

# PROCEDIMIENTOS FUNCIONALES PARA LA CARACTERIZACION DE LIGANTES. METODOS SHRP Y UCL

Pérez Jiménez, F.E.<sup>1</sup>; Miró Recasens, R.<sup>1</sup>; Khalid, H.A.<sup>2</sup>; Walsh, C.M.<sup>2</sup>

## 1. PRESENTACION

La caracterización de los ligantes bituminosos siempre ha sido una tarea ardua y compleja. Esto es debido a la dificultad de determinar su composición y poder así identificarlos químicamente, y ser mutantes sus propiedades físicas con la temperatura y la velocidad de aplicación de carga, lo que complica su caracterización mecánica. En su identificación química, se ha procedido tradicionalmente a la obtención de su contenido en agua y a la determinación de su contenido de resinas, asfaltenos y maltenos. Para su caracterización física se procedía, y hoy en día se continúa haciéndolo, a determinar su consistencia a 25 °C y la variación de ésta con la temperatura, ensayos de anillo y bola y de fragilidad. Se completan a veces estos ensayos con el de ductilidad a 25 °C y con la obtención de la curva viscosidad relativa-temperatura.

Estos procedimientos tradicionales, basados en la adaptación de ensayos convencionales de laboratorio y en el empleo de procedimientos experimentales relativamente sencillos, resultan inadecuados e insuficientes para determinar las características mecánicas del ligante y las propiedades que éste proporcionará a la mezcla. Es por ello que, en estos últimos años, se han puesto a punto nuevos ensayos y procedimientos que permiten evaluar mejor las características mecánicas de los ligantes, y posibilitan realizar su selección en función de su comportamiento y de las características mecánicas que aportarán a las mezclas con ellos fabricadas. Estos procedimientos reciben el nombre genérico de funcionales, al estar basados directamente en las propiedades que aseguren la buena respuesta, “función”, del producto.

---

<sup>1</sup> Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), España

<sup>2</sup> Liverpool University (LU), UK

Dentro de estos procedimientos, el método más conocido y experimentado de caracterización de ligantes es el método SHRP, desarrollado e implantado por la FHWA en USA, y que ahora lo están adaptando y empleando en Europa distintos centros de investigación, como es el caso del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Liverpool.

Por su parte, el Laboratorio de Caminos del Departamento de Infraestructura del Transporte y Territorio de la Universidad Politécnica de Cataluña, ha desarrollado un procedimiento de caracterización funcional de ligantes, método UCL<sup>®</sup>, basado en el estudio de la cohesión proporcionada por los mismos a una mezcla patrón y su variación por efecto de la temperatura, la presencia de agua o por su envejecimiento.

Los dos métodos, parten de principios y enfoques muy diferentes; el primero ha sido pensado para la selección de ligantes destinados a la fabricación de mezclas densas, fijándose principalmente en su comportamiento mecánico: módulos dinámico y de rigidez del ligante. Mientras que, el método UCL se basa en el poder aglomerante de los ligantes y parte del análisis de la respuesta y comportamiento de las mezclas abiertas. Es por ello, que ambos procedimientos han sido empleados en un estudio realizado conjuntamente por las Universidades de Liverpool y Politécnica de Cataluña con el fin de adaptar las especificaciones SHRP a la selección de ligantes para mezclas porosas. Se recogen en este artículo los resultados de este estudio, haciendo especial referencia a las coincidencias, ventajas e inconvenientes de los dos métodos empleados.

## **2. METODOS SHRP Y UCL**

De forma concisa, con el fin de poder analizar mejor los resultados obtenidos, se recogen a continuación los fundamentos y procedimientos empleados en ambos métodos, describiendo muy someramente los procedimientos del SHRP por ser más conocidos y haber sido ampliamente divulgados en diferentes publicaciones.

## **Método SHRP**

El método se fija sobre cuatro características mecánicas del ligante: módulo dinámico a cortante ( $G^*$ ), ángulo de fase ( $\delta$ ), deformación en rotura y módulo de rigidez ( $S$ ), evaluadas y determinadas según los procedimientos y ensayos particulares del método, y que son relacionadas con la estabilidad de la mezcla, su resistencia a la fatiga y su fisuración a bajas temperaturas.

### Estabilidad

Se determinan, a la máxima temperatura a que va a estar sometida la mezcla, el módulo dinámico a cortante ( $G^*$ ) y el ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante en un reómetro de corte dinámico, debiendo ser el cociente  $G^*/\text{sen}\delta$  a 1.6 Hz, mayor que 1.0 KPa.

Este ensayo se realiza también después de someter al ligante a envejecimiento en película fina, RTFOT, debiendo entonces mantenerse el cociente  $G^*/\text{sen}\delta$  a 1.6 Hz, por encima de 2.2 KPa.

### Fatiga

La resistencia a la fisuración por fatiga de la mezcla se relaciona en el método SHRP con el producto  $G^*\text{sen}\delta$ . Se determina este valor en una muestra de ligante envejecido a RTFOT más PAV (envejecimiento en película fina y posteriormente a presión) debiendo ser a 1.6 Hz y a la temperatura media a que se encontrará la mezcla en el pavimento, inferior a 5.0 MPa.

### Fisuración

Para evitar el problema de fisuración por fatiga de la mezcla a temperaturas bajas, el método SHRP limita el módulo de rigidez del ligante, determinado en el Bending Beam Rheometer a una temperatura 10 °C superior a la más baja de uso de la mezcla, a 300 MPa. Este ensayo se realiza también sobre una muestra de ligante envejecido por el procedimiento RTFOT más PAV.

Puede utilizarse como parámetro alternativo la deformación obtenida en un ensayo de tracción directa a la velocidad de deformación de 1.0 mm/min, debiendo obtenerse un valor superior al 1.0% cuando se realiza sobre una muestra envejecida (RTFOT y PAV) a una temperatura 10 °C superior a la mínima de uso.

