

# Rehabilitación de firmes con betunes modificados in situ con caucho de neumáticos y polímeros. Aplicación en los viales del Puerto de Huelva

**Juan Gallego**, juan.gallego@upm.es

Universidad Politécnica de Madrid

**Luis de León**, luisdeleon@asfaltomeros.com

Asfaltómeros S.A.

**José Manuel Berenguer**,  
jberenguer@infraestructuras.eiffage.es  
Eiffage Infraestructuras

**José María Bermejo**, jbermejo@signus.es

**Leticia Sáiz**, lsaiz@signus.es

Signus Ecovalor

**Miguel Ángel Sanz**, masanz@sacyr.com

Valoriza Servicios Medioambientales

En mayo de 2014 se procedió a la reparación de los deterioros que afectaban a diversas zonas de los viales del Puerto de Huelva. Generalmente se trataba de fresar varios centímetros de profundidad de los firmes en mal estado y proceder a su reposición con mezclas bituminosas nuevas, fabricadas con un betún modificado. La singularidad de esta obra procede del hecho de que el betún se modificó simultáneamente con caucho de neumáticos fuera de uso y un polímero virgen, y la modificación se realizó in situ, mediante una unidad de fabricación de betunes modificados instalada en la propia central en la que se elaboró la mezcla bituminosa nueva.

En el presente artículo se presentan los trabajos previos de laboratorio que se realizaron, tanto para el diseño de los betunes híbridos –modificados con caucho y polímero- como de la formulación de las mezclas bituminosas que se colocaron en obra, la posterior fabricación a escala industrial de los betunes y las mezclas bituminosas y por último la ejecución de la obra y los resultados más destacados de su control de calidad. La obra se completó con total éxito y el pavimento rehabilitado ha ofrecido un buen comportamiento.

**Palabras clave:** Betún, caucho, polímero, rehabilitación de pavimentos

In May 2014 repairs were made to some of the sections of the road network of the Port of Huelva. For this purpose, the milling of several centimeters of depth was carried out followed by an inlay with new asphalt mixtures manufactured with modified bitumen. The singularity of this work comes from the fact that bitumen was modified both with rubber powder coming from end-life-tyres and virgin polymer. Also, the modification was made in situ by a proper mixing-unit installed at the asphalt plant in which the new asphalt mixture was produced.

In this article the previous laboratory works are presented, for both the above mentioned binders and the asphalt mixtures produced with them. They are also presented the binders and asphalt mixtures produced on an industrial scale, the execution of the work and the most outstanding results of their quality control. The work was successfully completed and the rehabilitated pavement has offered a good performance.

**Keywords:** Asphalt, rubber, polymer, pavement rehabilitation

# Rehabilitación de firmes con betunes modificados in situ con caucho de neumáticos y polímeros. Aplicación en los viales del Puerto de Huelva

## 1- Introducción

Durante los últimos años, la tecnología española ha avanzado notablemente en el campo de los betunes modificados con caucho de neumáticos fuera de uso. Pueden estimarse en más de 1.200 los kilómetros de autopistas, carreteras convencionales y viales urbanos que en España se han pavimentado con mezclas bituminosas incorporando caucho mediante alguna de las técnicas disponibles.

Asimismo, dichos avances, en la práctica, han venido precedidos o acompañados por la edición de documentos normativos o de referencia, más allá de las innumerables presentaciones en congresos y revistas especializadas, que han ido definiendo los elementos propios de estas tecnologías.

Aunque ya existía algún precedente documental, probablemente un hito fundamental lo constituyó el Manual de Empleo de Caucho de NFU en Mezclas Bituminosas (2007), redactado por el CEDEX por encargo del Ministerio de Medio Ambiente y del Ministerio de Fomento [1]. Se definían allí, por orden creciente de modificación, los betunes mejorados, los modificados y los modificados de alta viscosidad, todos ellos con caucho de NFU's.

Unos meses más tarde, el 11 de julio de 2007, se publicaba la O.C. 21/2007 del Ministerio de Fomento, "sobre el uso y especificaciones que deben cumplir los ligantes y mezclas bituminosas que incorporen caucho procedente de NFU" [2]. Admitía dos tipos, según la modalidad de fabricación, para estos materiales:

- Los denominados "fabricados en central", es decir, en las instalaciones tradicionales de modificación de betunes y que presentan estabilidad suficiente para transportarse a una planta de fabricación de mezclas bituminosas y almacenarse varios días.
- Los denominados "fabricados in situ", descritos como los fabricados con una unidad o mezclador especial, que se ubica en la propia planta de fabricación de mezclas asfálticas. A este tipo de ligantes no se les exige estabilidad al almacenamiento, ya que las unidades de mezclado están provistas de tanques con dispositivos removedores.

En cuanto a los tipos de betunes con caucho, la Orden Circular distingue tres grupos, en función del grado de modificación:

### 1) Betunes mejorados con caucho

Estos betunes mejorados se pueden emplear en mezclas bituminosas para capas intermedias o de base, incluso con tráfico elevados, hasta T00. Sin embargo, en capa de rodadura sólo pueden emplearse en tráfico medios-bajos (T1 a T4). Para significar que contienen caucho, se nombran con las siglas "BC", seguidas de la penetración del material.

