

# **LIGANTES BITUMINOSOS: PROCEDENCIA, COMPOSICION, CARACTERISTICAS Y COMPORTAMIENTO.**

**PEREZ JIMENEZ, F.;** **MIRO RECASENS, R.** Universidad Politécnica de Catalunya. España

**MARTIN, T.;** **DES CROIX, PH.** ESSO S.A.F. Centre de Recherches. France.

## **1. INTRODUCCION**

Las mezclas bituminosas se caracterizan por su complejo comportamiento y la dificultad que presentan para su caracterización y evaluación. En su proyecto y dosificación hay que tener en cuenta propiedades tan diferentes y opuestas, que es muy fácil que estemos beneficiando unas: rigidez o resistencia a las deformaciones plásticas, en contra de otras no menos importantes: resistencia a la fatiga, al envejecimiento o su adhesividad.

Lo mismo nos ocurre cuando estamos caracterizando y seleccionando los ligantes a emplear en la fabricación de la mezcla, puede que las propiedades o aspectos que estemos considerando: contenido de asfaltenos, índice de penetración, susceptibilidad térmica, sean convenientes para optimizar una determinada propiedad de la mezcla y son negativos para otra. Esto es por ejemplo lo que nos ocurre cuando nos fijamos únicamente en las características de los ligantes que tienen que ver con la resistencia a las deformaciones plásticas de la mezcla y no en su resistencia a la fatiga, por ejemplo. La cuestión se presenta con más fuerza y relevancia cuando se comparan normativas o ligantes desarrollados en países con diferentes experiencias y preocupaciones sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas, como es el caso de los países del sur de Europa, más pendientes por la resistencia a las deformaciones plásticas de las mezclas, por las fuertes cargas y elevadas temperaturas, y los países del norte, interesados por la resistencia a la fatiga y a la fisuración térmica de la mezcla a temperaturas bajas.

Parece pues interesante analizar globalmente el comportamiento de las mezclas fabricadas con diferentes tipos de betunes, comparando su respuesta y viendo las ventajas e inconvenientes que pueden tener cada uno de ellos. Este es el estudio que conjuntamente han realizado el Laboratorio de ESSO de Mont-Saint-Aignan y el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, dirigido a conocer el comportamiento mecánico, la resistencia a la fisuración por fatiga y la resistencia a su deformación plástica de cuatro mezclas bituminosas, de la misma granulometría y dosificación, fabricadas con cuatro tipos de betunes de diferente procedencia y composición, tres de ellos de penetración 60/70 y el cuarto de penetración 35/50.

Se recoge también en este artículo los resultados obtenidos en la caracterización de esos cuatro ligantes por tres procedimientos diferentes: método convencional basado en sus

características físico-químicas, método SHRP y método UCL, contrastándose la información y valoración dada por estos métodos con el comportamiento real de la mezcla.

## 2. LIGANTES EMPLEADOS. ENSAYOS DE CARACTERIZACION

El estudio se ha realizado a partir de cuatro betunes de penetración que difieren en su procedencia y elaboración y, por tanto, en sus características y composición. Se trata de tres betunes de penetración 60/70, elaborados por semisoplado (A), por destilación directa (B) y procedente de la fabricación de aceites (D), y un cuarto ligante elaborado también por destilación directa y de penetración 35/50 (C).

Los ensayos convencionales de caracterización realizados sobre estos ligantes, que han sido recogidos en la tabla 1, ponen de manifiesto las siguientes semejanzas y diferencias entre ellos:

- índice de penetración:  $A > B > C > D$
- temperatura A y B:  $C > A > B > D$
- punto de fragilidad:  $A < B < C < D$
- envejecimiento:  $A > B > C > D$
- contenido asfaltenos:  $A > C > B > D$

De acuerdo con estos ensayos podríamos deducir "a priori" una menor susceptibilidad térmica de las mezclas fabricadas con el betún A, mayor resistencia a la deformación plástica de la mezcla fabricada con el betún C, menor fragilidad y mayor resistencia a la fisuración por esfuerzos térmicos de la mezcla fabricada con A y un envejecimiento menor de la mezcla fabricada con el betún D.

Las propiedades reológicas de los cuatro ligantes han sido evaluadas en el Bohlin Rheometer. En la figura 1 se recoge la variación del módulo complejo y del ángulo de fase con las temperaturas, obtenidas en dicho ensayo a 1,5 Hz. En la figura 2 aparecen las curvas maestras de los cuatro betunes a la temperatura de 10 °C. Estos valores han sido obtenidos sobre los cuatro ligantes después de someterlos a envejecimiento de acuerdo con el procedimiento RTFOT, ASTM D2872.