Con estos procedimientos de ensayo y estos valores, la AASHTO ha establecido diferentes tipos de ligantes a emplear en la fabricación de las mezclas densas de acuerdo con las condiciones climáticas a que van a estar sometidas.

### **Método UCL**

El método UCL está basado en la evaluación de la cohesión proporcionada por el ligante a una mezcla patrón y su variación con la temperatura, la presencia de agua y el envejecimiento del ligante.

Pese a la importancia que tiene la cohesión proporcionada por el ligante a la mezcla, que puede considerarse tan básica y fundamental como la resistencia a compresión de un material hidráulico, no ha sido tenido en cuenta hasta ahora en la caracterización de los materiales bituminosos. Esto puede ser debido a la falta de ensayos que permitan evaluar esta característica del ligante. Recientemente, se está empezando a medir esta propiedad a través de ensayos de tracción directa o mediante rotura a cortante y por impacto, péndulo, aunque es el método UCL el que más ventajas puede ofrecer, dada su sencillez y el poder evaluar el poder aglomerante del ligante sobre una mezcla patrón, tras el proceso de envuelta y adherencia a los áridos, y no la cohesión del producto en masa que puede ser muy diferente.

El procedimiento UCL para determinar la cohesión del ligante consiste en fabricar una mezcla patrón, compuesta por 1000 g de árido -80% del tamaño 2.5/5 mm y 20% del tamaño 0.63/2.5, tamices UNE- y 45 g de ligante a caracterizar, y elaborar con ella, según la NLT-352/86, una probeta marshall que se ensaya en la máquina de desgaste de Los Angeles sin carga abrasiva. Después de someterla a 300 revoluciones del tambor se determinará su pérdida de peso, en %, referido al peso inicial de la probeta.

Cambiando las condiciones del ensayo y a las que se someten las probetas antes del mismo, se analiza la variación de la cohesión con la temperatura, la adhesividad árido-ligante y su resistencia al envejecimiento, tres propiedades fundamentales a la hora de evaluar la calidad de un ligante bituminoso.

#### Cohesión-temperatura: Curva de estado del ligante

Variando la temperatura a la que se realiza el ensayo cántabro puede obtenerse la curva de estado del ligante, que puede considerarse como su curva de identidad, ya que define la variación de su comportamiento, desde inconsistente, a altas temperaturas, a frágil, a bajas temperaturas. La mayor o menor pendiente de esta curva de estado nos indica la susceptibilidad del ligante a los cambios de temperatura y está relacionada con su índice de penetración.

Los resultados obtenidos en la aplicación de este procedimiento en la determinación de la curva patrón de los ligantes ha sido totalmente satisfactoria, habiéndose podido definir áreas donde se encuentran, según su naturaleza y composición, las curvas de los diferentes tipos de ligantes, figuras 1 y 2. El procedimiento se aplica sobre todo tipo de ligantes, naturales y modificados, de ahí su nombre de *universal*, lo que permite comparar directamente sus respuestas, poniendo de manifiesto sus diferencias y mejoras.

El ensayo cántabro, además de valorar la cohesión y el poder aglomerante del ligante, puede servir también para evaluar su tenacidad y resistencia a la fatiga. Mientras la probeta permanece en el tambor de Los Angeles es sometida, por impacto y abrasión contra sus paredes, a un proceso de deterioro, cuya energía se aplica en deformar elástica y plásticamente la mezcla y en producir su rotura. Cuanto menor sea la capacidad del ligante para deformarse elástica y plásticamente, menor será su tenacidad y mayores las pérdidas en el cántabro.

Al igual que en el método SHRP pueden establecerse, a partir de estas curvas y del comportamiento de las mezclas en servicio, unos criterios que establezcan la cohesión o resistencia mínima a la disgregación que ha de proporcionar el ligante a la mezcla patrón a la temperatura inferior a que estará la mezcla para evitar el problema de fragilidad a bajas temperaturas, la máxima pérdida a la temperatura media de servicio, para controlar su fallo

por fatiga, y su mínima cohesión a la temperatura más alta de servicio, para evitar su excesiva deformación plástica a altas temperaturas. Estos criterios deberían cambiar con el tipo de mezcla empleada, densa o abierta, y ser ajustado con el porcentaje de ligante y la naturaleza del árido empleado.

### Envejecimiento

La valoración del envejecimiento por el método UCL se basa en determinar la evolución de la resistencia a la disgregación de la mezcla, pérdidas al cántabro, a medida que se va produciendo el envejecimiento del ligante. Dada la alta porosidad de la granulometría empleada, el betún envuelve las partículas de árido con una película muy fina, que es la que se somete a oxidación en estufa, a 163 °C, durante diferentes periodos de tiempo.

La resistencia al envejecimiento del ligante se evalúa directamente a partir de la pendiente de la curva pérdidas-tiempo de envejecimiento o de las pérdidas finales al cabo de 8 horas de envejecimiento, sin tener que acudir a la recuperación del ligante.

### Adhesividad

El ligante bituminoso, además de ser capaz de envolver los áridos dando cohesión a la mezcla, debe resistir la acción de desenvuelta del agua. Por efecto del agua, el ligante se separa del árido y disminuye así la cohesión de la mezcla.

Mediante el ensayo cántabro se puede evaluar la adhesividad árido-ligante, determinando las pérdidas de la mezcla cuando ésta se ensaya en seco o tras permanecer cierto tiempo sumergida en agua. El incremento de las pérdidas está directamente relacionado con la mejor o peor adhesividad del ligante al árido.

### 3. TRABAJO REALIZADO

El estudio ha consistido en tomar tres ligantes tipos empleados en el Reino Unido para la fabricación de mezclas porosas; un betún de penetración B-80/100, un betún 80/100 modificado con EVA y un betún 150/200 modificado con SBS, cuyas características se indican en la tabla 1, sobre los que se han llevado a cabo los siguientes ensayos de caracterización.