### 2) Betunes modificados con caucho

Se trata, según la OC 21/2007, de ligantes que se han modificado con caucho (no se prescribe el contenido de caucho que deben tener, ni si parte de la modificación se consigue con otros modificadores). Estos ligantes deben cumplir las especificaciones de los betunes modificados en el artículo 212 del PG-3 [3] y pueden emplearse en todos los usos tradicionales de los betunes modificados con polímeros. Se nombran añadiendo una "C" a la nomenclatura del betún modificado con qué se corresponda.

### 3) Betunes modificados de alta viscosidad con caucho

Estos ligantes tienen unas especificaciones marcadas por los valores que debe alcanzar la viscosidad. Ello se debe a que suelen incorporarse en mezclas bituminosas destinadas a afrontar problemas de fisuración en el pavimento, por lo que su contenido en la mezcla es muy alto, y si no son muy viscosos podrían aparecer problemas de escurrimiento. Se nombran con las siglas BMAVC.

Posteriormente, la OC 21/bis 2009 [4] incorporó nuevos requerimientos, sobre todo en lo relativo al almacenamiento y manejo de estos ligantes en obra.

Más tarde, en 2014, Signus Ecovalor, Sistema Integrado de Gestión de Neumáticos Usados, editó la Guía para la fabricación de betunes con polvo de neumático [5]. En ella se recoge la metodología para el diseño en laboratorio y fabricación a escala industrial de los betunes con caucho de neumáticos, tanto los mejorados con caucho como los modificados y los de alta viscosidad.

Es sabido que la modificación de betunes y mezclas bituminosas con caucho de neumáticos aporta varias ventajas: elasticidad del material, resistencia a la formación de roderas, menor susceptibilidad térmica y una mayor durabilidad, basa-

da, sobre todo, en las propiedades antioxidantes del negro de humo. En entornos urbanos, merece ser destacada la disminución del ruido de rodadura.

Sin embargo, y atendiendo ahora a la composición de los betunes modificados, diversos investigadores [6, 7, 8] han reconocido las limitaciones del caucho de neumáticos a la hora de modificar los ligantes bituminosos. La adición de caucho provoca, simultáneamente, la disminución de la penetración del ligante (UNE EN 1426) y el incremento de su temperatura de reblandecimiento (UNE EN 1427). Ambas evoluciones son propias de los betunes modificados con polímeros; la cuestión es que, para cumplir la especificación de temperatura de reblandecimiento, a veces se requiere tanto caucho que la penetración baja demasiado, quedando por debajo de la especificación requerida. Este es el caso de algunos de los betunes modificados de los recogidos en el artículo 212 del PG-3 español.

Los estudios referidos [6, 7, 8] han modificado en laboratorio los betunes conjuntamente con caucho y polímero (frecuentemente del tipo SBS, estireno-butadieno-estireno), de modo que se puedan conseguir simultáneamente las especificaciones de penetración y temperatura de reblandecimiento.

En cuanto a la fabricación a escala industrial, la propia Orden Circular 21/2007 admitía –como se ha dicho– dos modos de fabricación: en terminal convencional de betunes modificados o bien in situ, mediante un mezclador de betún-caucho que se instala en la propia central de mezclas bituminosas [9]. En España, esta tecnología de fabricación in situ se viene aplicando con éxito hace más de una década [10].

El presente artículo muestra precisamente un caso reciente, en el que esta tecnología de fabricación in situ se ha aplicado no ya a la fabricación de betunes-caucho, sino de betunes modificados con caucho y polímero, lo que no había sido frecuente hasta ahora. Para el diseño previo de los betunes en laboratorio y la posterior fabricación a escala industrial, se ha seguido la metodología de la Guía para la fabricación de betunes con polvo de neumático [5].

## *2. Descripción de la actuación objeto del estudio*

La obra de pavimentación objeto del presente estudio consistió en la rehabilitación de una serie de zonas con el firme deteriorado en la red de viales del Puerto de Huelva. La empresa adjudicataria del mantenimiento de dichos viales, Tecopsa, planteó la posibilidad de empleo de este tipo de be-

tunes modificados in situ a la Autoridad Portuaria de Huelva, cuyo apoyo a este tipo de actuaciones relacionadas con la sostenibilidad y el medio ambiente ha sido muy importante para poder llevar a cabo esta actuación.

El diseño de los betunes en laboratorio se realizó en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid; la formulación de las mezclas bituminosas, en el Laboratorio de la empresa Los Serranos; la mezcla de polímero y polvo de neumático se llevó a cabo por la empresa Valoriza Servicios Medioambientales; la fabricación in situ del betún modificado fue realizada por la empresa Asfaltómeros; y la fabricación y puesta en obra de la mezcla bituminosa, por la empresa Eiffage Infraestructuras.

La actuación tuvo lugar durante el mes de mayo de 2014, y como se ha mencionado anteriormente, se procedió a la reparación de una serie de deterioros que afectaban a diversas zonas de los viales del Puerto de Huelva. Generalmente se trataba de fresar varios centímetros del firme deteriorado y proceder a su reposición con mezclas bituminosas nuevas, fabricadas con un betún modificado.