Figura 1. Variación del módulo complejo y del ángulo de fase con la temperatura. 1,5 Hz

Figura 2. Curvas maestras. Temperatura de referencia: 10 °C

Los resultados de estos ensayos vienen a confirmar y a cuantificar las diferencias observadas con los procedimientos convencionales de caracterización:

- El ligante D es el que presenta una mayor susceptibilidad térmica y un comportamiento más visco-plástico, como muestra la mayor pendiente de su curva maestra y el mayor incremento del ángulo de fase con la temperatura.
- El ligante A es el que presenta una menor susceptibilidad térmica, su módulo es el menor a frecuencias altas y el mayor a frecuencias bajas. Su ángulo de fase es el que menos se incrementa con la temperatura.
- Los ligantes B y C tienen una respuesta muy similar, intermedia entre los dos anteriores, observando únicamente el menor ángulo de fase del betún C, más consistencia, a bajas temperaturas.

Si consideramos ahora las especificaciones SHRP para betunes y determinamos el grado de estos betunes, temperatura en que  $G^*/\text{sen}\delta = 2200 \text{ Pa}$ , y que se corresponde según las especificaciones americanas con la media de la temperatura máxima del pavimento los 7 días más calurosos del año, vemos que el ligante A podría ser empleado en climas donde el pavimento alcanzase temperaturas máximas de 70 °C, el C hasta 69 °C, el B hasta 64 °C y el D hasta 63 °C. El ligante A sería de la clase PG-70 y los ligantes B, C y D de la clase PG-64, una categoría inferior en cuanto a resistencia a deformaciones plásticas se refiere.

También, según las especificaciones SHRP, podemos determinar a partir de estos ensayos reológicos el comportamiento a fatiga de la mezcla. La energía disipada en toda aplicación de carga está en relación con  $G^*\text{sen}\delta$  y las especificaciones SHRP recomiendan que los betunes sean empleados en climas cuya temperatura media corresponda con aquella en que el valor  $G^*\text{sen}\delta < 5 \text{ MPa}$ . Aunque este valor está indicado para los betunes tras envejecimiento en RTFOT y posteriormente en PAV, hemos determinado estas temperaturas para los cuatro betunes envejecidos únicamente en RTFOT, habiéndose obtenido los siguientes resultados:

Betún:	A	B	C	D
Temperatura media servicio (°C):	16	19	22	20

De acuerdo con estos resultados el betún A podría emplearse en climas de temperaturas más frías y aguantar mayores temperaturas extremas, o expresado de otra forma, a 20 °C, por ejemplo, la mezcla fabricada con el betún A sería la que mejor resistencia a fatiga tendría y la C presentaría la peor respuesta.

Por último, se recoge a continuación los resultados obtenidos en la caracterización funcional de los cuatro ligantes mediante el método UCL. Este método consiste en la caracterización de los ligantes mediante la determinación de su poder aglomerante a 25 °C, la variación de este poder aglomerante con la temperatura, curva de estado, su adhesividad y su envejecimiento. Al igual que el procedimiento SHRP, este método viene a cuantificar y a valorar las diferencias mostradas por los ensayos convencionales de caracterización.

En la figura 3 se ha representado la curva de estado de estos cuatro betunes. A 25 °C el poder aglomerante de los tres betunes de la misma penetración, A, B y D, es similar. A medida que baja la temperatura, los ligantes se van volviendo más frágiles y su capacidad para mantener los áridos unidos e impedir su disgregación por impacto o esfuerzo abrasivos, pérdidas por desgaste, disminuye. Se observa, como era de esperar, un mayor aumento de las pérdidas cuanto mayor es la susceptibilidad de los ligantes y más elevada es su temperatura Fraas,  $D > B > A$ . Para temperaturas superiores a 25 °C, se observa un incremento de las pérdidas a medida que va disminuyendo la consistencia del ligante. Este incremento de pérdidas es tanto mayor cuanto mayor es la susceptibilidad de los ligantes y menor es su temperatura de anillo y bola,  $D > B > A$ . Es decir, el método UCL confirma las diferencias apreciadas en los ensayos convencionales de caracterización, pero valorando y cuantificando funcionalmente estas diferencias.