PROPIEDAD	100p	EVA	SBS
Penetración a 25 °C (dmm)	90	65	108
Temperatura A y B (°C)	47	54	58
Viscosidad 125 °C (poise)	5.4	9.6	9.0
Viscosidad 150 °C (poise)	1.9	3.8	3.9
Viscosidad 180 °C (poise)	0.6	1.4	1.6

**Tabla 1. Características de los ligantes utilizados en el estudio**

#### Departamento de Ingeniería Civil (LU)

- Determinación de la variación del módulo complejo ( $G^*$ ) y del ángulo de fase ( $\delta$ ) con la temperatura, curva patrón, de los tres ligantes, tras someterlos a las siguientes condiciones de envejecimiento:
  - . Ligante original, sin envejecimiento
  - . Envejecimiento RTFOT
  - . Envejecimiento SHRP STOA
  - . Envejecimiento SHRP LTOA
  - . Envejecimiento método UCL (4 horas)
  - . Envejecimiento método UCL (6 horas)

De los cinco tipos de envejecimiento considerados, uno se hace directamente sobre el ligante -RTFOT, envejecimiento por rotación en película fina-, el segundo se hace sometiendo la mezcla fabricada, antes de compactarla, a un proceso de envejecimiento en

estufa con soplado -procedimiento SHRP STOA-, y los tres restantes se realizan sobre probetas, mezcla compactada, uno según el procedimiento LTOA del SHRP y los otros dos según lo indicado en el apartado anterior. Tras este proceso de oxidación se recupera el ligante y se procede a la determinación de sus módulos y ángulos de fase en el reómetro. Las granulometrías empleadas son recogidas en las tablas 2 y 3, habiéndose empleado un árido basáltico y granulometría cerrada en el procedimiento SHRP y abiertas con árido granítico en el UCL.

Tamiz BS (mm)	% Pasa
20	100
14	65
6.3	25
3.35	10
0.075	4.5

**Tabla 2. Granulometría LU**

Tamiz UNE (mm)	% Pasa
5	100
2.5	20
0.63	0

**Tabla 3. Granulometría UCL**

### **Laboratorio de Caminos (UPC)**

En el Laboratorio de Caminos se han realizado los siguientes ensayos:

- Determinación de variación de la cohesión con la temperatura -curvas de estado- de los tres ligantes.
- Determinación de la carga máxima, deformación y energía de rotura a tracción ensayando los tres ligantes a tracción directa a diferentes temperaturas y velocidades de carga.
- Determinación de la resistencia al envejecimiento de los ligantes, evaluada a partir de la variación de su cohesión con el periodo de envejecimiento en estufa.



#### **4. ANALISIS DE RESULTADOS**

En el análisis de resultados se ha procedido, en primer lugar, a analizar la información proporcionada por los dos procedimientos empleados para caracterizar el comportamiento de los tres ligantes antes y después de someterlos a diferentes procesos de envejecimiento.

En segundo lugar, se han correlacionado los parámetros que determinan, en ambos procedimientos, la misma característica de la mezcla. Tal es el caso del producto  $G^* \sin \delta$ , método SRHP, y las pérdidas al cántabro en el método UCL, relacionadas ambas con la tenacidad de la mezcla y su resistencia a fisurarse y romperse por aplicación de esfuerzos repetidos (fatiga). La otra correlación se ha establecido entre las pérdidas al cántabro a muy bajas temperaturas, fragilidad, y la deformación a rotura, también a bajas temperaturas, en el ensayo de tracción directa.

##### **Procedimiento SHRP. Curvas patrón**

Las curvas patrón de los tres ligantes ensayados han sido representadas en las figuras 3, 4 y 5. En ellas se han dibujado las variaciones del módulo complejo ( $G^*$ ) y del ángulo de fase ( $\delta$ ) con la frecuencia, para las diferentes condiciones de envejecimiento, a la temperatura de 20 °C.

Se observa como mediante la aplicación del reómetro y la obtención de la curva patrón puede ponerse de manifiesto las diferencias de comportamiento de los tres ligantes con o sin envejecimiento, a medias y altas temperaturas, siendo el betún modificado con SBS el que menor susceptibilidad presenta y el que mejor se comporta, mantiene un mayor módulo de rigidez y un menor ángulo de fase. Sin embargo, a bajas temperaturas, el ensayo tiene muy poca capacidad para distinguir el comportamiento de los ligantes, prácticamente proporciona el mismo módulo y ángulo de fase para los tres ligantes y las seis condiciones de envejecimiento.

Respecto a la resistencia al envejecimiento se aprecia, al comparar las tres figuras, la mayor resistencia del ligante modificado con SBS, presentando el ligante modificado con EVA un envejecimiento similar al del betún de penetración.

También se detecta que las condiciones más duras de envejecimiento son las producidas en el método UCL. Esto es debido a que la mezcla fabricada es muy porosa, un 22% de huecos en mezcla, y facilita la oxidación del ligante.

### **Método UCL. Curvas de estado y de envejecimiento**

En la figura 6 se han representado las curvas de estado (pérdidas al cántabro-temperatura) de los tres ligantes ensayados. Estas curvas muestran la diferencia de comportamiento de los tres betunes en todo el rango a temperaturas. La mayor tenacidad a bajas temperaturas del betún modificado con SBS, es puesta claramente de manifiesto en este ensayo, cosa que no ocurría en el reómetro. También se observa la mayor consistencia y poder aglomerante que conservan a altas temperaturas los betunes modificados con SBS y EVA, así como su menor susceptibilidad térmica.

El efecto del envejecimiento sobre los tres ligantes es puesto de manifiesto también por el método UCL, llegándose a las mismas conclusiones que con el procedimiento anterior, figura 7. El betún más resistente al envejecimiento, el que menos cambia sus características, es el betún modificado con SBS; los otros dos ligantes experimentan un fuerte y similar envejecimiento.

