es el recogido actualmente en las especificaciones europeas para evaluar este acondicionamiento que sufre el ligante durante la fabricación de la mezcla asfáltica.

Sin embargo, este ensayo es tan sólo un mero método de acondicionamiento siendo necesario estudiar el cambio de distintas propiedades antes y después de la aplicación del ensayo para evaluar el efecto del mismo en los diferentes betunes. En el caso de las especificaciones europeas estas propiedades son: variación de masa, penetración retenida e incremento del punto de reblandecimiento.

El acondicionamiento de la muestra para su estudio se realiza a 163 °C lo que permite comparar el envejecimiento de diferentes ligantes con independencia de su temperatura real de puesta en obra. Sin embargo, en los últimos tiempos, con la aparición de los betunes de baja temperatura (a. Bardesi. I. Pérez, 2007), que tienen temperaturas de mezcla y puesta en obra entre 30 °C y 40 °C

inferiores a las de los betunes habituales, se ha abierto el debate sobre la necesidad de realizar este ensayo a la temperatura real de uso de los mismos.

Con el fin de estudiar la influencia de este cambio de temperatura en los resultados del ensayo, en este trabajo hemos realizado el acondicionamiento de tres ligantes 50/70 de distintos orígenes tanto a 163°C como a la temperatura a la que estos betunes tienen una viscosidad de 200 mPa•s, y que habitualmente se relaciona con la temperatura de mezcla de ligantes convencionales.

Sobre los ligantes originales y los residuos obtenidos a las diferentes temperaturas se ha medido la variación de masa y distintas propiedades mediante ensayos empíricos (penetración, EN 1426 y punto de reblandecimiento, EN 1427) y reológicos (determinación del módulo complejo ( $G^*$ ) y el ángulo de fase  $\delta$  a diferentes temperaturas y frecuencias utilizando el DSR, EN 14770).

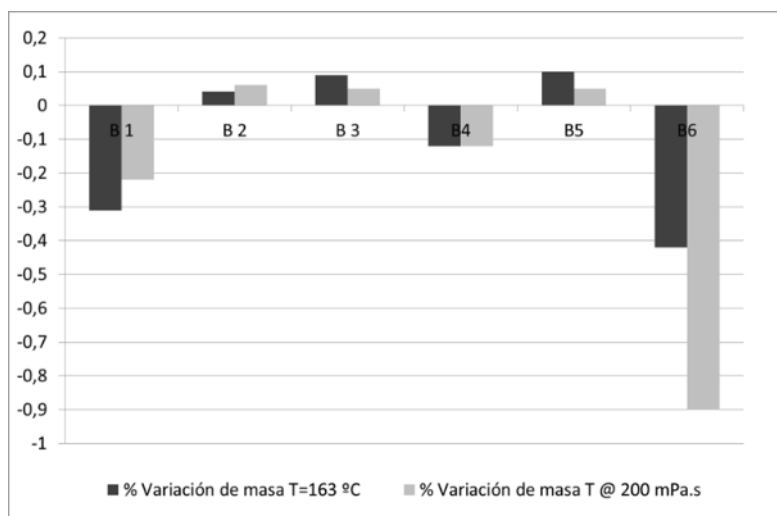
En la Tabla 1 se puede ver un resumen de los resultados obtenidos en la caracterización empírica de los betunes estudiados.

Cuando el acondicionamiento se produce a la temperatura de 163°C recogida en las especificaciones, los ligantes B1, B4 y B6 sufren una variación de masa negativa, lo que indica una pérdida de masa producida por la pérdida de compuestos ligeros, mientras los otros tres ligantes muestran una ganancia de masa que puede atribuirse a procesos de oxidación ( ).

