

# LA NUEVA VIDA DEL BETUN. ÚLTIMA INNOVACION EN REGENERACION DEL BETUN ENVEJECIDO DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS

E. LOPEZ

FENIXFALT SAS France

e.lopez@fenixfalt.com

C. GASCA ALLUE

ALDESA - Colegio de Ingenieros de Caminos de MADRID ESPANA

01cga@ciccp.es

P. CHIFFLET

Roger MARTIN SA France

philippechifflet@rogermartinsa.com

C. GARCIA SERRADA

COLLOSA ESPANA

carlosgarcia@collosa.es

## RESUMEN

Al pasar a través del mezclador de una planta de fabricación de aglomerado y bajo el efecto de los elementos del clima y del tráfico, el betún envejece y pierde gradualmente su principal ventaja: la flexibilidad. El envejecimiento del betún: resultado de la oxidación por el aire y por la evaporación de los componentes volátiles, conduce a la pérdida de su comportamiento viscoelástico. Añadir a una mezcla, material reciclado, introduce al nuevo betún de aportación, un betún cuyas características alteradas ponen en peligro la continuidad a medio plazo del ligante procedente de la mezcla y en consecuencia la de las capas del firme.

La sociedad sensibilizada ante la necesidad de reciclar los materiales que consume, considera ahora que se debe aumentar el reciclado de las mezclas asfálticas. Ante este cambio ineludible, era fundamental contar con un proceso físico-químico con capacidad de permitir la reutilización máxima de los aglomerados recuperados.

Este artículo presenta los aditivos desarrollados para regenerar los betunes envejecidos. Dichos productos interactúan sobre los componentes alterados devolviendo al ligante envejecido unas características idénticas a la de los betunes o ligantes nuevos. Estos aditivos facilitan la reutilización de cualquier aglomerado procedente de las calzadas. Ayudan a conservar las materias primas energéticas y minerales atribuyendo así a los aglomerados el calificativo "materiales sostenibles". El proceso se aplica a todos los tipos de betunes con la opción de conseguir betunes convencionales o modificados. Estos aditivos, que son la causa del reciclado en caliente, favorecen la máxima incorporación de reciclado de las mezclas. Estando las tasas de incorporación solamente limitadas por las características de los dispositivos de calentamiento de las plantas de reciclaje. Durante la fase de la mezcla, los aditivos en forma de pequeños granulados se incorporan y reaccionan dentro de las películas del betún.

El análisis calorimétrico diferencial y la observación de la morfología estructural de las matrices regeneradas muestran una reducción de las fracciones cristalizables y la presencia de una mezcla homogénea después de la reacción. Estos resultados confirman la capacidad del proceso para intervenir sobre las partes alteradas donde se produce la reducción de las zonas oxidadas.

Algunas obras han demostrado ya el valor y la durabilidad de estas mezclas. Otras obras están en curso de ejecución y de evaluación en carreteras francesas. Se presentan resultados de pruebas mecánicas y pruebas de seguimiento estandarizado ejecutadas.

## 1 INTRODUCCION

La carretera es un elemento vital e indispensable para el desarrollo de nuestras sociedades. Integrada en todos los aspectos ambientales, la carretera debe situarse dentro del marco del desarrollo sostenible, utilizando componentes cuyo ciclo de vida deberá volver a empezar con posterioridad. Entre los materiales que componen las carreteras, las bases flexibles con aglomerados han llegado a tener una parte muy importante en su constitución. Así pues un enorme yacimiento de betún y áridos está disponible en el planeta y debe volver a reutilizarse.

Sustancia extraída de un petróleo cada vez más caro y de escasa disponibilidad, el betún presenta, a diferencia del cemento, la ventaja de reblandecerse por calentamiento de las mezclas. Por tanto, es posible a través de la regeneración de sus propiedades, reutilizar los aglomerados. Los betunes se deterioran con el tiempo al perder su flexibilidad. En este proceso de degradación de su calidad, la etapa más dura a la que se va a ver sometido, se produce durante la fabricación y el extendido en las carreteras. De hecho, en la envuelta se extiende intensamente a alta temperatura una pequeña cantidad de ligante sobre un área muy grande de materia mineral en presencia de aire muy caliente. Se produce una volatilización con oxidación que puede persistir varias horas durante el almacenamiento y el extendido. Posteriormente, el proceso de envejecimiento será más lento y la evolución de su estado dependerá de la actuación de los elementos exteriores y de los esfuerzos a los cuales estará sometido.

Siendo necesario disponer de una vía de renovación de este material, un proceso químico de regeneración se inició en 1996. Esta actuación se desarrolló dentro de un proyecto de refuerzo de la CN 525 en España. Básicamente consiste en combinar simultáneamente un proceso químico de reducción de los componentes oxidados asociados al desarrollo de una red elastomérica en el seno del betún.

Desde entonces el proceso FENIXFALT se ha ido perfeccionando. Los aditivos patentados, idóneos para el tratamiento de todo tipo de betún envejecido, evolucionaron desde la forma líquida para llegar a una forma sólida de tipo granulada, de empleo fácil, almacenable y transportable a cualquier lugar.

Especialmente aplicable al tratamiento al completo del 100% de cualquier aglomerado envejecido, el proceso funciona especialmente el reciclado parcial. Permite con garantía de calidad para los aglomerados fabricados, la integración de la máxima cantidad de material usado al nuevo aglomerado siendo estas cantidades solo limitadas por las características de la planta asfáltica.

Igualmente, es posible convertir el betún regenerado en un ligante elastomérico injertado químicamente.

En este documento se presentarán:

- Las características fundamentales contempladas en el ligante regenerado describiendo las propiedades específicas del proceso,
- La presentación de la primera realización española ejecutada en 1996 con su seguimiento,
- La prueba francesa del 2010, ejecutada a través de la fase de aprobación del concurso francés 2009 de innovación en carreteras.

## 2. DESCRIPCION DE LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO DE REGENERACIÓN.

El proceso de evaluación de las propiedades se ha descrito en [1]. Realizado en el laboratorio Collosa, se llevó a cabo entre 2000 y 2005 sobre el betún extraído de un aglomerado fresado procedente de la capa de rodadura de la A6 a su paso por Medina del Campo (España).

Tabla 1 - Características de los betunes envejecidos utilizados en el estudio.

|           |    | % de betún | % de filler | Pen | AyB °C |
|-----------|----|------------|-------------|-----|--------|
| Muestra 1 | B1 | 5,5        | 8,2         | 9   | 59     |
| Muestra 2 | BR | 5          | 7,2         | 19  | 57     |

Las principales características observadas resultaban de la reducción de las partes oxidadas del betún envejecido mediante la integración simultánea bajo forma de injerto a los lugares específicos, desarrollando una red elastomérica dentro de la matriz betún que vuelve a recuperar un comportamiento similar a la de un betún nuevo o de un betún modificado.

Esa propiedad se observó de inmediato a través de los ensayos Marshall. Durante la prueba, la estabilidad disminuye apreciablemente, mientras que la deformación antes de la rotura aumenta de manera considerable, superando la de un betún nuevo y alcanzando las de un betún modificado. Dos formas de introducción de los agentes químicos se han utilizados, a través del vector betún, o por vía de los máltenos.

Estas características se destacaron por el seguimiento comparativo del módulo complejo de los ligantes así preparados frente a varios ligantes testigos.