### **Correlaciones SHRP-UCL**

A partir de los resultados obtenidos en la medida en el reómetro del módulo complejo ( $G^*$ ) y del ángulo de fase ( $\delta$ ) y los obtenidos en la medida de su cohesión en el método UCL, se ha establecido la correlación entre el producto  $G^* \cdot \sin \delta$  y las pérdidas al cántabro. Estos dos parámetros son relacionados en ambos procedimientos con el comportamiento a fatiga de la mezcla. En el primer caso se supone que cuando menor sea la componente imaginaria, no elástica, del módulo complejo, menor es la energía que en cada aplicación de carga se pierde en deformar y romper el material. En el método UCL se produce, con las sucesivas revoluciones del tambor, una fisuración y disgregación de la mezcla que es un proceso de fallo por fatiga, aunque diferente y más agresivo que el del firme.

La correlación obtenida entre estos dos parámetros para los tres ligantes, figura 8, muestra que ambos parámetros no están directamente relacionados sino que su correlación

varía con el ligante. Estos resultados vienen a cuestionar el significado que se les está dando a estos parámetros en ambos métodos; quizás, el primero esté más relacionado con el fallo a la fisuración a fatiga de la mezcla y el otro con la tenacidad proporcionada por el ligante. Pero lo que pone en cuestión el método SHRP es que a bajas y a medias temperaturas el reómetro no muestra las diferencias de los ligantes, y por tanto el producto  $G^* \sin \delta$  es prácticamente igual para los tres a las diferentes temperaturas. El método UCL si pone de manifiesto estas diferencias, que además están de acuerdo con la práctica, ya que son los ligantes modificados con elastómeros los que mejor respuesta están teniendo frente al fallo por fatiga, por su mayor tenacidad y recuperación elástica.

La otra correlación analizada es la existente entre la deformación en rotura del ligante, determinada según el procedimiento antes mencionado a tracción directa, y las pérdidas al cántabro. En este caso, aunque el número de ensayos de que se dispone es mas bien escaso, si que parece que se observa una correlación directa entre ambos parámetros, figura 9, que no viene afectada por el tipo de ligante. Cuando la mezcla rompe con mayor o menor deformación en el ensayo de tracción, también presenta menores o mayores pérdidas en el ensayo cántabro. Esta correlación debería ser establecida con una mayor cantidad de datos y empleando los equipos SHRP para el ensayo de tracción directa.

También se deduce de este gráfico, que dada la buena correlación que existe entre pérdidas al cántabro y la deformación en rotura a tracción directa, debe ser este último parámetro el que debe ser tomado más en consideración para establecer los criterios SHRP relativos a ligantes para mezclas bituminosas abiertas. El mecanismo de deterioro observado en el fallo de las mezclas porosas es precisamente su disgregación debido a la excesiva fragilidad del ligante, siendo este proceso de deterioro el que se reproduce en el ensayo cántabro. Sin embargo, los pocos datos existentes y el haber sido obtenidos con equipos distintos de los del SHRP impide establecerlos en este estudio.

Del estudio conjunto de estos resultados y de los obtenidos en el ensayo de otros ligantes se ha llegado también a unos criterios UCL para la clasificación y agrupación de ligantes por grados, a semejanza del método SHRP, en función de las pérdidas que definen su fragilidad a bajas temperaturas y de las pérdidas que definen su inconsistencia a altas temperaturas.

Temperaturas de fragilidad. Temperatura en que las pérdidas por fragilidad en el procedimiento UCL alcanzan

60% con mezclas UCL con el 28% de huecos

45% con mezclas UCL con el 23% de huecos

Temperatura de inconsistencia. Temperatura en que las pérdidas por inconsistencia en el procedimiento UCL alcanzan

70% con mezclas UCL con el 28% de huecos

50% con mezclas UCL con el 23% de huecos

Estas dos temperaturas de inconsistencia y fragilidad definirían el rango en que los ligantes tienen unas determinadas propiedades. Cuanto más amplia sea la diferencia entre ellas y más baja sea la temperatura de fragilidad y más alta sea la temperatura de inconsistencia, más adecuado será el ligante para emplearlo en climas extremados. Pero lo más recomendable en el uso del procedimiento UCL es la obtención de la curva de estado y observar la variación del comportamiento del ligante en el rango de temperaturas considerado y, a ser posible, compararlo con la de otros ligantes de comportamiento conocido y experimentado.

## **5. CONCLUSIONES**

Aunque el estudio realizado no ha servido para adaptar las especificaciones SHRP a los betunes empleados en la fabricación de mezclas porosas, sí que ha permitido comparar ambos procedimientos, y mostrar sus ventajas y limitaciones:

- El uso del reómetro en el método SHRP es fundamental para conocer la variación del módulo del ligante con la temperatura y controlar el fallo de la mezcla por deformaciones plásticas.