**Tabla 1. Resumen resultados envejecimiento a corto plazo**

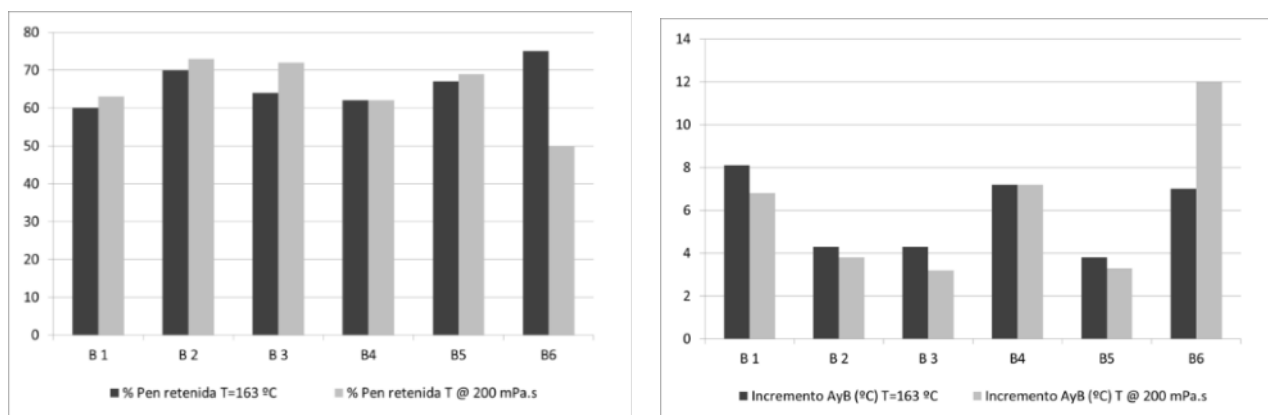
Ligante original			50/70			35/50		15/25	
			B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Penetración a 25 °C	EN 1426	0,1 mm	63	60	61	37	36	20	14
Punto de reblandecimiento	EN 1427	°C	51,5	48	47,3	56,4	53,5	62,4	60
Índice de penetración	Anexo A EN 12591	-	-0,2	-1,3	-1,4	-0,4	-1,1	-0,4	-1,4
<b>Ligante envejecido RTFOT 163 °C</b>									
Variación de masa	EN 12607-1	%	-0,31	0,04	0,09	-0,12	0,1	-0,42	0,02
Penetración a 25°C	EN 1426	0,1 mm	38	42	39	23	24	15	10
Penetración retenida	EN 1426	%	60	70	64	62	67	75	71,4
Punto de Reblandecimiento	EN 1427	°C	59,6	52,3	51,6	63,6	57,3	69,4	65
Incremento de Punto de Reblandecimiento	EN 1427	°C	8,1	4,3	4,3	7,2	3,8	7,0	5,0
<b>Ligante envejecido RTFOT @ 200mPa.s</b>									
Temperatura @ 200 mPa.s	-	°C	158	152	150	163*	157	180*	-
Variación de masa	EN 12607-1	%	-0,22	0,06	0,05	-0,12	+0,05	-0,9	-
Penetración a 25°C	EN 1426	0.1 mm	40	44	44	23	25	10	-
Penetración retenida	EN 1426	%	63	73	72	62	69	50	-
Punto de reblandecimiento	EN 1427	°C	58,3	51,8	50,5	63,6	56,8	74,4	-
Incremento de Punto de Reblandecimiento	EN 1427	°C	6,8	3,8	3,2	7,2	3,3	12	-

\*Temperatura máxima de calentamiento de la estufa. Corresponde a T @ 216 mPa.s



**Figura 1 Variación de masa de los betunes después de envejecimiento a corto plazo**

Esta diferencia de comportamiento se constata también cuando se comparan los valores de penetración retenida y de incremento de punto de reblandecimiento entre betunes del mismo tipo, observándose en el caso de los betunes B1 (35/50) y B4 (50/70) una menor penetración retenida y un mayor incremento del punto de reblandecimiento frente a los observados en los ligantes B2 , B3 (50/70) y B5 (35/50), lo que indica un mayor efecto del proceso de acondicionamiento en los betunes B3 y B4 frente a los ligantes B2, B3 y B5 (Figura 2).



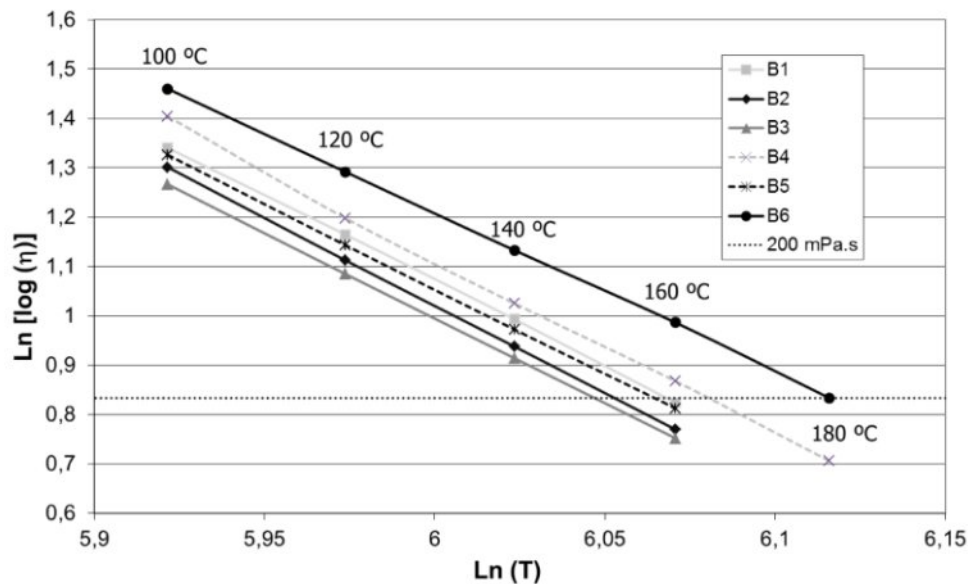
**Figura 2 Propiedades de los betunes después de envejecimiento a corto plazo**