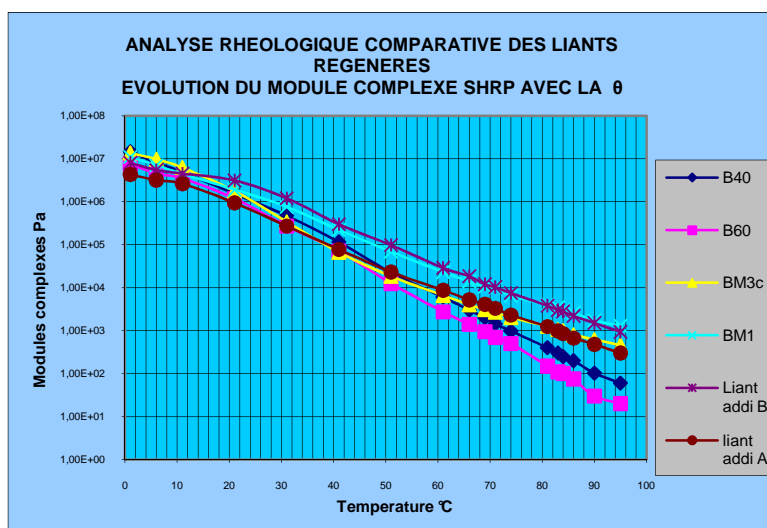


Figura 1 - Módulo complejo de los ligantes regenerados A y B y de los testigos.

Los mismos ligantes sometidos al ensayo de envejecimiento RTFOT (fig.2).

El comportamiento de los módulos complejos de los ligantes procedentes del tratamiento de regeneración es similar al de los betunes modificados (BM1 y BM3c) con valores bajos a temperaturas bajas y mayores valores con temperaturas altas. Después de someterse al envejecimiento RTFOT, los ligantes regenerados A y B, evolucionan de forma muy parecida a los otros ligantes testigos.

La adquisición de elasticidad también se pone en evidencia a través del ensayo de recuperación elástica. El proceso de transformación química se puso en evidencia de una forma macroscópica, mediante el seguimiento del comportamiento global de los grupos químicos que constituyen los betunes a través del análisis calorimétrico diferencial (DSC) [2] [3].

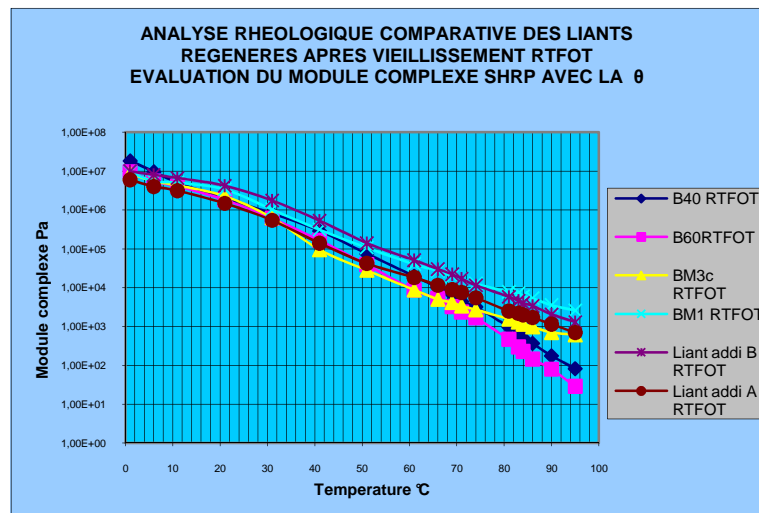


Figura 2 - Módulos complejo de los ligantes regenerados A y B y de los testigos después del RTFOT.

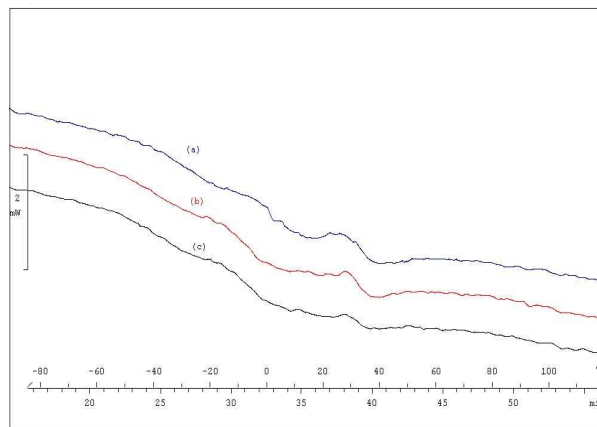


Figura 3 - Comportamiento DSC del betón extraído (a) de la mezcla con aditivos (b) y del betón (c) resultante después de la adición de los reactivos.

La Figura 3 muestra una disminución del contenido de la familia química “fracción cristalizable” entre 0/10 °C y 70/90 °C. Las para finas que aparecen en esta área, son conocidas por ser químicamente inertes y no pueden evolucionar en el nivel térmico utilizado en la fabricación de estos ligantes. Esta reducción de concentración aparece después de activarse el proceso de reacción y puede atribuirse sólo a las consecuencias del mismo.

### 3. EJEMPLO DE LA PRIMERA OBRA CON RECICLAJE AL 100% Y CON REGENERACIÓN DEL BETUN (CN 525 - C&L ESPAÑA 1996)

#### 3.1. Antecedentes y características de la carretera

Se trata de la CN 525 en ZAMORA (España) entre MOMBUEY Y PADORNELO (pK 52.08 y p.K.104.6) que une Castilla y León con Galicia, cuyo proyecto de rehabilitación (1993) preveía un refuerzo con espesores variables en relación con las deflexiones (Tabla 2). El paquete estructural integraba una capa de rodadura con mezclas drenantes para la zona de llano o una capa delgada para las zonas de montaña. En 1995, la evaluación del tráfico pesado condujo, de acuerdo con la norma española, a la categoría TR2 baja,

teniendo en cuenta la construcción en paralelo de una autopista que se abriría en 1998. El clima es templado con una temperatura media anual de 10 °C y máximas de hasta 30 °C y mínimas de - 5 °C.

Tabla 2 – Espesores de refuerzo previstos en el proyecto inicial.

| Firme    | Deflexiones dkc(1/100 mm) | Espesores de refuerzo (cm) |
|----------|---------------------------|----------------------------|
| MB 21 cm | dkc < 100                 | 8                          |
| GC 25 cm | 100 < dkc < 125           | 12                         |
| SC 20 cm | 125 < dkc < 150           | 15                         |
|          | dkc > 150                 | Fresado y reposición       |

### 3. 2. Modificación del proyecto.

Con la confirmación de las características que se podrían obtener con el uso de la regeneración en caliente del betún a través de un solo aditivo empleado en caliente: módulo dinámico de entre 12 000 y 14 000 MPa y los valores  $\epsilon_6$  de fatiga 120/140  $\mu$ def y el compromiso de ALDESA empresa adjudicataria, de tener operativa en España, una máquina de reciclado "in situ" ART 220, el proyecto fue redefinido. Utilizando el modelo de diseño ALYZE III (base elástica lineal), el refuerzo se hizo a partir de una operación de reutilización de los aglomerados existente en la calzada tratándolos según espesores variables en relación con el nivel de la deflexión del firme.

Tabla 3 – Espesores de refuerzo previstos en el proyecto final.

| Deflexiones dkc(1/100 mm) | Espesores de refuerzo (cm) |
|---------------------------|----------------------------|
| dkc < 25                  | 0                          |
| 25 < dkc < 50             | 5                          |
| 50 < dkc < 75             | 6                          |
| 75 < dkc < 100            | 12                         |
| 100 < dkc < 125           | 14                         |
| 125 < dkc < 150           | Fresado y reposición       |

### 3. 3. Estudio en laboratorio realizado por el CEDEX

#### 3.3.1 Caracterización de los aglomerados.

ALDESA procedió a la extracción de una serie de 10 muestras fresando la calzada. Las catas fueron analizadas por dos laboratorios privados: GEOCISA y INZAMAC. Cabe señalar que parte de la capa superficial estaba cubierta por lechadas bituminosas. Las características de los fresados se agrupan en la Tabla 4.