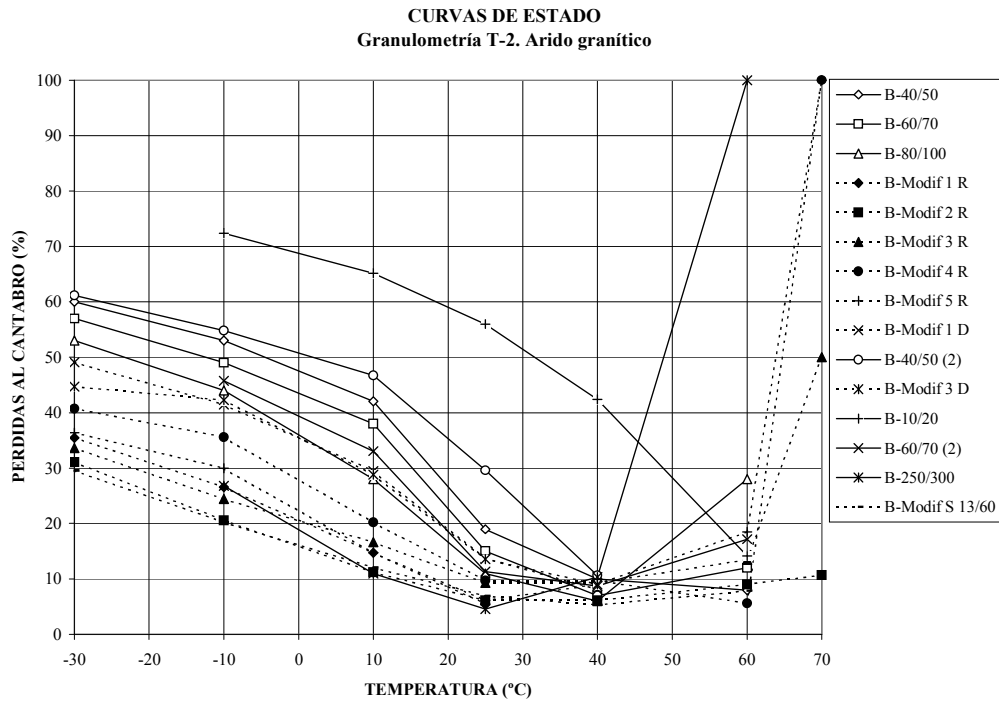
- El método UCL permite controlar dos propiedades fundamentales de los ligantes para su uso en mezclas bituminosas: la cohesión y la tenacidad que proporcionan a la mezcla, así como la variación de estas dos propiedades con la temperatura, curva de estado.
- Ambos procedimientos dan los mismos resultados cuando se aplican a la evaluación del comportamiento de diferentes ligantes.
- El método UCL tiene la enorme ventaja de la sencillez de su aplicación y de no requerir equipos especiales.
- Permite también analizar y valorar otras dos propiedades básicas para el buen comportamiento de la mezcla: adhesividad árido-ligante y el envejecimiento del ligante.
- El método UCL está siendo utilizado por otras Universidades y Centros de Investigación, con los que la Universidad Politécnica de Cataluña ha establecido convenios de colaboración, con resultados igualmente satisfactorios.

Los autores de este artículo desean mostrar su agradecimiento al Ministerio de Educación y al British Council por el soporte prestado para el desarrollo de este trabajo.

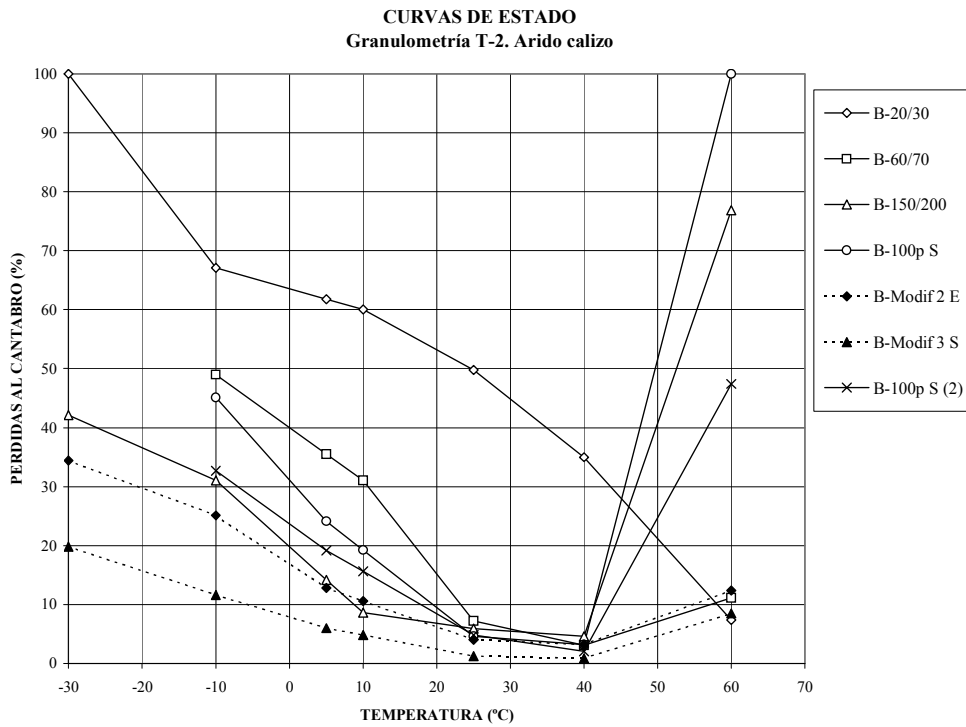
## **BIBLIOGRAFIA**

- Khalid, H.; Pérez Jiménez, F. (1994): "Performance assessment of spanish and british porous asphalts". Performance and Durability of Bituminous Materials (ed. J.G. Cabrera&J.R. Dixon). E&FN Spon.
- Khalid, H.; Walsh, C.M. (1997): "Design for long-term performance of porous asphalt". European symposium on Performance and Durability of Bituminous Materials (ed. J.G. Cabrera), Aedificatio Publ., Zurich.

- Miró Recasens, R. (1994): “Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo Cántabro”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Pérez Jiménez, F.; Miró Recasens, R. (1993): “Characterization procedure of asphalt binders with the Cántabro test. UCL Method”. 5th Eurobitume Congress. Stockholm.
- Pérez Jiménez, F.; Miró Recasens, R. (1994): “Nueva metodología para caracterización de ligantes asfálticos: el Método UCL”. Carreteras, nº 73. Madrid.
- Pérez Jiménez, F.; Miró Recasens, R.; Martin, T.; Des Croix, P. (1997): “Ligantes bituminosos: procedencia, composición, características y comportamiento”. Carreteras, nº 88. Madrid.
- Pérez Jiménez, F.; Miró Recasens, R. (1997): “Caractérisation mécanique de liants asphaltiques. Méthode UCL”. Quatrième Symposium International RILEM "Essais mécaniques pour les matériaux bitumineux". A. A. Balkema publishers. Rotterdam, Netherlands.
- SHRP (1992a): “Standard practice for short-term ageing of asphalt concrete mixtures”. SHRP Nº 1025, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.
- SHRP (1992b): “Standard practice for long-term ageing of asphalt concrete mixtures”. SHRP Nº 1030, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.