Los viales rehabilitados soportan tráfico de vehículos pesados hasta de categoría T2, generalmente con origen o destino en los muelles del puerto.

La singularidad de esta obra procede del hecho de que el betún se modificó in situ simultáneamente con caucho de neumáticos fuera de uso y un polímero virgen, mediante una unidad de fabricación de betunes modificados instalada en la propia central en la que se elaboraron las mezclas bituminosas.

En el presente artículo se describen los trabajos previos de laboratorio que se realizaron, tanto para el diseño de los betunes híbridos –modificados con caucho y polímero– como de la formulación de las mezclas bituminosas que se colocaron en obra, la posterior fabricación a escala industrial de los betunes y las mezclas y por último la ejecución de la obra y los resultados más destacados de su control de calidad.

Como se verá a lo largo del artículo, cuando se analicen los resultados, la obra se concluyó con éxito y el pavimento rehabilitado viene ofreciendo un buen comportamiento dos años después de la intervención.

## *3. Diseño de los betunes modificados*

Con el objetivo de conseguir la mayor durabilidad posible en las zonas rehabilitadas, la Autoridad Portuaria de Huelva ha-

## Rehabilitación de firmes con betunes modificados in situ con caucho de neumáticos y polímeros. Aplicación en los viales del Puerto de Huelva

bía solicitado que las mezclas bituminosas para reponer las zonas fresadas se fabricasen con betunes modificados. Se decidió utilizar un betún del tipo PMB 45/80-65 C, es decir, un ligante con penetración entre 45 y 80 décimas de mm, y una temperatura de reblandecimiento mayor o igual a 65 °C, incorporando en su composición caucho de neumáticos fuera de uso que sustituía parcialmente al polímero que habitualmente se emplea en la fabricación de betunes modificados.

A tenor de experiencias anteriores, la incorporación del polvo de caucho permite reducir el contenido de polímero virgen, lo que tiene connotaciones fundamentalmente ambientales pero también económicas, motivos por los que se abordó esta tecnología.

### 3.1 Materiales empleados en el diseño de los betunes

Los ligantes se diseñaron en laboratorio siguiendo la metodología de trabajo recomendada en la Guía para la fabricación de betunes con polvo de neumático [5], tanto en los materiales como en los equipos de laboratorio empleados, y en los protocolos de trabajo.

#### Betún base

Se empleó un betún base de penetración  $90 \cdot 10^{-1}$  mm, el mismo que había de servirse después a obra.

#### Polvo de caucho de neumáticos fuera de uso

El tamaño del material empleado fue 0/0,8 mm, obtenido mediante trituración y granulación a temperatura ambiente, de uso común en el mercado español (Figura 1a).

#### Polímero

Se trataba de un copolímero termoplástico butadieno/estireno 70/30, polimerizado en solución y con estructura radial. Su nombre comercial es Calprene 411 M. Para la presente aplicación en la modificación in situ se empleó su presentación en forma de polvo que facilita su incorporación al betún (Figura 1b).

#### Equipos de fabricación en laboratorio.

Para fabricar el PMB 45/80-65 C se empleó un mezclador de laboratorio (Figura 2), provisto de un cabezal tipo hélice, con una velocidad de rotación de 8.800 r.p.m. El procedimiento de trabajo fue el siguiente:



Figura 1. a) polvo de neumático ; b) polímero SBS Calprene 411 M.

- i) En un recipiente metálico, de capacidad 1 litro, se colocaban 600 g de betún y se introducía en baño de aceite a 185 °C.
- ii) Una vez conseguida la temperatura se añadía el caucho y el polímero
- iii) Se introducía de nuevo en baño de aceite, mientras se removía manualmente con espátula hasta recuperar la temperatura de 185 °C
- iv) Se introducía el cabezal del mezclador, se tapaba el recipiente con una tapa especial tórica, que permite pasar el cabezal pero limita el contacto del betún con el aire
- v) Se procedía al mezclado, a 8.800 r.p.m. durante 60 minutos, manteniendo en todo momento la temperatura de 185 °C.
- vi) Finalmente se desmontaba el dispositivo y se tomaban muestras para los ensayos



Figura 2. Mezclador de laboratorio empleado.

### 3.2 Pruebas de laboratorio y resultados de los betunes fabricados

Se formularon 5 ligantes modificados diferentes, con distintas proporciones de caucho y polímero, y se realizaron los ensayos de penetración (UNE EN 1426), temperatura de reblandecimiento (UNE EN 1427) y recuperación elástica (UNE EN 13398), en orden a comprobar el cumplimiento de las especificaciones para estos parámetros en el artículo 212 del PG-3 [3].

La Tabla 1 presenta las combinaciones que se ensayaron y los resultados obtenidos en cada caso.

Los resultados de todos los betunes preparados, excepto el denominado C, ofrecen valores de penetración, temperatura de reblandecimiento y recuperación elástica dentro de los rangos exigidos a un PMB 45/80-65 C en el artículo 212 del PG-3 [3]. Por consiguiente, con excepción de ella, las otras cuatro combinaciones ofrecen resultados correctos. No obstante, y para reducir los posteriores trabajos de formulación de la mezcla, se seleccionaron sólo dos ligantes: los denominados B y E (Tabla 1).