Puesto que la temperatura de fabricación de mezcla está directamente relacionada con la viscosidad del ligante, con el ensayo de RTFOT a temperatura de equiviscosidad a 200 (T@200 mPa•s) se pretende simular el efecto de envejecimiento en fabricación de mezcla en función de la viscosidad habitual del ligante en el momento de la mezcla, siendo la temperatura a la que se realiza el ensayo diferente para cada tipo ligante.

La menor susceptibilidad térmica de los ligantes B1 y B4, con índices de penetración entre -0,2 y -0,4 se traduce en una mayor temperatura de equiviscosidad (158°C y 163 °C) frente a las obtenidas para los ligantes B2, B3 y B5 (152°C, 150°C y 157 °C respectivamente) y que presentan una mayor susceptibilidad térmica con índices de penetración entre -1,1 y -1,4 cercanos



al -1,5 establecido como límite inferior en las especificaciones españolas. En el caso del B6, al tratarse de un betún de alto módulo, la temperatura de equiviscosidad es muy alta, superior a los 180 °C que admite el equipo de RTFOT, por lo que el acondicionamiento se realizó a esa temperatura a la que el ligante B6 tiene una viscosidad de 216 mPa.s, en lugar de los 200 mPa.s previstos inicialmente.



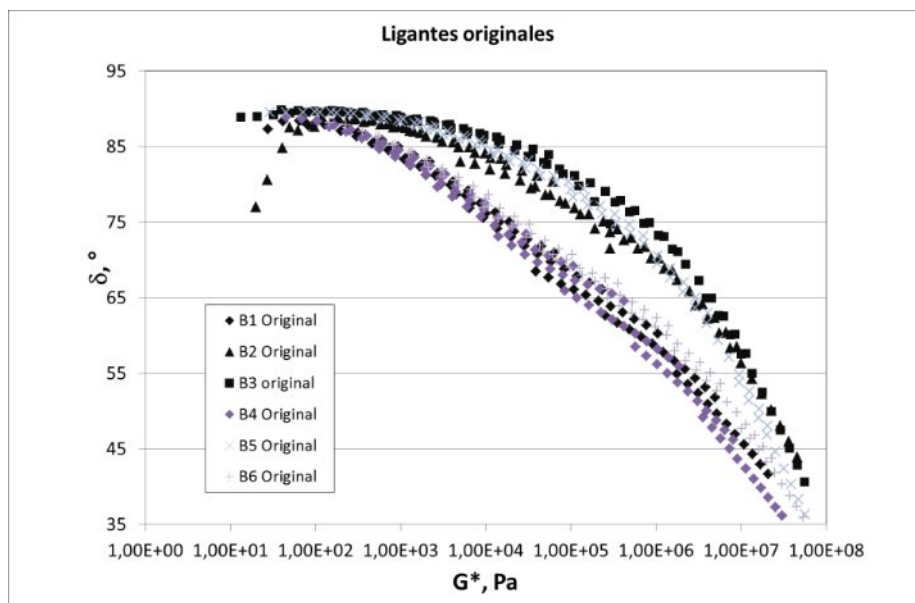
**Figura 3. Viscosidades**

Como era de esperar el uso de estas temperaturas de equiviscosidad (Figura 3) en el acondicionamiento de los ligantes tiene distinto efecto en función de la clase de betún utilizado. Así, en los B50/70 y B 35/50 el uso de estas temperaturas da lugar a pequeñas variaciones en los valores obtenidos pues el hecho de utilizar, en este caso, menores temperaturas implican una menor variación en las propiedades del ligante. Sin embargo las diferencias entre los diferentes ligantes permanecen prácticamente inalteradas, observándose, en los betunes estudiados, un comportamiento similar independientemente de la temperatura utilizada durante el acondicionamiento.