Tabla 4 – Características medias de los fresados.

|                                  | INZAMAC     | GEOCISA   |
|----------------------------------|-------------|-----------|
| % de bitume (intervalle)         | 3,74 – 4,91 | 3,6 – 5,0 |
| % de bitume (moyenne)            | 4,41        | 4,30      |
| Pénétration 1/10 mm (intervalle) | 19 - 26     | 4 - 17    |
| Pénétration 1/10 mm (moyenne)    | 21          | 10        |
| TBA °C (intervalle)              | 63 – 66     | 73 - 89   |
| TBA °C (moyenne)                 | 65          | 80        |
| % de filler                      | 11          | 11        |

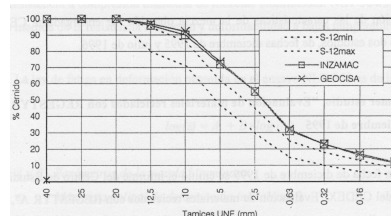


Figura 4 – Granulometrías medias De los fresados.

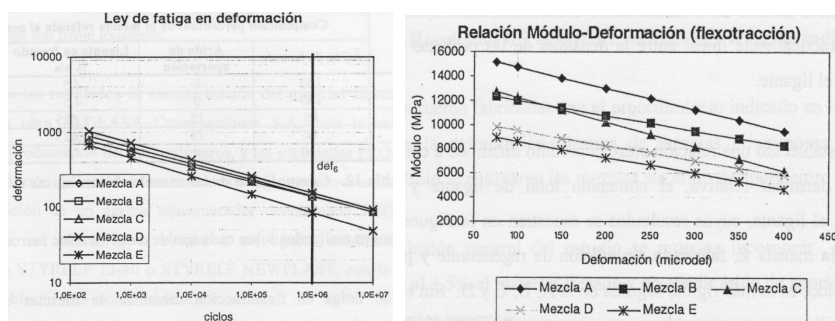
#### 3.3.2. Estudio de las características de los aglomerados con betún regenerado.

El campo de formulaciones estudiadas figura en la tabla 5. Debido a la viscosidad del aditivo se utilizó entre 170 y 180 °C. Los áridos calizos gruesos utilizados fueron de 12,5/20 mm. Se definieron y estudiaron cinco tipos de mezclas (fabricación a 185 °C).

Los distintos aglomerados sirvieron para la ejecución de las pruebas de fatiga y de medición de los módulos dinámicos. Los módulos de los aglomerados resultaron ser muy dependientes de la compacidad de las mezclas. Se midió también la resistencia a la tracción directa, dando la formula A, el mejor comportamiento.

Tabla 5 - Composición de las mezclas estudiadas.

| Mezclas | % de fresado sobre mezcla | % de 12,5/20 sobre mezcla | Contenido de betún ppc en el fresado | Aditivo en ppc |
|---------|---------------------------|---------------------------|--------------------------------------|----------------|
| A       | 100                       | 0                         | 4,5                                  | 1,0            |
| B       | 100                       | 0                         | 4,5                                  | 1,5            |
| C       | 85                        | 15                        | 3,825                                | 1,675          |
| D       | 85                        | 15                        | 3,825                                | 2,175          |
| E       | 100                       | 0                         | 4,5                                  | 0,0            |



Figuras 5a y 5b – Leyes de fatiga y módulo-deformación ( $\epsilon_6$   $\mu$ def).

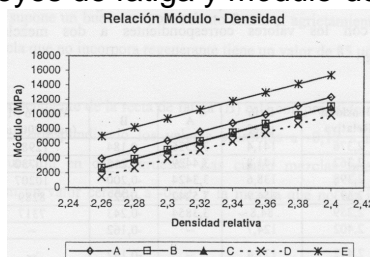


Figura 6 - Relación entre la densidad y módulos.

### 3.3.3 Formulación seleccionada.

Fue elegida la formula A con un 1% de aditivo de regeneración y sin uso de áridos de aportación caracterizada con un módulo dinámico de 13.000 MPa asociado a una deformación en fatiga de  $\epsilon_6$  140  $\mu$ def.

### 3.4 Desarrollo de la obra.

Se trataba de una obra totalmente ejecutada “in situ”, utilizando un conjunto de equipos operando directamente sobre la calzada. Se fresaban espesores variables de aglomerado y el material se mantenía sobre la base fresada con fin de ser absorbidos por la ART 220 “Asphalt recycling travelplant”. Dicha maquina recupera el fresado y lo transporta al horno de tipo tambor equipado en su interior con un segundo tambor concéntrico para evitar el contacto de la llama con el betún del fresado. El aditivo regenerador se inyectaba a la mitad de la longitud del horno. La maquina por si misma realizaba las tareas de barrido, de aspiración del polvo e de las partículas de la base fresada, y pulverizaba el riego de adherencia. El aglomerado a la salida del horno se arrojaba sobre la calzada fresada o dentro de un sistema de elevación que lo introducía en la tolva de la extendedora (figura 7). El aglomerado reciclado se recubría con una capa de rodadura.

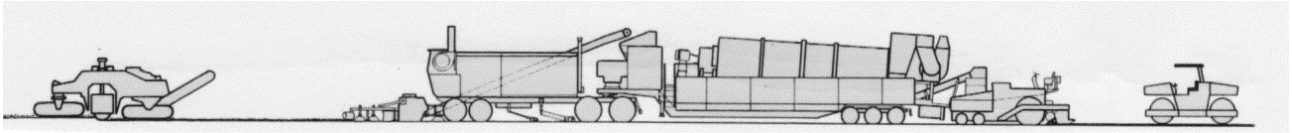


Figura 7 – Vista del conjunto de los equipos que componen el tajo.

### 3.5 Controles durante la obra.

#### 3.5.1 Sobre el aditivo de regeneración.

Las muestras tomadas durante la obra (06/96) sirvieron para fabricar mezclas en laboratorio con 1% de aditivo. Estos aglomerados fueron evaluados a través del ensayo de fatiga (Fig 8)

Figura 8 - Ensayos de fatiga.

| Mezcla         | Densidad Relativa | $\epsilon_6$ $\mu\text{def}$ | A    | B      | Módulo MPa (ciclo 200, 200 $\mu\text{def}$ ) |
|----------------|-------------------|------------------------------|------|--------|--|
| A (referencia) | 2,376             | 141                          | 3,25 | -0,184 | 13000  |
| R5             | 2,344             | 125                          | 3,03 | -0,155 | 13500  |
| R3             | 2,362             | 120                          | 3,25 | -0,196 | 14100  |
| RA             | 2,367             | 131                          | 3,10 | -0,164 | 14000  |

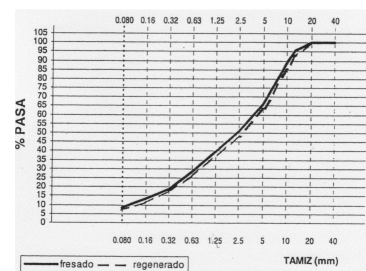


Figura 9 - Los valores promedio de los tamaños de grano de los 2 componentes.