Debe aclararse que este estudio no se ciñó a las formulaciones sugeridas en la Guía de fabricación de betunes con caucho [5], sino más bien a la metodología de trabajo expuesta en la Guía para elaborar en laboratorio formulaciones de estos ligantes.

### 4. Formulación de las mezclas bituminosas

La formulación de las mezclas bituminosas se realizó siguiendo el procedimiento establecido en el artículo 542 del PG-3 [3] para mezclas tipo hormigón bituminoso.

### 4.1 Granulometría y áridos empleados

Se empleó la granulometría AC 16 S, dado que el pavimento existente, sobre el que se iba a actuar, estaba constituido por varias capas de mezclas cerradas. Se dispuso de 3 fracciones de áridos, todas ellas de grauwaca. La curva granulométrica se obtuvo combinando 16% de la fracción 0/5 mm, con 33% de 5/11 mm y 51% de 0/5 mm. El polvo mineral fue el propio de los áridos.

Con todo ello, la curva resultante es la que se presenta en la Tabla 2 y en la Figura 3.

### 4.2 Ligantes empleados

Para la dosificación de la mezcla se emplearon los dos ligantes seleccionados en la fase previa, denominados B y E (Tabla 1), que son los que se modifican, en el primer caso, con el 6% de caucho y el 3% de polímero, y en el segundo, con el 12% de caucho y el 2% de polímero, ambos dentro de los parámetros de penetración, temperatura de reblandecimiento y recuperación elástica del tipo PMB 45/80-65 C establecidos en el artículo 212 del PG-3 [3].

### 4.3 Dosificación de las mezclas bituminosas

Las mezclas bituminosas se dosificaron de acuerdo con lo exigido en el artículo 542 del PG-3 [3], determinando el contenido de betún óptimo, de modo que el contenido de huecos en mezcla (UNE EN 12697-8) esté entre el 4 y el 6%, al tratarse de capa de rodadura, su sensibilidad al agua (UNE-EN 12697-12) por encima del 85% y la pendiente media WTS

Tabla 1. Ligantes elaborados en el laboratorio con distintas proporciones caucho/polímero.

Ligante	% caucho (sobre betún base)	% polímero (sobre betún base)	Penetración (10 <sup>-1</sup> mm) UNE EN 1426	T <sub>AyB</sub> (°C) UNE EN 1427	Rec. elástica (%) UNE EN 13398
A	4,5	3,5	49	70	92
B	6	3	48	68	92
C	8	2	47	63	88
D	10	2	47	66	88
E	12	2	46	70	89
PMB 45/80-65 C (art. 212 del PG-3)			45-80	≥ 65	≥ 70

# Rehabilitación de firmes con betunes modificados in situ con caucho de neumáticos y polímeros. Aplicación en los viales del Puerto de Huelva

Tabla 2. Curva de los áridos.

Tamiz (mm)	Curva de los áridos (% Pasa)	Límite superior AC 16 S (% Pasa)	Límite inferior AC 16 S (% Pasa)
22	100	100	100
16	91,0	90	100
8	70,0	75	60
4	41,1	50	35
2	28,6	38	24
0,5	12,9	21	11
0,25	8,9	15	7
0,063	5,6	7	3

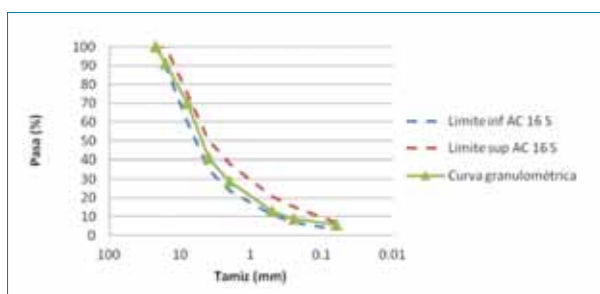


Figura 3. Granulometría empleada en el laboratorio.

en el ensayo de rodadura (UNE EN 12697-22) no sea superior a 0,07 mm / 10<sup>3</sup> ciclos.

Mezcla AC 16 surf S con ligante B (modificado con 6% caucho + 3% polímero)

Los resultados de los trabajos de laboratorio se presentan a continuación. La Tabla 3 presenta los resultados de probetas compactadas con la maza Marshall, con 75 golpes / cara.

Se observa que para todos los contenidos de betún (4,5; 5,0 y 5,5%) los huecos en mezcla están entre el 4 y el 6% exigido en el PG-3.

Las figuras 4 y 5 muestran respectivamente la evolución de la sensibilidad al agua (UNE EN 12697-12) de probetas compactadas con 50 golpes/cara y de la velocidad de deformación plástica en ensayo de rodadura (UNE EN 12697-22),

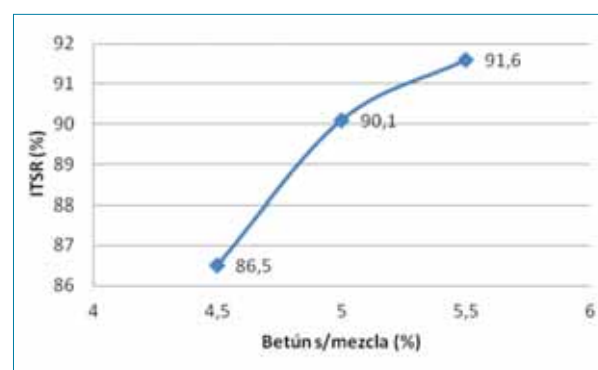


Figura 4. Sensibilidad al agua de la mezcla AC 16 surf S (Ligante B).