En el caso del B6, su alta consistencia implica un aumento de 17 °C en la temperatura de acondicionamiento, lo que se traduce en un drástico cambio en las propiedades del ligante envejecido, baja la penetración, sube el punto de reblandecimiento y aumenta la pérdida de masa, quedando todas estas propiedades fuera de las especificaciones recogidas en la EN 13924 para este tipo de productos. Esto implica, por tanto, que el uso de estas temperaturas de acondicionamiento supondría el cambio de los valores recogidos en las especificaciones actuales para que, betunes que actualmente las cumplen y que son utilizados de forma habitual en fabricación de mezclas asfálticas no quedaran fuera.

Estos resultados confirman que, a efectos de comparar la resistencia al envejecimiento a corto plazo de este tipo de materiales, el uso de una temperatura universal de acondicionamiento es adecuado y facilita la realización del ensayo frente al uso de una temperatura de equiviscosidad.

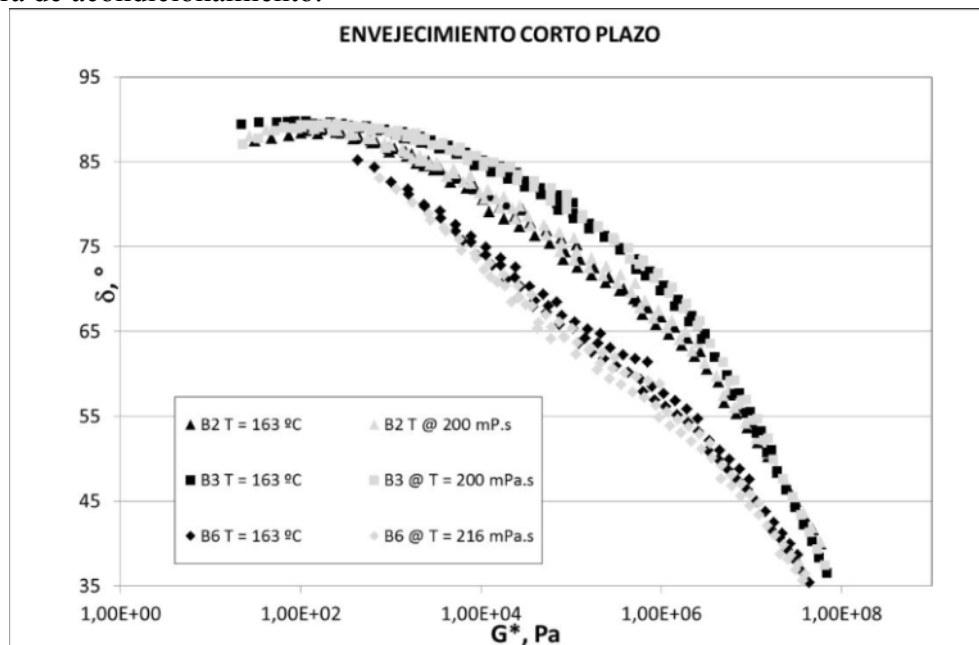
Cuando nos fijamos en las propiedades reológicas las conclusiones que se obtienen son similares. En la Figura 4 se muestra el diagrama de Black de los ligantes estudiados en estado original.



**Figura 4 Diagrama de Black de los betunes originales estudiados.**

En consonancia con su caracterización empírica, el ligante B1 es el que tiene menores ángulos para un mismo módulo, por lo que su gráfica aparece más a la izquierda y bastante separada de los otros dos ligantes que muestran un comportamiento más viscoso para un mismo valor de módulo.

En cuanto a los resultados de los residuos acondicionados a 163°C y a  $T @ 200 \text{ mPa.s}$  (Figura 5), en los ligantes más blandos, en los que la  $T @ 200 \text{ mPa.s}$  es inferior a 163 °C, sus curvas aparecen desplazadas a la derecha, indicando un menor envejecimiento ligado a esa menor temperatura de acondicionamiento.



**Figura 5 Diagrama de Black de los betunes estudiados con diferentes tipos de envejecimientos a corto plazo**

En el caso del B15/25, sin embargo, al ser  $T @ 200 \text{ mPa.s}$  superior a  $163^\circ\text{C}$  la curva se desplaza a la derecha, mostrando un mayor envejecimiento que el obtenido en condiciones normales de ensayo a  $163^\circ\text{C}$ .