El análisis granulométrico de control dio resultados homogéneos. Los valores granulométricos medios de los dos tipos de materiales: fresado y aglomerado se incluyen en la Figura 9.

Durante la obra se tomaron muestras de mezclas en zonas con espesores de reciclado de 6 y 14. Revelaron que se conseguía una menor compactación en capas finas tratadas e como consecuencia una des módulo (Figura 10).

| Muestra                             | Densidad | E (MPa) | $\epsilon_6$ ( $\mu\text{def}$ ) |
|-------------------------------------|----------|---------|----------------------------------|
| 1. P.K. 68,580 (reciclado 12/14 cm) | 2,35     | 11.000  | 123                              |
| 2. P.K. 67,904 (reciclado 5/6 cm)   | 2,26     | 8.200   | 117                              |

Figura 10 - Evolución del módulo y  $\epsilon_6$  con la compactación de los aglomerados.

### 3.6. Inspección de la obra: campaña realizada por el CEDEX.

Esta operación se llevó a cabo en noviembre de 2000. Consistió a una inspección visual de toda la obra con levantamiento de los defectos, medición de las deflexiones y extracción de testigos para su evaluación en laboratorio.

#### 3.6.1 Inspección visual.

Según el examen visual se considero la obra en su conjunto como buena. Se observan algunos desperfectos en zonas específicas, que se traducen en grietas y fisuras: reflexión de la fisura de juntas del arcén no tratado, fisura longitudinal central de obra, cuya



reflexión podría provenir de las capas subyacentes, así como un aumento de las grietas debido a la base de grava cemento (25-35 por km).

Un tramo de 1 km se dejó sin recubrimiento. Cuenta con más desperfectos que los tramos recubiertos. Esta evolución más desfavorable podría relacionarse con el poco espesor tratado en esta zona (concretamente 4,3 a 6 cm según las catas) y, por tanto con un aglomerado de baja densidad. No se dio la suficientemente atención a la compactación de esta mezcla con espesores delgados.

### 3.6.2 Deflexiones.

En general, los datos de deflexiones han dado valores más altos en los carriles de circulación, del orden del 25 a 40%. Esta ha sido la situación para la mayoría de la obra! Estos datos se recogen en la Figura 11.

El conjunto de los valores son muy buenos, aunque se quedan por debajo de los obtenidos en el estudio analítico, y cuando los parámetros (módulos empleados en el modelo de diseño) han sido superiores a los datos obtenidos en las catas procedentes de la obra. Véanse las Figuras 11 y 12, que permiten ver los resultados obtenidos en la obra.

| Identificación del Tramo |        |          |                    | Deflexiones (I/100 mm) |       |           |               |             |
|--------------------------|--------|----------|--------------------|------------------------|-------|-----------|---------------|-------------|
| P.K.                     | Carril | Zona nº  | Reciclado / Estado | Línea de medida        | Media | Dev. est. | Media +2*dest | min - max   |
| 54,000 - 53,000          | Izdo.  | 1        | 5 cm Agrietado     | Rodada                 | 18,5  | 5,4       | 29,3          | 9,5 - 35,1  |
|                          |        |          |                    | Entre Rodadas          | 14,3  | 3,8       | 22,0          | 7,9 - 24,4  |
|                          |        |          |                    |                        |       |           |               |             |
| 80,000 - 80,950          | Deho.  | 4        | 6 cm Sin grietas   | Rodada                 | 27,4  | 7,5       | 41,9          | 12,4 - 44,4 |
|                          |        |          |                    | Entre Rodadas          | 18,7  | 6,1       | 31,0          | 8,3 - 32,0  |
|                          |        |          |                    |                        |       |           |               |             |
| 103,400 - 103,175        | Izdo.  | 6        | 12 cm Agrietado    | Rodada                 | 31,6  | 7,2       | 46,0          | 9,8 - 44,6  |
|                          |        |          |                    | Entre Rodadas          | 21,1  | 7,0       | 35,1          | 3,7 - 41,6  |
|                          |        |          |                    |                        |       |           |               |             |
| 69,000 - 69,700          | Deho.  | 8        | 12 cm Sin grietas  | Rodada                 | 14,2  | 4,9       | 24,0          | 8,0 - 25,0  |
|                          |        |          |                    | Entre Rodadas          | 23,0  | 8,0       | 38,9          | 10,4 - 46,6 |
|                          |        |          |                    |                        |       |           |               |             |
| 76,000 - 75,500          | Izdo.  | 3 (T.C.) | 6 cm Agrietado     | Rodada                 | 19,4  | 6,1       | 31,5          | 9,6 - 27,8  |
|                          |        |          |                    | Entre Rodadas          | 31,1  | 10,1      | 51,3          | 16,6 - 53,0 |
|                          |        |          |                    |                        |       |           |               |             |
| 75,400 - 75,950          | Deho.  | 3 (T.C.) | 6 cm Agrietado     | Rodada                 | 21,3  | 7,8       | 36,9          | 12,6 - 41,4 |
|                          |        |          |                    | Entre Rodadas          |       |           |               |             |
|                          |        |          |                    |                        |       |           |               |             |

Figure 11 – Deflexiones levantadas

| Deflexión $d_{lc}$ del firme antiguo Campaña mayo de 1995 (I/100 mm) | Espesor de reciclado de cálculo (cm)    | Deflexión de cálculo de la sección reciclada y reforzada (I/100 mm) |
|--|---|---|
| $d_{lc} = 25$  | 0                                       | $d = 25$  |
| $d_{lc} = 50$  | 4                                       | $d = 45$  |
| $d_{lc} = 75$  | 5                                       | $d = 65$  |
| $d_{lc} = 100$   | 10                                      | $d = 90$  |
| $d_{lc} = 125$   | 14                                      | $d = 100$   |
| $d_{lc} = 150$   | Reconstrucción sección 212 6.1 y 2 I.C. | --  |

Figura 12 - Valores de la deflexiones previstas en el cálculo.

### 3.6.3 Estudios de los aglomerados extraídos después de 5 años de servicio.

Se extrajeron 28 catas de la calzada. Las dos fotos de abajo muestran el aspecto de las capas de 5/6 cm y de 12/14 cm del aglomerado con betún regenerado.

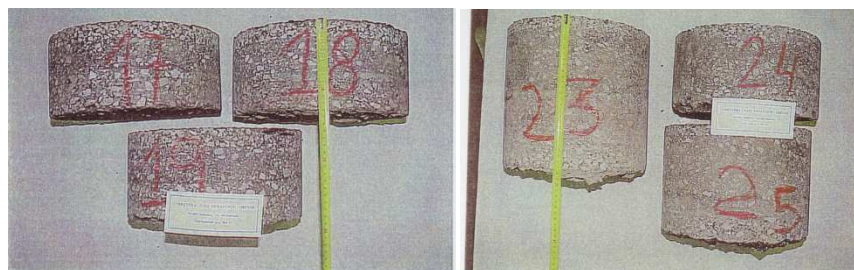


Figura 21. Zona 5: reciclado 5/6 cm – Testigos 17, 18 y 19 p.k. 86+135 a 86+200. Figura 23. Zona 9: reciclado 12/14 cm – Testigos 23, 24 y 25 p.k. 95+550 a 95+700.