Tabla 3. Resultados Marshall de la Mezcla AC 16 surf S (ligante B).

	Norma de ensayo	Betún sobre mezcla (%)		
		4,5	5	5,5
Huecos áridos (%)	UNE-EN 12697-8	16,36	15,8	14,92
Huecos mezcla (%)	UNE-EN 12697-8	5,85	5,3	4,01
Estabilidad (kN)	UNE-EN 12697-34	21,0	20,1	18,7
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	UNE-EN 12697-6	2,36	2,38	2,42
Deformación (mm)	UNE-EN 12697-34	2,3	2,7	3,5

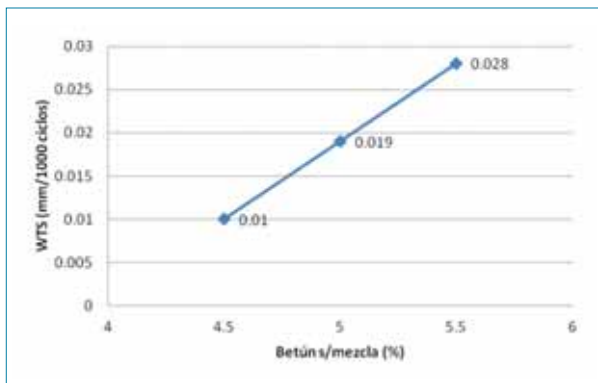


Figura 5. Deformación en ensayo de rodadura de la mezcla AC 16 surf S (ligante B).

al variar el contenido de betún. Con cualquiera de los contenidos de betún ensayados, la sensibilidad al agua supera el 85% exigido en el artículo 542 del PG-3 [3].

También para todos los valores estudiados del contenido de betún se observa que la mezcla es resistente a las deformaciones plásticas, ofreciendo valores por debajo de 0,07 mm/1.000 ciclos, máximo que se admite en las especificaciones.

A la vista de estos resultados, se seleccionó como contenido óptimo de betún un porcentaje del 5% de betún modificado, sobre el peso de la mezcla bituminosa, ya que ofrece un contenido de huecos centrado en el intervalo 4-6% y satisface los requisitos de sensibilidad al agua y resistencia a la deformación plástica en el ensayo de rodadura.

Mezcla AC 16 surf S con ligante E (modificado con 12% de caucho + 2% de polímero)

Esta mezcla se dosificó con el mismo procedimiento que la anterior. Los resultados que se obtuvieron fueron los que recoge la Tabla 4.

Según muestra la tabla 4, los resultados Marshall al fabricar con ligante E fueron muy similares a los que se habían obtenido al fabricar con ligante B.

Los ensayos de sensibilidad al agua, ofrecieron unos resultados también similares, superando en todos los casos el 85% de resistencia conservada, según se muestra en la Figura 6.

Por último, la mezcla mostró también un buen comportamiento frente a las deformaciones plásticas, tal y como se muestra en la Figura 7, donde se observa que los valores de velocidad de deformación quedan muy alejados del valor 0,07 mm/ 10<sup>3</sup> ciclos que se exigen en el artículo 542 del PG-3 [3].

Teniendo en cuenta estos resultados, también para esta mezcla se seleccionó un contenido óptimo de ligante del 5% sobre peso de la mezcla bituminosa, por motivos análogos a los que se han descrito en el caso de la primera mezcla bituminosa.

**5. Fabricación y suministro de betunes modificados in situ**

Una vez formulados los ligantes modificados con caucho y polímeros, y las mezclas bituminosas fabricadas con ellos en el

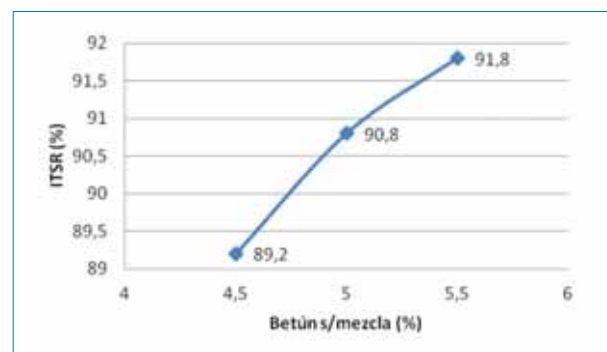


Figura 6. Sensibilidad al agua de la mezcla AC 16 surf S (ligante E).

Tabla 4. Resultados de probetas Marshall de la Mezcla AC 16 surf S (ligante E).