Respecto al ligante C, de menor penetración y mayor temperatura de anillo y bola, presenta una mayor fragilidad que los otros betunes a temperaturas bajas y una mayor consistencia a temperaturas altas.

Figura 3. Curvas de estado a 300 revoluciones

La adhesividad de estos cuatro ligantes a un árido granítico ha sido recogida en la figura 4. Esta propiedad no es intrínseca del ligante, ya que depende del árido con que esté en contacto, pero es de suma importancia para su buen comportamiento en la mezcla, y debe ser comprobado con los áridos que se emplean. En este caso, se observa que los ligantes A y B, con resultados muy parecidos, son los que mejor adhesividad presentan y resulta muy difícil relacionar las características físico-químicas de los ligantes o sus composiciones con los resultados obtenidos en la valoración de la adhesividad.

Figura 4. Pérdidas en seco y tras inmersión a 100 revoluciones

En la valoración del envejecimiento han surgido ciertas diferencias entre los resultados obtenidos por el método UCL, figura 5, y el método convencional basado en el ensayo RTFOT y TFOT. Quizás sea debido a que estos ensayos sólo valoran el envejecimiento que puede tener el ligante durante el proceso de fabricación de la mezcla, mientras que en el método UCL estaría más relacionado con el proceso de endurecimiento durante su vida de servicio. También hay que considerar que el proceso de envejecimiento en el método UCL se hace en presencia del árido, lo que supone una ventaja, ya que permite tener en cuenta los efectos especiales de absorción y de superficie que puede existir entre el ligante y el árido y que pueden repercutir en los resultados del proceso. De acuerdo con estos ensayos sería el betún A, con mayor contenido de asfaltenos, el que menos envejecería, los ligantes B y C, con el mismo proceso de elaboración y similar contenido de asfaltenos, presentan un fuerte envejecimiento inicial, para luego aumentar su resistencia, mientras que el ligante D, presenta un proceso de envejecimiento menos intenso pero más largo y continuo, para acabar siendo el que mayores pérdidas y mayor envejecimiento presenta al final del proceso. Por contra, en el ensayo RTFOT y TFOT resulta el ligante D el más resistente al envejecimiento, el B y el C presentan resistencias similares y es el ligante A el que más envejece. Estas diferencias desaparecen si comparamos los resultados de estos ensayos con los obtenidos en las primeras etapas del ensayo de envejecimiento en el método UCL, allí también resulta que la velocidad de envejecimiento es menor en el ligante D; pero a largo plazo, que es lo que nos interesa en el firme, los resultados son diferentes, y son más interesantes los

proporcionados por el método UCL, que simula este envejecimiento tal y como se produce en el firme, teniendo también en cuenta el posible efecto del árido.

Figura 5. Curvas de envejecimiento a 300 revoluciones

### **3. COMPORTAMIENTO DE LA MEZCLA Y CARACTERÍSTICAS DE LOS LIGANTES**

Una de las partes más interesantes del estudio se centraba en conocer el comportamiento de una mezcla tipo fabricada con los cuatro tipos de ligantes ensayados y valorar la concordancia entre el comportamiento de la mezcla y las características de los ligantes. Para ello, se seleccionó una mezcla cerrada, tipo S-12 del Pliego General de Carreteras del MOPTMA, empleada en España como capa intermedia o de rodadura, y se determinó la variación de sus propiedades reológicas y mecánicas con el tipo de ligante empleado. El estudio se realizó para el 5,25% de betún sobre áridos y se determinaron las siguientes características de la mezcla: módulo de rigidez, ángulo de fase, resistencia a la fisuración por fatiga y resistencia a la deformación plástica.

#### **Módulo de rigidez y ángulo de fase**

El módulo de rigidez y ángulo de fase de las mezclas ensayadas ha sido determinado en un ensayo de compresión simple mediante la aplicación de una deformación senoidal de  $2,5 \cdot 10^{-5}$ . En el ensayo se han variado la frecuencia de la deformación aplicada: 0,1; 0,3; 1,3; 10 y 20 Hz, y la temperatura: 10, 20, 30 y 40 °C, lo que ha permitido obtener las cuatro curvas maestras de las mezclas ensayadas, que han sido recogidas en la figura 6, junto con la de los ligantes. En ella puede observarse similares variaciones y diferencias entre las curvas maestras correspondientes a las mezclas y las correspondientes a los ligantes, sobre todo, en la zona alta de frecuencias, donde la mezcla y el ligante presentan un comportamiento visco-elástico. La mezcla fabricada con el ligante C es la que presenta mayor módulo al igual que ocurre con el ligante, la mezcla fabricada

con el betún D es la más susceptible, y el ligante A y la mezcla fabricada con él son las que menor módulo presentan.