Es importante constatar que la posición relativa de los distintos residuos acondicionados permanece constante, por lo que, como ya se concluía de los resultados de ensayos convencionales, el uso de una temperatura universal de acondicionamiento es adecuado y facilita la realización del ensayo de acondicionamiento.

## **ENVEJECIMIENTO A CORTO PLAZO**

En Europa para el envejecimiento a largo plazo en betunes asfálticos se está usando mayoritariamente un acondicionamiento previo de la muestra según el ensayo de RTFOT seguido del envejecimiento a largo plazo mediante un recipiente a. El ensayo PAV se ha realizado a  $100^\circ\text{C}$  durante 20h y 2,1 MPa de presión de aire.

En la norma de ensayo del PAV se indica que para ligantes que se usen para mezclas en caliente el acondicionamiento previo de la muestra se efectuará de acuerdo con alguno de los métodos de la norma EN 12607. Es conocido que la severidad del ensayo PAV elimina la diferencia que existe en el acondicionamiento previo mediante RTFOT o mediante TFOT (EN 12607-2) (Eurobitume Congress, 2012).

Existen otros métodos de ensayo para el envejecimiento a largo plazo de betunes, pero son de uso minoritario (Eurobitume Congress, 2012).

En este trabajo se han comparado los siguientes ensayos envejecimiento a largo plazo:

- RTFOT seguido de PAV (RTFOT + PAV).
- 3 x RTFOT (225 minutos).
- RTFOT modificado (RTFOT UK) (4).

Los ensayos de PAV y del RCAT darían lugar al mismo tipo de envejecimiento (A. Verhasselt y A. Vanelstraet, 2000). Los elevados tiempos de ensayo del RCAT y su uso minoritario en Europa desaconsejaron su inclusión en este estudio.

La caracterización de los betunes envejecidos con los métodos anteriormente citados al igual que en el envejecimiento a corto plazo se ha efectuado mediante ensayos empíricos (penetración y punto de reblandecimiento) y reológicos (determinación del módulo complejo  $G^*$  y el ángulo de fase  $\delta$  a diferentes temperaturas y frecuencias utilizando el DSR). Además se ha realizado determinación de la resistencia a la flexión (BBR)

Los resultados obtenidos con los ensayos convencionales se presentan en la siguiente tabla:

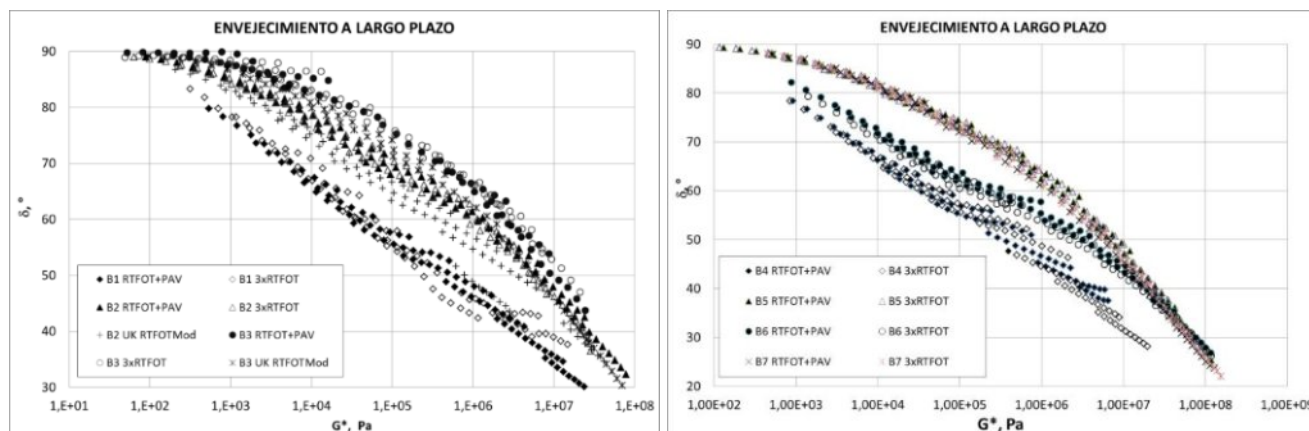
Ligante envejecido 3 x RTFOT			B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Penetración a 25 °C	EN 1426	0,1 mm	24	27	26	14	13	7	6
Punto de reblandecimiento	EN 1427	°C	70,2	58,0	56,8	77	64	78	72,2
Índice de penetración	Anexo A EN 12591	-	1,2	-0,7	-1,0	1,2	-0,9	0,2	-0,7
Incremento de Punto de Reblandecimiento	EN 1427	°C	18,7	10,0	9,5	20,6	10,5	15,6	12,2
Ligante envejecido RTFOT + PAV									
Penetración a 25 °C	EN 1426	0,1 mm	23	25	24	14	11	7	7
Punto de reblandecimiento	EN 1427	°C	71,0	61,4	58,0	79,4	65,4	78,4	71,8
Índice de penetración	Anexo A EN 12591	-	1,2	-0,2	-0,9	1,5	-0,9	0,3	-0,6
Incremento de Punto de Reblandecimiento	EN 1427	°C	19,5	13,4	10,7	23,1	11,9	16,0	11,8