**Figura 1. Curvas de estado de diferentes tipos de ligantes. Método UCL, 28% huecos**



**Figura 2. Curvas de estado de diferentes tipos de ligantes. Método UCL, 23% huecos**

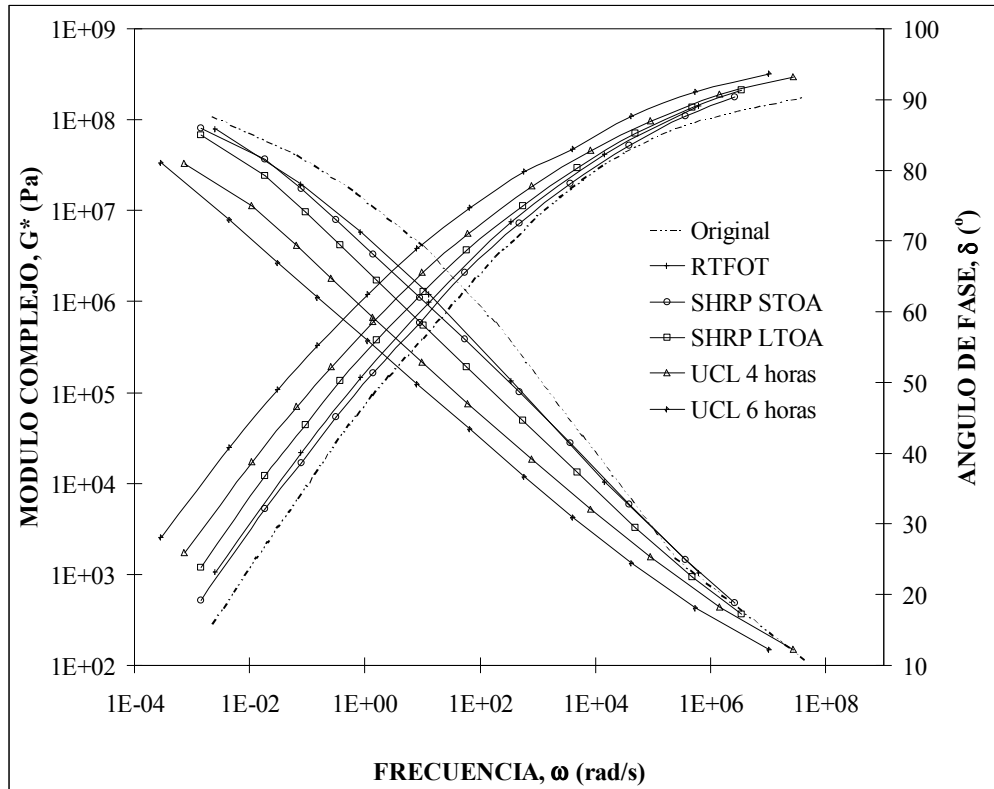


Figura 3. Curvas maestras de  $G^*$  y  $\delta$  para el ligante 100p

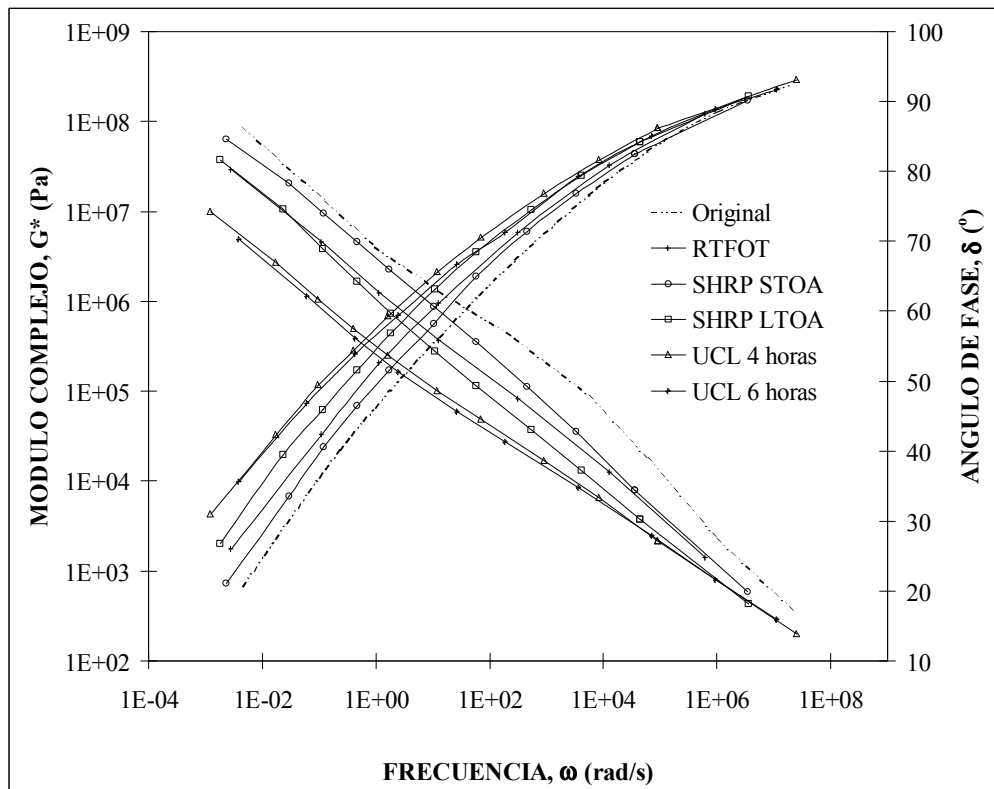


Figura 4. Curvas maestras de  $G^*$  y  $\delta$  para el ligante modificado con EVA