	Norma de ensayo	Betún sobre mezcla (%)		
		4,5	5	5,5
Huecos áridos (%)	UNE-EN 12697-8	15,9	15,7	14,9
Huecos mezcla (%)	UNE-EN 12697-8	5,74	5,1	3,9
Estabilidad (kN)	UNE-EN 12697-34	20,4	19,8	18,3
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	UNE-EN 12697-6	2,37	2,39	2,42
Deformación (mm)	UNE-EN 12697-34	2,2	2,8	3,52

## Rehabilitación de firmes con betunes modificados in situ con caucho de neumáticos y polímeros. Aplicación en los viales del Puerto de Huelva

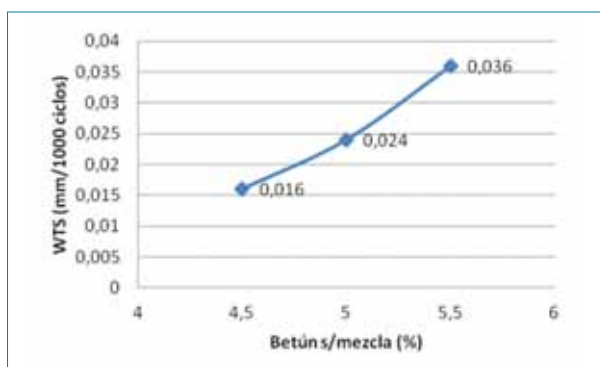


Figura 7. Deformación en ensayo de rodadura de la mezcla AC 16 surf S (ligante E).

laboratorio, se planificó la fabricación a escala industrial y la ejecución de la obra.

### 5.1 Fabricación de los betunes modificados in situ

Como se ha dicho ya, quizás la principal peculiaridad de esta obra fue la fabricación in situ de los betunes modificados con caucho y polímero, en un equipo móvil que se estaciona en la central de fabricación de mezclas bituminosas, fabricando y suministrando los betunes modificados a la planta, a demanda de ésta.

El equipo empleado para la modificación in situ del ligante se muestra en la Figura 8, y está compuesto fundamentalmente por los siguientes elementos:

- Una tolva desde la que se dosifica la mezcla de caucho y polímero.
- Un intercambiador térmico, que aumenta la temperatura del betún base desde los 160 °C a que se suele almacenar en los tanques de planta, hasta los 185-190 °C a los que entra en el mezclador donde entra en contacto con el caucho y el polímero.
- Un mezclador, dotado de un cabezal que gira a 3.000 r.p.m., consiguiendo una mezcla íntima y enérgica del betún con el caucho y el polímero.
- Un tanque digestor-regulador, donde se completa la digestión del producto y se previenen decantaciones gracias a los removedores de que está dotado. Su volumen asegura que el betún modificado está dentro del tanque un promedio de 60 minutos, antes de ser suministrado a planta.
- Un conjunto de bombas y conductos que hacen posible los flujos dentro de la máquina.

- Una caldera térmica, y los correspondientes circuitos de aceite, que permiten mantener a alta temperatura todos los elementos en contacto con el producto
- Válvulas para la toma de muestras, termómetros, viscosímetros, cuadro de mandos y otros tipos de dispositivos de control automatizado

Todo el conjunto está montado sobre un semirremolque, que se traslada en cada obra a la central de mezclas bituminosas.



Figura 8. Equipo de fabricación in situ de betunes modificados.

El equipo tiene capacidad para fabricar y suministrar 12 toneladas / hora de betún modificado, y dado que la digestión se completa dentro de la máquina, resulta totalmente autónomo. Mediante una conexión eléctrica, se consigue que la máquina suministre el ligante a la báscula de betún a demanda de la central de mezclas.

El acoplamiento y conexión con la central de fabricación de mezclas bituminosas es sencilla: la máquina toma betún puro de un tanque de la central, y suministra el betún ya modificado a través de una tubería propia, con lo que se elimina totalmente el riesgo de atascos o cualquier otro tipo de incidencia que pudiera afectar a la central de mezclas bituminosas, resultando un esquema totalmente seguro para aquélla.

### 5.2 Fabricación de las mezclas bituminosas

Las mezclas bituminosas se fabricaron en una central del tipo discontinua, a la que en los días previos se acopló el equipo de fabricación de betunes modificados descrito más arriba. La planta se aprecia en la Figura 9.





Figura 9. Planta de fabricación de mezclas. A la derecha equipo de modificación de betunes.

### 5.3 Ejecución de la obra

La obra consistió en una serie de actuaciones, muchas de ellas puntuales, para reparar el pavimento que estaba en mal estado. Lo habitual fue un fresado para eliminar la capa o capas superficiales y a continuación una reposición con las nuevas mezclas bituminosas. La Figura 10 muestra una de las actuaciones.



Figura 10. Compactación de la mezcla en la reposición de la capa fresada previamente.

## 6. Control de calidad

El control de calidad se llevó a cabo tanto sobre los betunes modificados como sobre las mezclas bituminosas fabricadas con ellos.

### 6.1 Control de calidad de los betunes

Además de la rutina habitual en control de calidad, en esta obra se tiene un objetivo muy importante: comparar los resultados previos de laboratorio, sobre todo en lo referente a betunes diseñados en laboratorio, con los resultados de las muestras tomadas durante la fabricación industrial (Figura 11).

La Tabla 5 muestra una comparativa de los resultados de los betunes que se fabricaron in situ, y los correspondientes fabricados previamente en el laboratorio.