Figura 6. Curvas maestras. Mezclas S-12

Figura 7. Diagrama de Black. Mezclas S-12

En la figura 7 se ha representado el diagrama de Black de los betunes y las mezclas fabricadas con ellos. Se puede observar que para las frecuencias altas y temperaturas bajas, módulo de la mezcla mayor que 1000 MPa, sigue habiendo una buena correlación entre el comportamiento de las mezclas y sus betunes correspondientes. Sin embargo, para frecuencias

bajas o temperaturas altas, cuando el módulo de rigidez del ligante disminuye y su comportamiento es visco-plástico, no existe ya tan buena correlación entre el comportamiento de la mezcla y el ligante, éste aumenta su ángulo de fase mientras que en la mezcla se mantiene o incluso disminuye. Esto quiere decir que en el comportamiento visco-elástico de la mezcla es predominante la respuesta del ligante, mientras que en su respuesta visco-plástica puede ser predominante el esqueleto mineral y tener menor influencia el ligante. Este valor del módulo de rigidez de la mezcla, 1000 MPa, en que comienza a ser predominante el comportamiento de su esqueleto mineral, se corresponde con un valor de  $G^*/\text{sen}\delta$  de 2-5 MPa del ligante que es el valor que según el SHRP debe mantener el ligante a la temperatura máxima a que va a estar la mezcla en el firme. Es decir, que según el SHRP, el ligante debe mantener una consistencia y rigidez mínima en la mezcla de modo que su comportamiento sea predominante y asegure su buena respuesta.

### **Comportamiento a fatiga**

Mediante la aplicación de un ensayo dinámico a tracción-compresión se ha determinado a la temperatura de 10 °C la resistencia a fatiga de las mezclas fabricadas con los cuatro ligantes analizados. El ensayo se realiza a tensión controlada a una frecuencia de 10 Hz, hasta que produce el fallo la probeta. Los resultados obtenidos han sido recogidos en la figura 8. Se observa que no existe una total concordancia entre estos resultados y los obtenidos en el método SHRP para la caracterización de los ligantes. De acuerdo con éste método la mezcla que peor comportamiento debía presentar a fatiga sería la mezcla C cuyo producto  $G^*\text{sen}\delta$  es el más elevado, luego debería ser la mezcla fabricada con el ligante D y por último las fabricadas con el ligante B y A.

Figura 8. Leyes de fatiga

Por otra parte, en la evaluación global de la resistencia a la fisuración por fatiga de una mezcla en el firme no solamente hemos de tener en cuenta su ley de fatiga sino, también, su módulo y la variación de ambos con la temperatura. Si mediante la aplicación del programa Moebius de ESSO S.A.F. determinamos para las cuatro mezclas la vida a fatiga de un pavimento asfáltico "full deepht" de 25 cm de espesor, tendremos resultados, tabla 2, que todavía se



contradicen más con la valoración de los ligantes según el procedimiento SHRP. En dicha tabla puede observarse como la mezcla B, con mayor módulo que la A, es la que presenta un mejor comportamiento a fatiga, luego serían la C y la A, y por último, con cierta diferencia, la D.

Tabla 2. Vida a fatiga de un pavimento asfáltico “full deepht” de 25 cm de espesor

### **Resistencia a las deformaciones plásticas**

La resistencia a las deformaciones plásticas de las cuatro mezclas ensayadas han sido evaluadas por dos procedimientos diferentes, mediante un ensayo compresión dinámico y en la máquina de pista. En el primero se ha determinado para dos condiciones distintas de temperatura, 30 y 40 °C, el número de aplicaciones de una carga dada necesarias para producir una deformación permanente del 6%. La carga aplicada es senoidal, de amplitud 0,3 MPa y 10 Hz de frecuencia. En el segundo se determina la profundidad de la huella que el movimiento oscilante de una rueda produce sobre la mezcla. La presión que ejerce la rueda sobre la mezcla es de 9 Kg/cm<sup>2</sup> y el ensayo se realiza a la temperatura de 60 °C. La resistencia a la deformación plástica de la mezcla se valora a partir de la velocidad de desarrollo de la deformación permanente en el último intervalo del ensayo, 105-120 minutos.