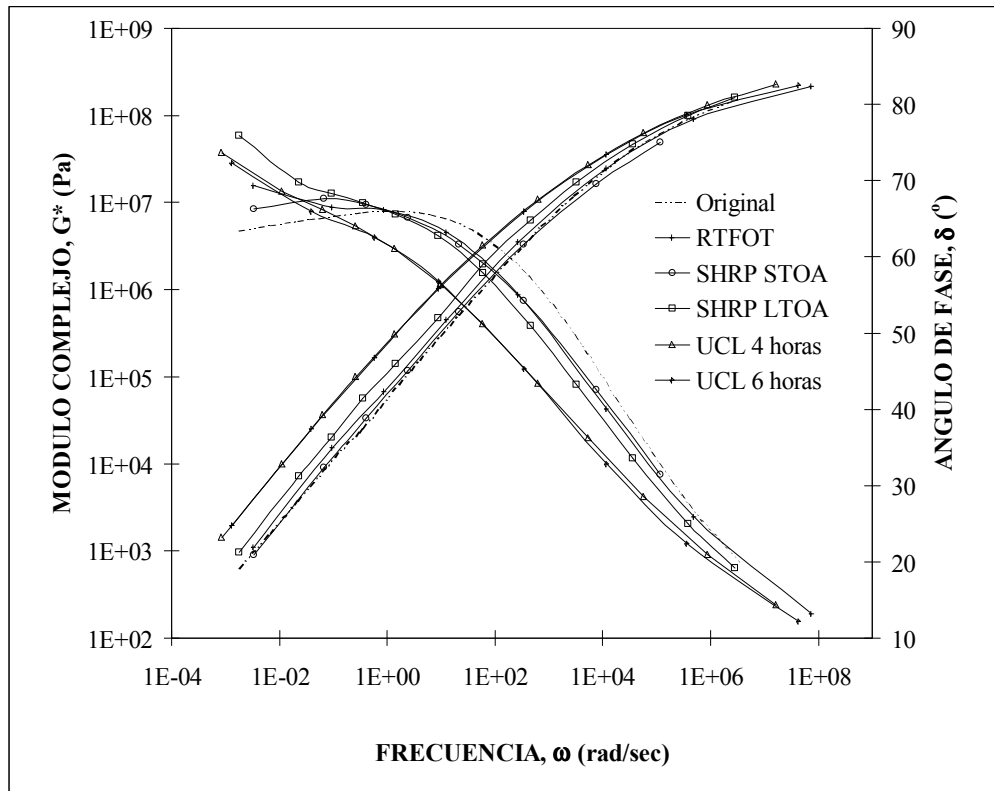


Figura 5. Curvas maestras de  $G^*$  y  $\delta$  para el ligante modificado con SBS

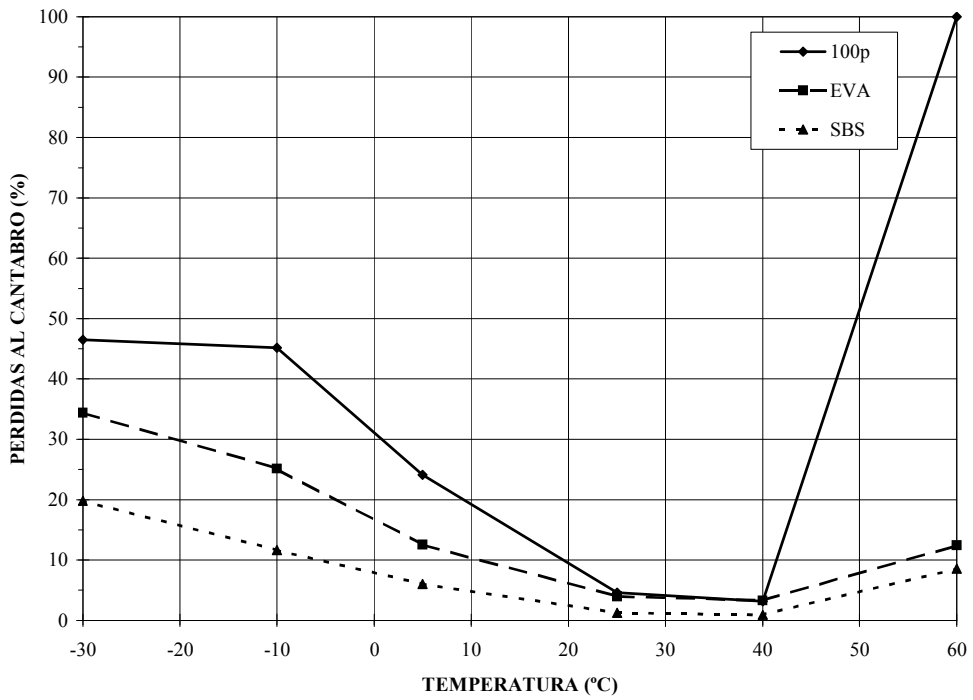


Figura 6. Curvas de estado de los tres ligantes ensayados. Método UCL

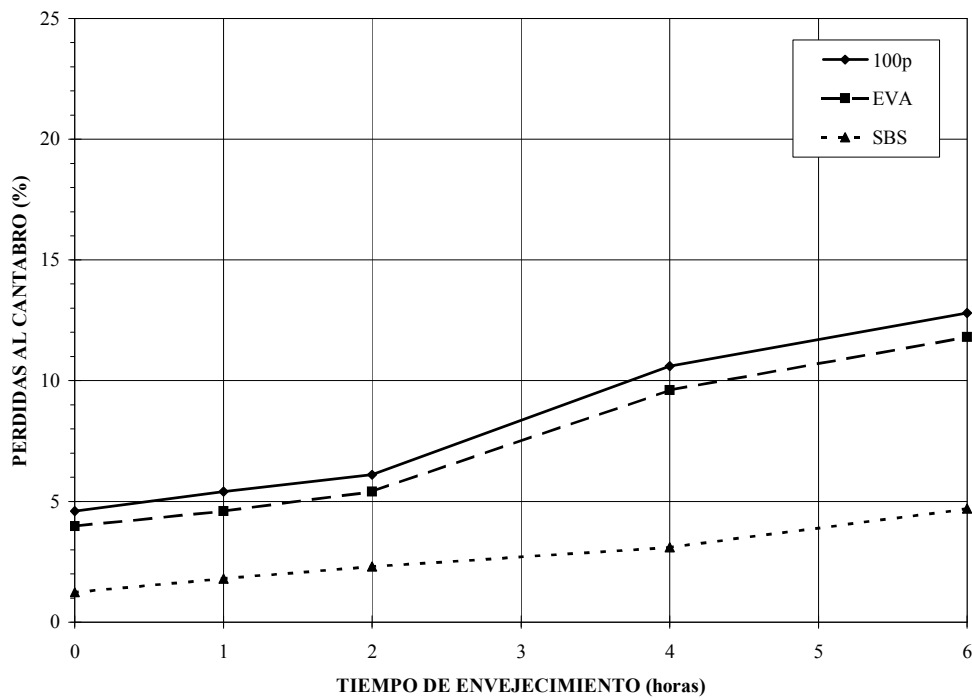


Figura 7. Efecto del envejecimiento sobre los tres ligantes ensayados. Método UCL