Se observa que en ambos betunes PMB 45/80-65 C, (ligantes B y E), cuando se fabrican in situ, a escala industrial, se obtienen betunes más blandos, como lo indica el hecho de una mayor penetración y una temperatura de reblandecimiento más baja. La recuperación elástica también resulta



Figura 11. Muestras de betún tomadas durante la obra.

# Rehabilitación de firmes con betunes modificados in situ con caucho de neumáticos y polímeros. Aplicación en los viales del Puerto de Huelva

Tabla 5. Comparativa de betunes fabricados en laboratorio e in situ en la obra.

Ligante	% caucho	% polímero	Penetración (10 <sup>-1</sup> mm) UNE EN 1426	T <sub>AyB</sub> (°C) UNE EN 1427	Rec. elástica (%) UNE EN 13398
Betunes fabricados en el laboratorio					
B	6	3	48	68	92
E	12	2	46	70	89
Betunes fabricados in situ					
B	6	3	53	66	85
E	12	2	51	69	81

algo inferior. Estos hechos probablemente se deban a que a escala industrial, al tratarse de grandes volúmenes, el contacto con el aire –y la consiguiente oxidación– es menor que en el mezclador de laboratorio.

En cualquier caso, cumplen los requisitos de penetración, temperatura de reblandecimiento y recuperación elásticas propios de su tipo PMB 45/80-65 C, estipulados en el artículo 212 del PG-3 [3].

Cabe añadir que, además de las citadas propiedades, también se midió con frecuencia horaria la viscosidad del betún modificado. Se trata de un control que permite detectar en tiempo real cambios importantes en el producto que se está fabricando, es decir, detectar anomalías en el proceso de fabricación o en las materias primas en tiempo real. Durante toda la obra este tipo de control no reveló ninguna incidencia. Por lo que respecta al presente artículo, la serie de valores de viscosidades que se obtuvieron no se han transcrito aquí, ya que la viscosidad no forma parte de las especificaciones de este tipo de betunes.

## 6.2 Control de calidad de las mezclas bituminosas

Por lo que se refiere a las mezclas bituminosas, la Figura 12 muestra la variación granulométrica que se produjo en obra

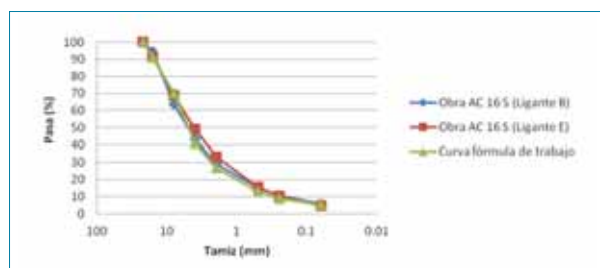


Figura 12. Variación granulométrica entre las fórmulas y el control de calidad.

respecto a la curva de laboratorio. Asimismo, la Tabla 6 compara los resultados para las propiedades de las mezclas que se obtuvieron previamente en laboratorio durante su formulación y los que se obtuvieron en el control de calidad de la obra.

Se observa que las curvas granulométricas de obra son algo más finas que las empleadas en laboratorio para formular la mezcla. Este tipo de variaciones no son infrecuentes en obra. Por lo que se refiere a las propiedades de la mezcla, la Tabla 6 muestra que las mezclas de obra tuvieron menos ligante que el indicado en la fórmula de trabajo. También presentan un mayor porcentaje de huecos en mezcla, lo que ha podido influir en que su deformación plástica sea algo mayor de la que se midió en las mezclas de laboratorio. La resistencia a la acción del agua es similar en uno y otro caso, aunque algo menor en las mezclas fabricadas a escala industrial, en lo que también ha podido ejercer influencia su contenido de huecos algo más elevado de huecos.

En ambos casos las propiedades las mezclas colocadas en obra están dentro del rango que se pide en el artículo 542 del PG-3 [3], aunque los contenidos de betún resultan algo bajos, comparados con los establecidos en las fórmulas de trabajo.

En líneas generales puede decirse que la densidad resultó algo menor en las muestras de obra que en la fórmula de trabajo, lo que también puede atribuirse al hecho de que las mezclas de obra hubieron de recalentarse para ser remodeladas, por lo que la compactación Marshall pudo ser menos eficaz. Sin embargo, la velocidad de deformación en el ensayo de rodadura es mayor en las muestras de obra –aunque dentro de lo estipulado en el PG-3 [3], lo que pudo estar influido también por el hecho de que el betún modificado en obra tenía temperatura de reblandecimiento más baja, como se ha

Tabla 6. Comparación de propiedades: Fórmula de trabajo / control de calidad de mezcla remodelada.

Propiedad	Norma de ensayo	AC 16 surf S (Ligante B)		AC 16 surf S (Ligante E)	
		Fórmula	Control calidad	Fórmula	Control calidad
Betún s/m (%)	UNE-EN 12697-1	5,0	4,78	5,0	4,7
Relación PM/B	-	1,07	1,14	1,07	0,94
Densidad máx (g/cm <sup>3</sup> )	UNE-EN 12697-5	2,517	2,474	2,51	2,467
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	UNE-EN 12697-6	2,38	2,33	2,39	2,33
Huecos mezcla (%)	UNE-EN 12697-8	5,3	5,81	5,1	5,63
ITRS (%)	UNE-EN 12697-12	90	87	91	89
WTS (mm/10 <sup>3</sup> ciclos)	UNE-EN 12697-22	0,019	0,05	0,024	0,052

dicho, que el fabricado en laboratorio y empleado en la elaboración de las fórmulas de trabajo de las mezclas.