La caracterización reológica se ha efectuado mediante dos métodos:

- Determinación del módulo complejo ( $G^*$ ) y el ángulo de fase  $\delta$  (DSR). Se evalúa el comportamiento a temperaturas intermedias.
- Determinación de las propiedades de fluencia a bajas temperaturas mediante el reómetro de flexión en viga (BBR). La deformación producida se mide calculando la resistencia del ligante a la acción de la carga (módulo de rigidez  $S$ ) y su velocidad de variación (valor  $m$ ).

Del método DSR se presentan dos gráficas. El diagrama de Black (Figura 6), y la gráfica de  $G^* \cdot \sin \delta$  frente a temperatura de ensayo (Figura 7).

Del método BBR se presentan también dos gráficas: la representación del módulo de rigidez  $S$  (Figura 8) y del valor  $m$  (Figura 9) frente a la temperatura de ensayo.



**Figura 6 Diagrama de Black de los betunes 50/70 (izquierda) y Diagrama de Black de los betunes 15/25 y 35/50 (derecha) estudiados con diferentes tipos de envejecimientos a largo plazo**

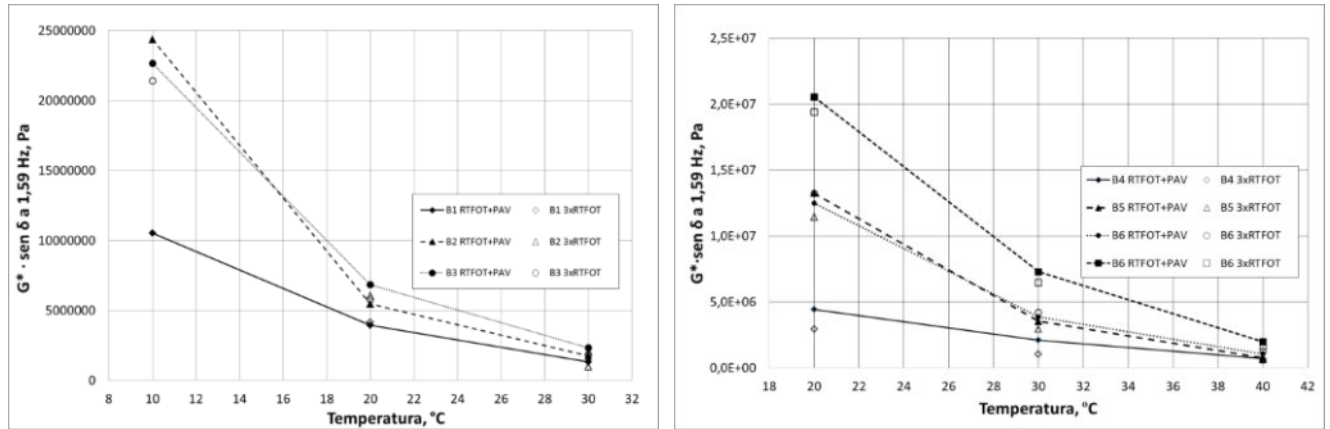


Figura 7. Representación de  $G^* \cdot \sin \delta$  vs. Temperatura de Ensayo de los betunes 50/70 (izquierda) y de los betunes 15/25 y 35/50 (derecha) estudiados con diferentes tipos de envejecimientos a largo plazo