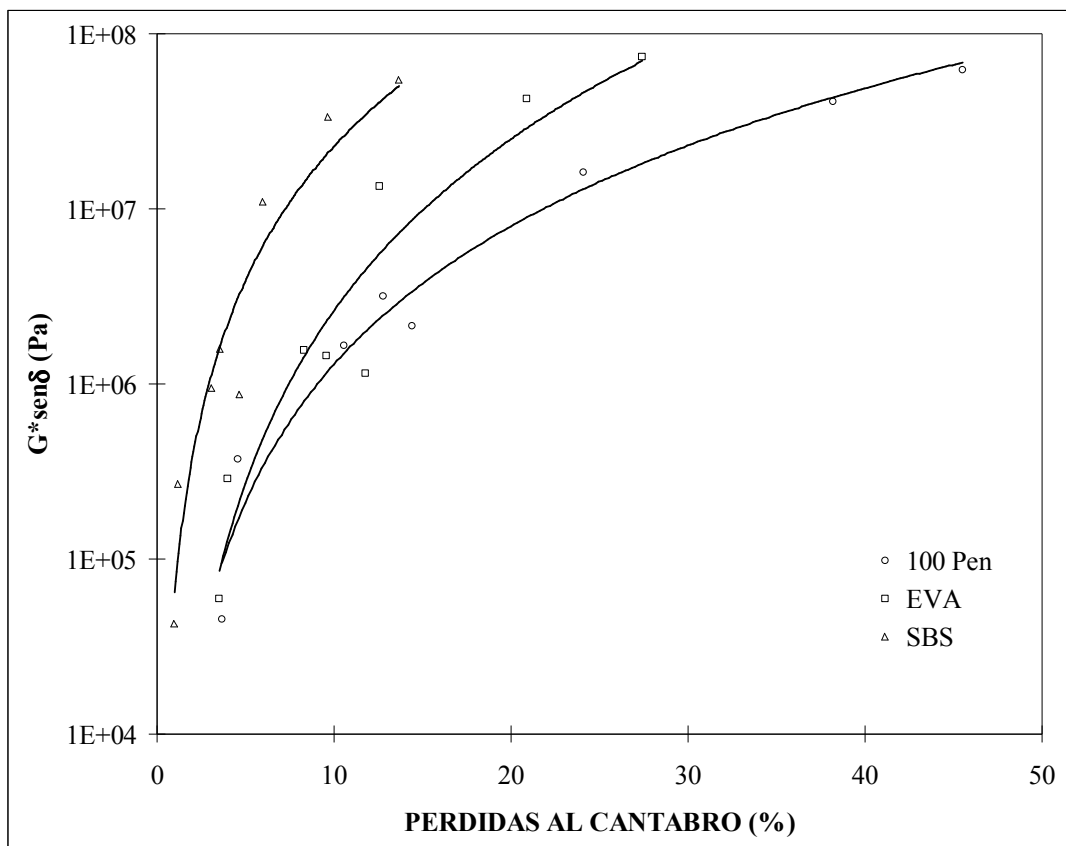
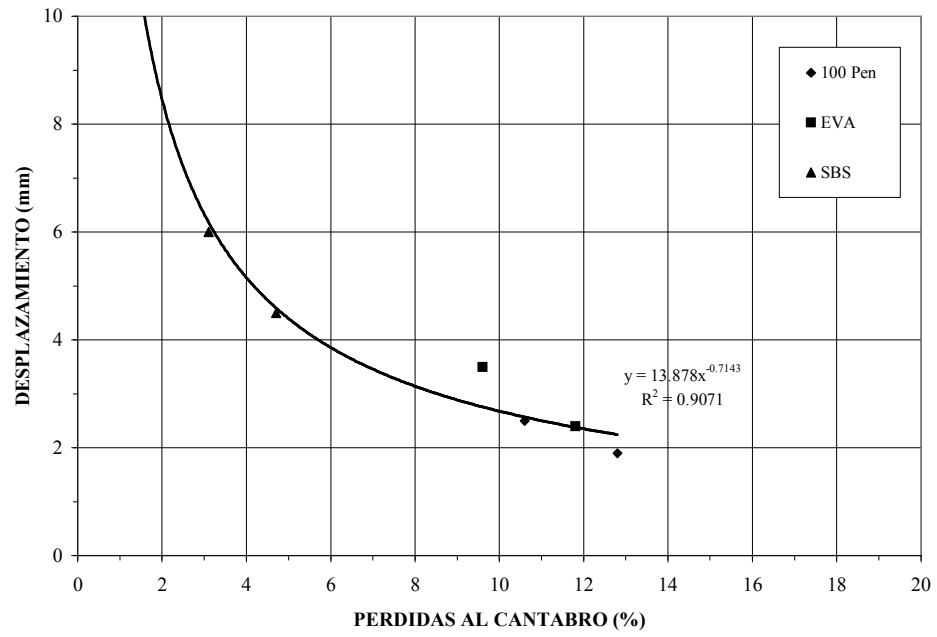


Figura 8. Correlación entre  $G^*sen\delta$  y pérdidas al cántabro



**Figura 9. Correlación entre el desplazamiento en rotura a tracción directa y las pérdidas al cántabro**