De todo lo anterior se deduce que las mezclas bituminosas fabricadas con betunes modificados conjuntamente con caucho y polímeros son plenamente válidas desde el punto de vista de su composición y comportamiento, según lo exigido en el PG-3 de especificaciones españolas.

## 7. Conclusiones

De todo lo expuesto en este artículo, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

1. Es posible diseñar betunes modificados híbridos, con caucho de neumáticos fuera de uso y polímero, que cumplen las especificaciones españolas, siguiendo, para ello, la metodología de la Guía para fabricación de betunes con polvo de neumáticos (Signus).
2. En la reproducción a escala industrial de los betunes modificados en laboratorio se obtienen betunes algo más blandos, posiblemente porque en laboratorio, al tratarse de masas menores, el contacto relativo con el aire es algo mayor y por tanto la oxidación también.
3. El hecho anterior pone de manifiesto que, dado que las propiedades del ligante industrial pueden variar ligeramente sobre las previas del diseño en laboratorio, los diseños de ligantes en laboratorio han de proponer formulaciones conservadoras, con cierto margen de calidad sobre los mínimos requeridos en las especificaciones del PG-3. De este modo, si se registrasen ligeras variaciones a la baja en las propiedades del ligante cuando se fabrique a es-

cala industrial, las especificaciones no dejarán de cumplirse en obra.

4. La fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas con los ligantes modificados in situ con caucho y polímero se realizó rutinariamente y sin observarse ninguna incidencia reseñable.
5. La obra en cuestión, de rehabilitación de los viales del Puerto de Huelva, viene presentando un buen comportamiento, dos años después de la intervención.
6. El éxito con que se ha completado esta actuación será un importante precedente para la generalización del empleo de estos betunes modificados con caucho y polímero, al tratarse de una técnica perfectamente viable.

## 8. Agradecimientos

Las empresas participantes en el desarrollo del proyecto agradecen a la Autoridad Portuaria de Huelva su interés en la aplicación de mezclas bituminosas fabricadas con betunes modificados con caucho y polímero.

Asimismo, agradecen los esfuerzos llevados cabo por SIGNUS para la coordinación del proyecto y por la difusión de este tipo de tecnologías.

## 9. Referencias bibliográficas.

- [1] CEDEX. Manual de Empleo de Caucho de NFU en Mezclas Bituminosas (2007). Servicio de publicaciones del Ministerio de Fomento.
- [2] Ministerio de Fomento. Orden Circular 21/2007 sobre el uso y especificaciones que deben cumplir los ligantes y

## Rehabilitación de firmes con betunes modificados in situ con caucho de neumáticos y polímeros. Aplicación en los viales del Puerto de Huelva

mezclas bituminosas que incorporen caucho procedente de neumáticos fuera de uso.

- [3] Ministerio de Fomento. Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3). Versión vigente en enero de 2015.
- [4] Ministerio de fomento. Orden Circular 21 bis/2009 sobre betunes mejorados y betunes modificados de alta viscosidad con caucho procedente de neumáticos fuera de uso y criterios a tener en cuenta para su fabricación in situ y almacenamiento en obra.
- [5] Bermejo, J.M., Gallego, J., Saiz, L. (2014). Guía para la fabricación de betunes con polvo de neumático. Signus Ecovalor
- [6] Kök, B., Colak, H. Laboratory comparison of the crumb-rubber and SBS modified bitumen and hot mix asphalt (2011). Construction and Building Materials. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.03.005
- [7] Wang, L, Xing, Y.M., Chang, C.Q. Experimental Studies on Microstruture and Technical Performance of Multiphase Compound Crumb Rubber Modified Asphalt. ICCTP 2010: Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable. ASCE.
- [8] González, V., Martínez-Boza, F.J., Navarro, F.J., Gallegos, C., Pérez-Lepe, A., Páez, A. Thermomechanical properties of bitumen modified with crumb tire rubber and polymeric additves. (2010) Fuel Processing Techonlogy. Doi:10.1016/j.fuproc.2010.03.009
- [9] Lo Presti, D., Airey, G., Partal, P. Manufacturing Terminal and Field Bitumen-Tyre Rubber Blends: The Importance of Processing Conditions, Procedia - Social and Behavioral Sciences, Volume 53, 3 October 2012, Pages 485-494, ISSN 1877-0428, <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.899>.
- [10] Gallego, J.; De los Santos L. Mezclas bituminosas fabricadas con betunes de alto contenido de caucho. Aplicación al recrecimiento de un pavimento rígido en la A-7. (2003). Revista de Obras Públicas 150 (3439).

#39

AFIRMACIONES ASFÁLTICAS

“Los pavimentos asfálticos de alta drenabilidad proporcionan seguridad y confort en situaciones de lluvia” (Editorial, número 20)

#CONFORT\_Y\_SEGURIDAD