Figuras 13 - Fotos de catas extraídas

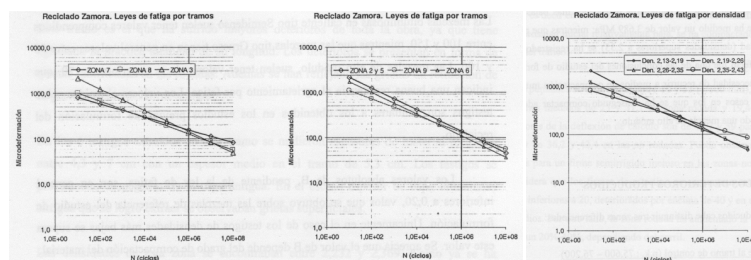


Figura 14 – Leyes de fatiga y densidades de los aglomerados (según zonas)



Las medidas de  $\varepsilon_6$  y de las densidades indican el estado del aglomerado. Agrupados en la figura 14, vemos que para las catas de baja densidades, todos los valores de  $\varepsilon_6$  están por encima de 100  $\mu\text{def}$  y alcanzan unos niveles de 155  $\mu\text{def}$ , cuando las densidades se aproximan a niveles de 2,38, tal como se obtuvieron en laboratorio.

#### 3.6.4 Observaciones emitidas por la administración española de carreteras.

De manera general, se consideró que la operación de reciclado del 100% del aglomerado con regeneración del betún dio un resultado satisfactorio. Se confirmó que la mezcla era de difícil compactación demostrándose que con espesores inferiores a 6 cm no se alcanzó la densidad mínima requerida y contribuyendo a materiales mecánicamente menos eficientes. También se consideraron limitados los defectos observados después de 5 años de servicio.

#### 3.6.5 Comentarios

Hoy en día, el uso de este equipo de tratamiento in situ, considerando que la falta de respeto al medio ambiente no sería un obstáculo, debe ser reconsiderado. En primer lugar es la forma de transmisión del calor a los materiales lo que debe ser revisado para evitar el sobrecalentamiento de los materiales bituminosos. Luego debe asegurarse la calidad de envuelta de las mezclas a la salida del horno con la adecuación de los aditivos, punto crucial para alcanzar características óptimas. El tercer punto se refiere a la compactación de este tipo de mezclas. Estas mezclas con muy alto módulo son muy dependientes de la temperatura, resultando difícil de alcanzar las densidades requeridas; este criterio que probablemente no fue suficientemente tomado en cuenta durante la ejecución de las obras y posible razón de los bajos niveles de densidades.

Este proyecto constituye la génesis del proceso que conlleva toda la problemática del reciclado así como los resultados a los que conducen los aditivos de regeneración. Hoy en día, gran parte de estos parámetros se han tenido en cuenta en lo que se refiere al reciclado fijo parcial. Es el marco del procedimiento presentado a continuación.

### **4. EJEMPLOS DE OBRAS DE RECICLADO PARCIAL CON REGENERACIÓN Y TRANSFORMACION DEL LIGANTE EN PMB. EVALUACIÓN DE LAS CARACTERISTICAS DE LOS LIGANTES OBTENIDOS.**

El procedimiento actual funciona con aditivos sólidos granulados los cuales contienen todos los componentes. El ejemplo francés presentado constituye un elemento de la fase de ensayo solicitada por el SETRA, para que se valide una de las técnicas del procedimiento, presentado al concurso 2009 de innovación en carreteras.

#### 4.1 Evaluación de la fórmula de trabajo.

Se comprueban simultáneamente ambas técnicas con el mismo material fresado y con una misma formulación de mezcla 0 / 10. Dos aglomerados integrando cada uno el 40% del mismo material a reciclar serán fabricados: el primero tendrá regenerado la parte del betún envejecido (RGFT) y el segundo (RGMC) al mismo tiempo de la regeneración se transforma el ligante elastómero químicamente unido al betún regenerado. El fresado (0/10) procede del boulevard Champollion en Dijon (Francia) y el aglomerado fabricado es un 0/10, cuya fórmula es producida normalmente en la planta de Val de Saône Enrobés. Según las condiciones de uso (capa de rodadura y tráfico), el nivel de los ensayos es de categoría 2: Duriez, PCG y Ensayo de rodera.

## 4.2 Características de los materiales, formulaciones - estudio de laboratorio.

### 4.2.1 Aglomerado del fresado AE.

5 Análisis: % de betún 5,19 [4,99 a 5,35]; Pen.(10.1 mm) 15.2 [12-20]; A y B 71.6 °C [68-75]; % de filler 10,7 [10,4 a 11,1] y granulometría 0/10.

### 4.2.2 Betún nuevo.

50/70 Thewald: Pen.(01/10 mm) 53; A y B 49 °C.

### 4.2.3 Formulaciones.

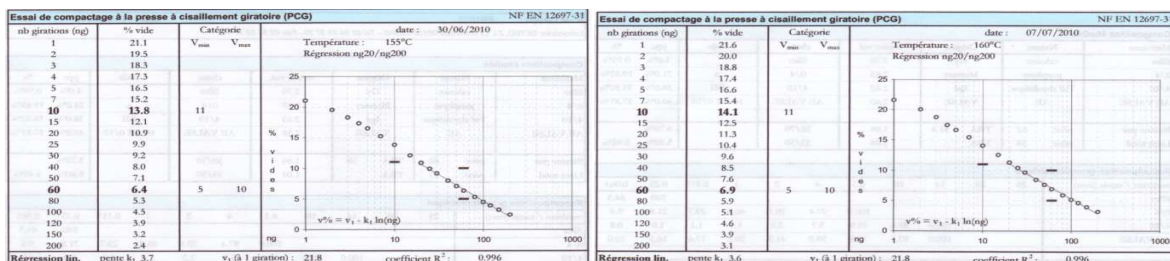
| Constituants et formule |              |                         |                          |              |                 |            |
|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------------------|--------------|-----------------|------------|
| Coupages                | MVRg         | ppc                     | %                        | origine      | nature          | code       |
| filler                  | 2.70         | 1.0%                    | 0.95%                    | Gy           | calcaire        |            |
| 0/4                     | 2.63         | 21.0%                   | 19.85%                   | Moissey      | porphyre        | a          |
| 4/10                    | 2.63         | 38.0%                   | 35.92%                   | Igé          | Tuf rhyolitique | BII        |
| AE VALSE                | 2.58         | 40.0%                   | 37.81%                   | VALSE        | AE              | 10 AE 0/10 |
| <b>Recomposition</b>    | <b>2.609</b> | <b>100.0%</b>           | <b>100.00%</b>           |              |                 |            |
| Liant                   |              |                         |                          |              |                 |            |
| Nature                  | Classe       | TL <sub>ext</sub> (ppc) | TL <sub>int</sub> (%)    | pen (0,1 mm) | TBA (°C)        | MVR        |
| Bitume pur              | 50/70        | 3.70%                   | 3.57%                    | 60.0         | 50              | 1.035      |
| Liant des AE            | 10/20        | 5.21%                   | 4.95%                    | 15.7         |                 | 1.035      |
| Liant total             | 35/50        | 5.80%                   | 5.48%                    | 37.0         |                 | 1.035      |
| Surface spécifique (Σ)  | 12.808       | m <sup>2</sup> /kg      | Module de richesse (K)   |              | 3.43            |            |
| Coefficient α           | 1.016        |                         | MVe (g/cm <sup>3</sup> ) |              | 2.408           |            |

Figura 15 – Formulación del aglomerado con el 40 % de ligante regenerado (RGFT)