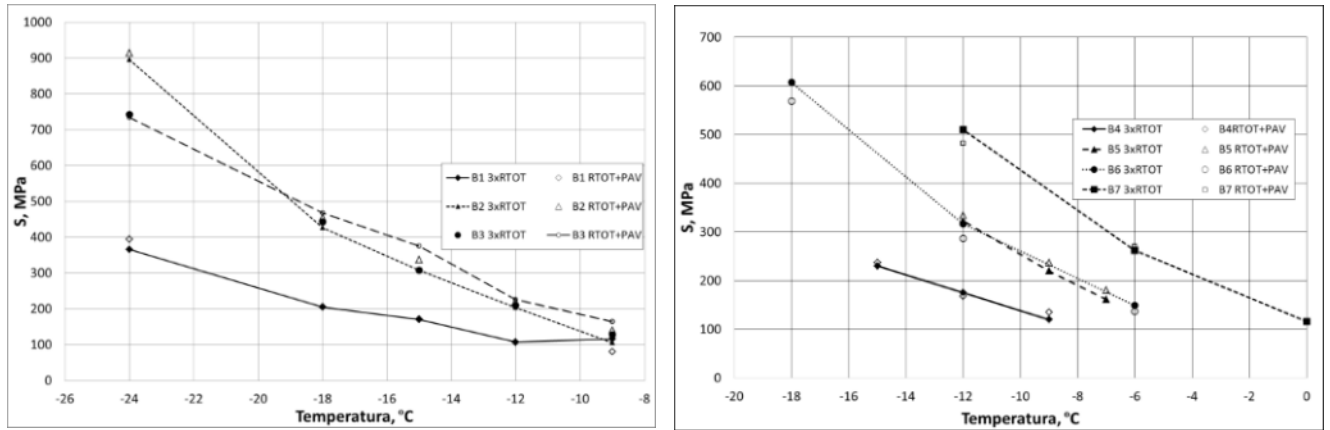


Figura 8. Representación del módulo de rigidez  $S'$  vs. Temperatura de ensayo de los betunes 50/70 (izquierda) y de los betunes 15/25 y 35/50 (derecha) estudiados con diferentes tipos de envejecimientos a largo plazo

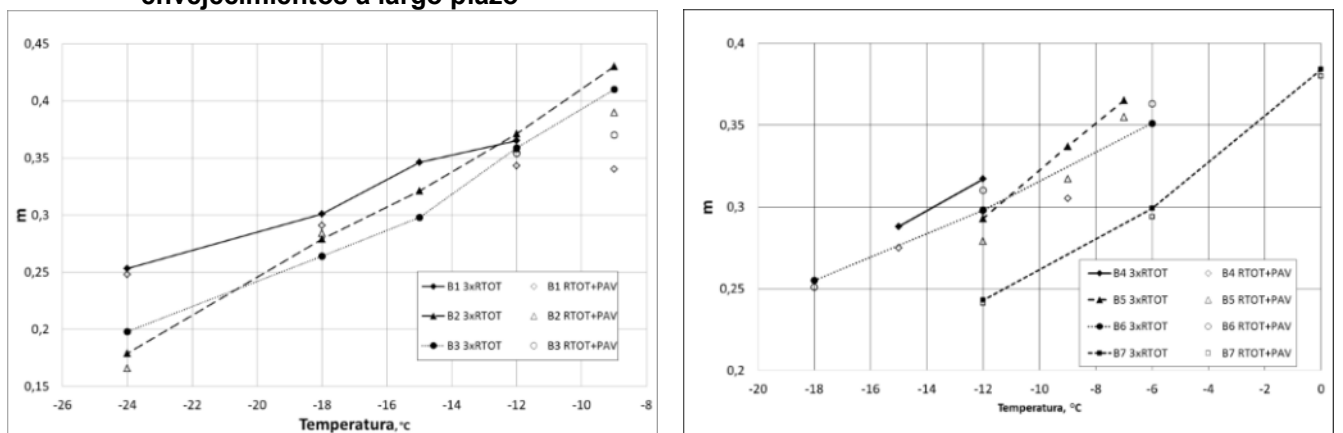


Figura 9. Representación valor  $m$  vs. Temperatura de ensayo de los betunes 50/70 (izquierda) y de los betunes 15/25 y 35/50 (derecha) estudiados con diferentes tipos de envejecimientos a largo plazo.

La caracterización mediante los ensayos convencionales de los betunes envejecidos a largo plazo indica que ambos métodos (RTFOT+PAV y 3 x RTFOT) conducen a resultados similares, si bien el RTFOT+PAV en general es ligeramente más severo. Esta mayor severidad del envejecimiento RTFOT+PAV se observa sobretudo en el betún B2, con una diferencia notoria de los índices de penetración. Ello puede hacer pensar que dependiendo del tipo de betunes el envejecimiento puede ser más o menos parecido, y por lo tanto no son exactamente el mismo mecanismo de envejecimiento.