Los resultados de estos ensayos han sido recogidos en la tabla 3, los correspondientes al ensayo de compresión dinámica, realizados en las cuatro mezclas para el 5,25 de betún s.a., y en la figura 9 se han representado los resultados del ensayo de máquina de pista para los tres contenidos de ligante: 4,5; 4,75 y 5%, empleados. Con los dos procedimientos y las tres temperaturas ensayadas las mezclas fabricadas con los ligantes C y A son las que mayor resistencia a las deformaciones plásticas presentan, con resultados muy similares, que concuerdan con las características, también muy similares, de los ligantes a altas temperaturas: temperaturas de anillo y bola y  $G^*/\text{sen}\delta$ , aunque su penetración a 25 °C sea muy diferente.

### Tabla 3. Ensayo de compresión dinámica

### Figura 9. Velocidades de deformación. Ensayo de pista

La mezcla fabricada con el betún B presenta una menor resistencia a las deformaciones plásticas, aunque suficiente para poder elaborar con ella mezclas resistentes a las deformaciones plásticas, adecuadas para climas cálidos y tráfico pesados según la normativa española. La mezcla D es la que menor resistencia presenta, lo que concuerda con la características del ligante que presenta la mayor susceptibilidad y el menor punto de reblandecimiento.

## 4. CONCLUSIONES

El estudio realizado ha servido para poner de manifiesto el efecto que la composición y características de los ligantes puede tener en el comportamiento de la mezcla, tabla 4. En principio, los ligantes elaborados por semisoplado, que presentan un mayor contenido de asfaltenos, pueden resultar más resistentes a las deformaciones plásticas que los ligantes procedentes de la destilación directa, que presentan más resistencia a su fisuración por fatiga, resultando ambos totalmente adecuados para su empleo, de acuerdo con la tecnología y normativa existente en España, para la fabricación de mezclas bituminosas que se vayan a emplear en las condiciones más extremas de tráfico y temperatura.

Mayor problema presentan los ligantes procedentes de la fabricación de aceites, son más susceptibles, menos resistentes a la fisuración por fatiga y a las deformaciones plásticas. La

mayor ventaja que ofrece este ligante sería su resistencia al envejecimiento de acuerdo con el ensayo RTFOT que desaparece cuando se tiene en cuenta su envejecimiento a largo plazo.

La diferencia de comportamiento apreciado en las mezclas puede predecirse en parte a partir de los ensayos de caracterización de los ligantes:

- Las variaciones obtenidas en la determinación de los módulos dinámicos de las mezclas son similares a las obtenidas para los ligantes con el Bohlin Rheometer.
- La resistencia a las deformaciones plásticas de la mezcla está en concordancia con el contenido de asfaltenos del ligante, sus temperaturas de anillo y bola o la temperatura máxima de empleo determinada por el procedimiento SHRP.
- Existen discrepancias entre la valoración de la resistencia a la fatiga de los ligantes evaluada a partir del procedimiento SHRP y la respuesta a fatiga de la mezcla. No siempre las mezclas fabricadas con ligantes de menor valor  $G^* \sin \delta$  resultan las más resistentes.
- El método UCL permite valorar las pérdidas de flexibilidad de la mezcla y el aumento de su fragilidad al descender la temperatura, así como la adhesividad árido-ligante y el proceso de envejecimiento de éste en el firme.

## **BIBLIOGRAFIA**

- ANDERSON, D. A. (1994): "Programme SHRP. Méthodes d'essai et spécifications des liants". Revue Générale des Routes et des Aérodrômes, nº 714. París.
- MIRO, R (1994): "Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo Cántabro". Tesis Doctoral. ETSICCP. Universidad Politécnica de Cataluña.
- PEREZ JIMENEZ, F.; MIRO, R. (1993): "Characterization procedure of asphalt binders with the Cántabro test. UCL method". 5th Eurobitume Congress. Volume IA. Stockholm.
- PEREZ JIMENEZ, F.; MIRO, R. (1994): "Nueva metodología para caracterización de ligantes asfálticos: el método UCL". Revista Carreteras, nº 73. Madrid.
- PEREZ JIMENEZ, F.; MIRO, R. (1995): "Caracterización mecánica de ligantes asfálticos: método UCL". Revista Rutas, nº 48. Madrid.
- SOURY, M. P. (1994): "Normes européennes et SHRP". Revue Générale des Routes et des Aérodrômes, nº 714. París.
- SUPERPAVE: "Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing". Asphalt Institute. Superpave Series nº 1 (SP-1).