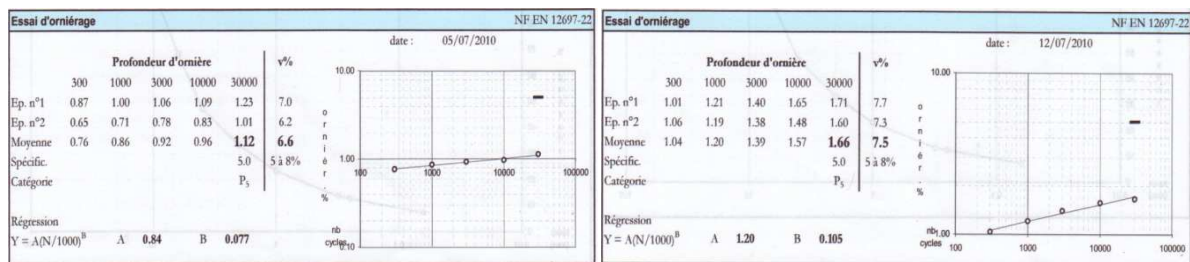
| Constituants et formule |              |                         |                          |              |                 |            |
|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------------------|--------------|-----------------|------------|
| Coupages                | MVRg         | ppc                     | %                        | origine      | nature          | code       |
| filler                  | 2.70         | 1.0%                    | 0.95%                    | Gy           | calcaire        |            |
| 0/4                     | 2.63         | 21.0%                   | 19.85%                   | Moissey      | porphyre        | a          |
| 4/10                    | 2.62         | 38.0%                   | 35.92%                   | Igé          | Tuf rhyolitique | BII        |
| AE VALSE                | 2.60         | 40.0%                   | 37.81%                   | VALSE        | AE              | 10 AE 0/10 |
| <b>Recomposition</b>    | <b>2.613</b> | <b>100.0%</b>           | <b>100.00%</b>           |              |                 |            |
| Liant                   |              |                         |                          |              |                 |            |
| Nature                  | Classe       | TL <sub>ext</sub> (ppc) | TL <sub>int</sub> (%)    | pen (0,1 mm) | TBA (°C)        | MVR        |
| Bitume pur              | 50/70        | 3.70%                   | 3.57%                    | 62.0         | 51.4            | 1.035      |
| Liant des AE            | 10/20        | 5.21%                   | 4.95%                    | 15.7         |                 | 1.035      |
| Liant total             | 35/50        | 5.80%                   | 5.48%                    | 37.7         |                 | 1.035      |
| Surface spécifique (Σ)  | 12.808       | m <sup>2</sup> /kg      | Module de richesse (K)   |              | 3.43            |            |
| Coefficient α           | 1.014        |                         | MVe (g/cm <sup>3</sup> ) |              | 2.412           |            |

Figura 16 – Formulación del aglomerado con el 40 % de ligante regenerado convertido in situ en PMB (RGMC).

### 4.2.4 Ensayos de manejabilidad y medida de rodera



Figuras 17 – Ensayos de manejabilidad con ligantes (RGFT) y (RGMC) modificado.



Figuras 18 – Ensayos de rodera con ligantes (RGFT) y (RGMC) modificado.

Ambas formulaciones cumplen con los requisitos solicitados según el marco de empleo. Teniendo en cuenta los bajos valores de rodera y de manejabilidad se consideraron los resultados equivalentes.

#### 4.3 Obra.

Ambas mezclas se aplicaron el 25/08/2010 en una vía de paso y de estacionamiento de vehículos pesados. Fueron controladas durante la fabricación y la aplicación. Los resultados de análisis fueron conformes, siendo los datos obtenidos muy parecidos entre sí.

#### 4.4 Proceso químico de envejecimiento y puesta en evidencia de las acciones del proceso de regeneración.

##### 4.4.1 Antecedentes.

El proceso de envejecimiento del betún se produce principalmente en la fase de envuelta. Dos acciones ocurren simultáneamente: la evaporación de los componentes ligeros de los máltenos del betún no eliminados en la destilación al vacío y la oxidación de los componentes de azufre y carbono. Dado que ningún betún es similar a otro, las evoluciones son todas diferentes y aleatorias. El primer fenómeno es inmediatamente visible y se traduce en una disminución significativa de la penetración, puesta en evidencia por la extracción de asfalto inmediatamente después de la envuelta. Se demuestra la oxidación por análisis infrarrojos. La oxidación afecta a las moléculas básicas, y por lo tanto, posiblemente, al esqueleto de hidrocarburos vinculante de las propiedades estructurales. El nacimiento o el crecimiento de la función carbonilo traduce este proceso, V. MOUILLET [4] lo ha destacado siguiendo la evolución de dos tipos de betún modificado.

La oxidación del azufre es evidente, pero la relación de este elemento, combinado o libre, a la estructura del esqueleto no es obvia. No hay evidencia de que esta transformación altere las propiedades físicas y mecánicas del betún. La oxidación del azufre, que es también de magnitud aleatoria, da lugar a la aparición o al incremento de la función sulfóxido [4]. La diferencia de reactividad en el potencial de reducción entre el azufre y el carbono, es la ventaja del azufre. Por esta razón la oxidación del carbono es lenta y difícil. La evolución debido al uso de la carretera será más rápida para las mezclas colocadas en rodadura que en capa intermedia. Esta degradación también dependerá de la porosidad y por tanto, de la renovación del aire en el interior de los capilares de la mezcla.

Los otros elementos como el calor, la radiación solar, y el efecto del agua intervienen también pero son menos activos que el oxígeno, y en menor grado la fatiga debida a las altas solicitudes.

Si los carbonilos y lo sulfóxidos reflejan la oxidación, el incremento de la proporción de asfáltenos constituye también un parámetro de la evolución debido al envejecimiento.

Como información, se presentan en la figura 19 algunos ejemplos de la composición de las familias químicas de diversos betunes. Se sitúa el contenido en asfáltenos entre el 9 y el 24%. Por ejemplo, para la obra de la CN 525, el betún envejecido de penetración 9, presentaba la composición SARA mencionada en la Tabla 6. Los niveles altos y también dispersos de asfáltenos muestran la dificultad para establecer vínculos que faciliten la comprensión.

| Asphalt                                    | Softening Point |          | Pen Index | PWN   | Aging Index 60°C | %MS 340nm | % asphaltènes | % saturés(2) | % résines(2) | Aromatics (2) | Fras Point |
|--|-----------------|----------|-----------|-------|------------------|-----------|---------------|--------------|--------------|---------------|------------|
|  | Pen 25°C        | Point °C |           |       |                  |           |               |              |              |               |            |
| Arabian Light (180-220)                    | 225             | 35.0     | -1.34     | -0.7  | 1.6              | 16.6      | 9.0(6.8)      | 20.9         | 24.7         | 45.4          | -20        |
| Canadian Light PDA <sup>(1)</sup> (85-100) | 84              | 47.5     | -0.55     | -1.1  | --               | 15.0      | 9.7           | 11.8         | 10.8         | 67.7          | --         |
| Navajo                                     | --              | --       | --        | --    | --               | 15.2      | 9.3           | 30.0         | 12.3         | 48.4          | --         |
| Safaniya (80-100)                          | 87              | 46.4     | -0.77     | -0.51 | 2.0              | 26.5      | 12.4(10.8)    | 5.0          | 9.4          | 73.2          | -17        |
| Sarago (80-100)                            | 99              | 44.8     | -0.89     | -0.89 | 2.7              | 29.4      | 16.0(16.6)    | 3.1          | 8.3          | 72.6          | -16        |
| Laguna (80-100)                            | 88              | 47.5     | -0.42     | --    | --               | 30.6      | 14.2          | 4.6          | 21.2         | 60.0          | --         |
| Bachaquero (80-100)                        | 90              | 44.0     | -1.42     | -0.33 | 1.8              | 21.8      | 10.6          | 8.4          | 16.0         | 65.0          | -7         |
| Maya-Ithamus (80-100)                      | 85              | 48.8     | -0.15     | -0.07 | 4.6              | 20.6      | 14.0(15.5)    | 17.0(12.7)   | 17.1(19.4)   | 51.9(52.3)    | -18.5      |

Figura 19 - Ejemplos de la composición de diferentes betunes.