La similitud entre ambos métodos (RTFOT+PAV y 3 x RTFOT) también queda reflejada en la caracterización reológica mediante DSR y BBR (Figura 6 a

Figura 9). Los resultados también parecen indicar una tendencia a una ligerísima mayor severidad para el envejecimiento RTFOT+PAV.

La dificultad en recuperar la muestra tras el método RTFOT modificado UK ha impedido obtener resultados concluyentes, ya que únicamente se ha ensayado un betún con métodos convencionales y dos con DSR (Figura 6). Con los datos disponibles podría decirse que método RTFOT modificado UK es algo menos severo que los otros dos métodos (RTFOT+PAV y 3 x RTFOT).

Como era de esperar, los ligantes con mayor envejecimiento tras el acondicionamiento a corto plazo (RTFOT), B1, B4 y B6, también presentan el mayor envejecimiento (menor penetración retenida y mayor aumento del punto de reblandecimiento) tras el envejecimiento a largo plazo (RTFOT+PAV y 3 x RTFOT). Lo mismo puede decirse de los ligantes de bajo envejecimiento, B2, B3, B5 y B7. Por lo tanto, desde el punto de vista de mayor o menor envejecimiento de los ligantes, el envejecimiento a largo plazo no aporta nada nuevo respecto al acondicionamiento a corto plazo.

Los betunes de mayor envejecimiento conducen, tras el envejecimiento a largo plazo, a un betún que presenta un mejor comportamiento con la temperatura comparado con el procedente de los betunes de bajo envejecimiento; es decir, los betunes de mayor envejecimiento presentan una menor susceptibilidad térmica, tal como ya hacía intuir su índice de penetración más positivo.

El diagrama de Black (Figura 6) permite distinguir claramente los diferentes comportamientos viscoelásticos de los ligantes envejecidos a largo plazo, observándose incluso diferencias entre los dos betunes de bajo envejecimiento.

A temperaturas intermedias y bajas los betunes de bajo envejecimiento presentan una mayor rigidización si se comparan con los betunes de mayor envejecimiento. Son notorias las diferentes pendientes de las gráficas que aparecen de la Figura 7 a la

Figura 9.

Para los betunes de mayor envejecimiento, tanto el parámetro  $G^* \cdot \sin \delta = 5000$  kPa, como el parámetro Temperatura de isomódulo  $S=300$  MPa, se alcanzan a temperaturas unos 4 a 6 °C menores comparado con los betunes de bajo envejecimiento. Las temperaturas de isovalor  $m=0,3$  son algo más parecidas, si bien siguen siendo entre 2 y 4°C menores en el ligante de mayor envejecimiento.

## CONCLUSIONES

A la vista de los resultados obtenidos, y a efectos de comparar la resistencia al envejecimiento a corto plazo de este tipo de materiales, el uso de una temperatura universal de acondicionamiento es adecuado y facilita la realización del ensayo.

Los ensayos de envejecimiento a largo plazo PAV y 3 x RTFOT han dado resultados similares, aunque no idénticos, mientras que el ensayo RTFOT UK se ha mostrado como un ensayo muy complejo de realizar.

El ensayo PAV se realiza en muchos laboratorios y por tanto se disponen de datos y experiencia aceptables. No ocurre lo mismo con los otros ensayos de envejecimiento a largo plazo existentes actualmente.

Los resultados obtenidos muestran una influencia muy significativa del origen del betún que debe tenerse en cuenta a la hora del desarrollo de las especificaciones.

## **REFERENCIAS**

CEN. EN 14769, Acondicionamiento por envejecimiento a largo plazo acelerado usando un recipiente de envejecimiento a presión (PAV).

CEN. EN 15323, envejecimiento a largo plazo acelerado por el método del cilindro giratorio (RCAT).

A. Verhasselt, Long-Term Aging of Bituminous Binders: Correlation –Test Validation Work, Symposium on Aging of Pavements Asphalts, WRI, Laramie, WY, July 16-18, 2003).

Clause 955. Specification for Highway Works, UK.

C.A. Bell “Summary report on Ageing of Asphalt-Aggregate Systems” SR-OSU-A-003A-89-2.

Chapter 3 on “Analysis of Available Data for Validation of Bitumen Tests, Report on Phase 1 of the BiTVal Project”, 2006.

A. Bardesi, I. Pérez, “Innovaciones en ligantes”, Carreteras, 2007, 155, 14-26.

A5EE-225.5th Eurasphalt & Eurobitume Congress 2012, Istanbul.

A. Verhasselt and A. Vanelstraet. Proc. 0085. 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress 2000, Barcelona.