Tabla 6 - Composiciones SARA del betún español de la CN 525 (1995).

| SARA %      | RN 525 (1) | RN 525 (2) | RN 525 (3) |
|-------------|------------|------------|------------|
| Saturés     | 9,3        | 7,6        | 6,9        |
| Aromatiques | 33,6       | 37,8       | 35,6       |
| Résines     | 27,1       | 28,5       | 25,1       |
| Asphaltènes | 29,9       | 26,1       | 32,5       |

#### 4.4.2 Características de los betunes y ligantes extraídos.

Se centra la atención en la metodología de selección de las muestras. Para una información lógica y coherente, es preciso emplear materiales básicos habiendo recibido las mismas condiciones de la fase de envuelta. Es decir que los fresados y el betún de aportación deben recibir separadamente una envuelta para poder caracterizar cada comportamiento individual respectivo.

Para esta etapa de caracterización, no se procedió a la fabricación de estos aglomerados testigos que hubieran permitido destacar la nueva parte del envejecimiento recibida por cada betún en la fabricación y en el extendido.

Las simulaciones utilizando los mezcladores de laboratorio son muy alejadas en reproducir el fenómeno de oxidación y de volatilización producidos en los mezcladores de las plantas.

Los betunes: AE extraído y 50/70 no fueron sometidos a la fase "envuelta". No se dispone del efecto oxidación suplementar individual que hubiera mostrado la degradación propia en el índice de carbonilo (en el análisis de IR la banda de absorción en 1700 cm<sup>-1</sup> pone de relieve la función; véase la fig. 20).

Tabla 7 - Valores Pen, A y B y índices de oxidación carbonilos

|                                | Bitume AE                              | Bitume 50/70                           | Bitume RGFT             | Bitume RGMC                  |
|--------------------------------|--|--|-------------------------|------------------------------|
| Pén (1/10mm)                   | 13                                     | 53                                     | 26                      | 25                           |
| TBA °C                         | 72                                     | 49                                     | 58                      | 57                           |
| Indice d'oxydation carbonyle % | 4,4                                    | 0                                      | 1,7                     | 0,3                          |
| Observations                   | n'a pas subi l'effet enrobage centrale | n'a pas subi l'effet enrobage centrale | Obtenu en malaxeur labo | Echantillon issu du chantier |

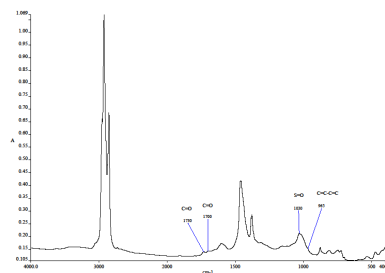


Figura 20 – Ejemplo de espectro IR.

Por otra parte, una muestra de fresado no ha sido tomada en el chorro de alimentación del aglomerado en la fase de fabricación. Por un lado, debido a la dispersión de las penetraciones y de los A y B que mostro el fresado, por otra parte, dado el tiempo de agitación de 8 minutos conseguido en el mezclador de laboratorio y haciendo caso omiso de la parte del aumento del contenido de carbonilo por el efecto de envolvimiento en mezclador de la planta para los dos betunes empleados, seguimos siendo reservado para el valor del índice encontrado para RGFT.

El dato daría a pensar que el betún envejecido introducido con el 40% de fresado no ha sido completamente reducido; a diferencia de RGMC donde el índice de carbonilo se redujo de 1,76% a 0,3% (excluyendo la contribución de la oxidación en la base de betunes AE y 50/70 debido a la capa). Citaremos el estudio de V. MOUILLET [4] mostrando la evolución de los índices de oxidación (carbonilo) para los dos tipos de PMB con SBS o EVA aumentar a 1,7 / 1,8% después del paso en el mezclador de planta. El ligante RGMC obtenido por regeneración y conversión en PMB de la misma mezcla (40% de fresados) mantuvo un índice de oxidación de 0,3% (carbonilo) [ensayos realizados por el CETE de Aix Francia].

Ambos ligantes después de la reacción contienen integrado en su estructura regenerada, grupos estírenos. Estas funciones tienen la propiedad de absorber los rayos UV que remiten en luz visible de color amarillo. El examen de la morfología de los dos ligantes RGFT y RGMC mediante microscopía de epifluorescencia UV permite comprobar la homogeneidad del ligante. Este modo de examen permite distinguir un PMB con SBS producido por simple mezcla de los fabricados con reacción de injerto al betún. El primer tipo presenta grandes glóbulos que desaparece para dar un fondo estrellado sobre fondo negro aclarándose con la concentración en estireno en el segundo tipo.

Las figuras 21 (ensayos realizado por IFSTTAR/LCPC) muestran un tamaño de partículas por debajo de 10µ y algunas del orden de 0,1 a 0,2 mm. Esta morfología confirma el desarrollo del injerto de las cadenas elastoméricas sobre los sitios reducidos de los carboxilos.



Figura 21 - Imágenes de RGFT y RGMC obtenidas por epifluorescencia UV.

La evaluación y de los ligantes RGFT RGMC continuó con el seguimiento de los niveles de las "fracciones cristalizables" por medio de la DSC (micro calorimetría diferencial). La figura 22 recoge la evolución de las curvas de cada uno de los betunes empleado en obra (ensayos realizados por la Universidad de Valladolid).



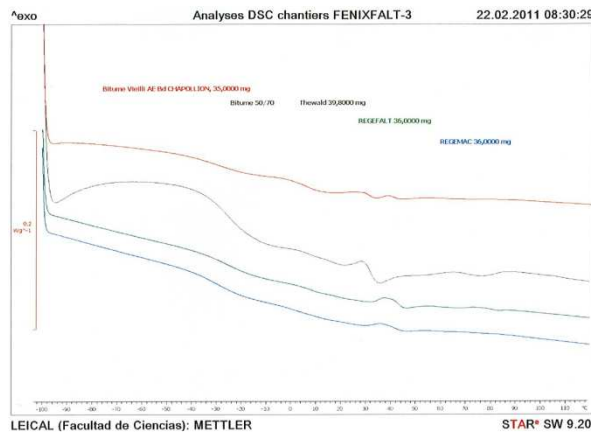


Figura 22 - Curvas calorimétricas de los betunes AE, 50/70 y ligantes RGFT y RGMC

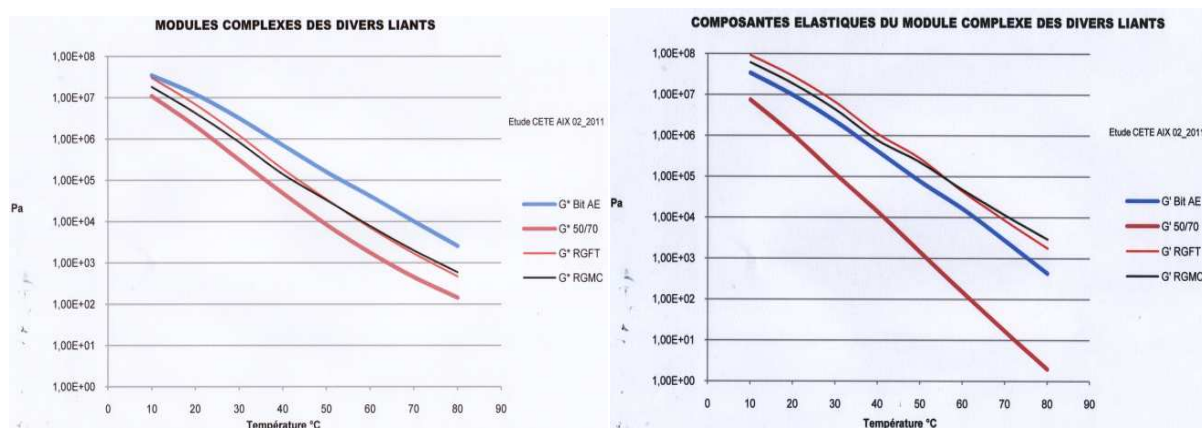
La tabla 8 incluye los valores de entalpía que acompañan a los fenómenos de cristalización y de reorganización del medio betún en relación con los cambios del nivel energético. Los ligantes: regenerado RGFT y modificado RGMC están obtenidos con la misma base 40% de betún AE y 60% de betún 50/70. Según el contenido de FC (fracciones cristalizables) de cada componente de asfalto, hay una reducción respectivamente del 26% y del 50% del contenido en FC para RGFT y RGMC. Esas reducciones de materia no corresponden a una desaparición de sustancias de la familia de las parafinas pero se debe a una transformación de otro tipo de componentes contenidos en las FC. Estos productos después de haber recibido el proceso de regeneración reaccional, cambian de comportamiento ante la energía. Este fenómeno está asociado al proceso reaccional de reducción de los componentes oxidados y de reticulación.

Los parámetros medidos: entalpías  $\Delta H$ , FC y  $T_g$  figuran en la Tabla 8. La temperatura de transición vítrea  $T_g$  ha cambiado muy poco con la regeneración del 40% de betún AE en RGFT pero se mejora la TG de casi -5 °C en el caso de RGMC.

Cuadro 8 – Datos de microcalorimetría

|                              | Betún 50 / 70 | Betún AE | Betún RGFT | Betún RGMC |
|------------------------------|---------------|----------|------------|------------|
| $\Delta H \text{ Jg}^{-1}$   | - 2,93        | -1,46    | -1,74      | -1,17      |
| FC %                         | 1,465         | 0,73     | 0,87       | 0,585      |
| $T_g \text{ }^\circ\text{C}$ | -25,4         | -28,4    | -26,3      | -31,5      |
| Reducción FC %               |               |          | -34        | -56        |

El estudio siguiente se centró en el análisis del modulo complejo  $G^*$  de los distintos betunes y ligantes [estudio realizado por el CEDEX de Aix (Francia)]



Figuras 23 y 24 – Modulo complejo  $G^*$  y su componente elástica  $G'$  de los betunes y ligantes regenerado y modificado RGFT y RGMC.



En la expresión del módulo, se tienen en cuenta numerosos parámetros estructurales. En este caso, los dos betunes utilizados para la comparación son de naturaleza diferente: betún envejecido AE (Pen = 13; AC = 72) y el betún 50/70 (Pen = 53; AC = 49). El examen reológico del betún RGFT extraído del reciclado parcial al 40% de AE, regenerando esta fracción envejecida, muestra un  $G^*$  próximo al del betún AE para temperaturas inferiores a 10 °C. Con temperaturas más altas,  $G^*$  es mucho menor que AE encontrándose entre los dos betunes que lo constituyen. El componente elástico  $G'$  de RGFT es mayor que el de AE, independientemente de la temperatura y demuestra la adquisición del proceso elástico. En el caso del ligante modificado RGMC obtenido por transformación de la misma matriz de betún empleada en RGFT,  $G^*$  es menor que  $G^*$  de AE en todo el rango de temperatura más cercano al nivel del módulo  $G^*$  del 50/70. El componente elástico,  $G'$  del RGMC es también superior al  $G'$  de los dos betunes: AE y 50/70 en toda la gama de temperaturas. Todas las pruebas realizadas en este experimento industrial llevada a cabo en 2010: IR con la reducción de la oxidación = índice carbonilo, la reducción de las fracciones cristalizables, la epifluorescencia UV y el módulo complejo con aumento de su componente elástico  $G'$ , confirma las características de transformación con la regeneración y de adquisición del carácter elástico relacionados con la especificidad del método. Recordaremos que la evaluación se centra en un reciclaje parcial del 40%, por lo cual los rasgos debido a la morfología de cada betún siguen siendo pronunciados. En el caso del reciclado de un aglomerado con regeneración del betún envejecido sería su morfología la que induciría el comportamiento reológico, quedando por supuesto la posibilidad de añadir betún para reducir el nivel elevado del módulo complejo y ajustar la reología.

## 5. CONCLUSIONES

Los ejemplos realizados confirman la validez del proceso y muestran la amplitud muy abierta de las aplicaciones. El ejemplo español de la CN 525 (1ª realización alcanzado un reciclado del 100% con regeneración del betún envejecido), a pesar de las numerosas críticas sobre la forma de aplicación "in situ" hoy revisable, fue en 1996, una experiencia cuyas principales características puestas de relieve en los estudios, se confirmaron con el tiempo: muy alto nivel de los módulos asociados con altos valores de resistencia a la fatiga. La experiencia adquirida, haría que hoy, elementos como la mejora de la calidad de la mezcla entre el fresado y el aditivo, la temperatura de la mezcla en su compactación y la adecuación de los equipos de compactación para este tipo de aglomerado con altos módulos, serían particularmente estudiados y tratados durante la aplicación. El ejemplo reciente en relación con la realización de la obra de validación del concurso francés 2009 de la innovación en carreteras permite de un lado validar el principio químico de transformación llevando a la regeneración de los betunes envejecidos y por otro lado ratificar la posibilidad de modificar químicamente por reticulación, las propiedades de los ligantes regenerados consiguiendo PMB con características elásticas

El procedimiento contesta a la problemática del reciclaje sin limitación de la cantidad de reciclado. Mediante su uso, el 100% es alcanzable, pero dependerá de la disponibilidad de una tecnología adecuada del horno y del dominio de los equipos asociados. Por lo tanto, es posible producir con calidad garantizada, aglomerados con altos contenidos de reciclado cuyo ligante regenerado y de reología adecuada presente características equivalentes e incluso superiores a las de los betunes nuevos con garantía de evoluciones muy similares en el tiempo.

Por otra parte y según el mismo concepto, la transformación del ligante: mezcla de betún nuevo y de betún envejecido regenerada en PMB debe permitir valorar los áridos de

buena calidad respondiendo a la necesidad de reutilización de los materiales fresado en capas delgadas, ultra delgadas, drenantes y capas de alto módulos, etc., para las capas de rodaduras.

## **6. REFERENCIAS**

- 1 LOPEZ, E. y otros (2005, 2006) La regeneración del betún envejecido de aglomerados usados, una apuesta económico-ecológica (I) y (II) Carreteras n° 148-2005 paginas 52 à 55, n° 149-2006 páginas 78 y 79.
- 2 LOPEZ, E. y otros (2005) La micro calorimetría diferencial, una nueva herramienta para conocer mejor el comportamiento de los betunes. CARRETERAS, n° 143 2 005, páginas 45 à 48.
- 3 NF T 66-067 (DRAFT 3) – 2002-05
- 4 MOUILLET, V. (2008) Durability of polymer modified bitumens : comparison of the evolution due to conventional standardised ageing tests with the in situ ageing of binders in pavements. Eurobitume 2008, Technical Session 3: