

Estudio del comportamiento a largo plazo de diferentes tipos de mezclas con caucho procedente de neumáticos al final de su vida útil



Long-term behaviour study of different types of crumb rubber asphalt mixes

Francisco Javier Payán de Tejada González

*Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos del Estado
Presidente del Comité de Firms de la ATC*

Joanna Rodríguez Pérez

*Ingeniera Técnica de Obras Públicas
EGAIN S.L.*

Este artículo muestra el comportamiento a largo plazo de dos tramos rehabilitados de la A-6 en la provincia de Valladolid, ejecutados en los años 2010 y 2011, poniendo el foco en las mezclas fabricadas con adición de caucho procedente de NFVU.

En estos tramos se han empleado mezclas de granulometría continua semidensa con betunes convencionales 40/50 y betunes mejorados con caucho BC 35/50 fabricados in situ y en central. Respecto a las capas de rodadura, se han empleado mezclas BBTM 11 B con betunes modificados con polímeros BM-3c (actual PMB 45/80-65), con polímeros y caucho BMC-3c y de alta viscosidad con caucho BMAVC-1.

También se han recogido los resultados de un tramo experimental del año 2006 en los que se comparan rodaduras con BM-3c, BMAVC-1 y BMAV-3 (equivalente al actual PMB 45/80-75).

Las conclusiones obtenidas se consideran relevantes a la vista de la significativa longitud de los tramos de carretera estudiados que permite soslayar los problemas de condiciones locales o aspectos puntuales que hubieran podido afectar a los datos.

This paper presents the long-term behaviour of two strengthened sections of the A-6 in the province of Valladolid, carried out in 2010 and 2011, focusing on mixtures manufactured with the addition of crumb rubber from NFVU (Tires at the end of its useful life).

In these road sections, continuous granulometry mixtures (type S) with conventional 40/50 bitumen and BC 35/50 (rubber-improved bitumen) manufactured on site and at the central plant have been used. Regarding the surface layers, BBTM 11 B mixtures with polymer modified bitumen BM-3c (currently PMB 45/80-65), with polymers and rubber modified bitumen BMC-3c, and high viscosity rubber bitumen BMAVC-1 have been used.

The results of an experimental section from 2006 have also been included, comparing wearing courses with BM-3c, BMAVC-1 and BMAV-3 (equivalent to the current PMB 45/80-75).

The conclusions obtained are considered relevant as the significant length of the road sections analysed makes possible to avoid the problems of local conditions or other issues that could have distorted the data.

Presentación

En los últimos 20 años han surgido multitud de nuevas tecnologías en el campo de las mezclas bituminosas. Detrás de todas ellas existe el afán de conseguir mejores productos, tanto desde el punto de vista funcional como desde el punto de vista medioambiental. La Dirección General de Carreteras, consciente del doble reto de construir infraestructuras que sean, a la vez, funcional y ambientalmente eficaces, está claramente decidida a apoyar la innovación tecnológica y su implementación mediante la realización de obras experimentales. En este contexto, deben enmarcarse las diferentes Notas Técnicas publicadas sobre distintas tecnologías, que aun no siendo de obligada observancia, favorecen su desarrollo y aplicación, así como la utilización, desde siempre, de su propia red como campo de pruebas, invirtiendo en la realización de obras experimentales.

La reutilización de residuos es un campo de innovación que promete una solución eficaz desde ambas perspectivas. En el caso del polvo de caucho procedente de los neumáticos al final de su vida útil, su composición y los ensayos de laboratorio realizados hasta el momento le adjudican unas características capaces de mejorar el comportamiento de las mezclas bituminosas, haciéndolas más flexibles, con mejor comportamiento a fatiga y más resistentes a las deformaciones plásticas y al envejecimiento. Si bien, todas las investigaciones son loables y bienvenidas, es siempre necesario comprobar en actuaciones reales el comportamiento de las nuevas tecnologías y, en nuestro caso, donde las condiciones de entorno de todo tipo influyen de una manera drástica, el seguimiento de las aplicaciones de estas nuevas tecnologías, no sólo es recomendable, sino que es un deber de la propia Administración.

En 2007, se publicó la Orden Circular 21/2007 sobre el uso y especificaciones que deben cumplir los ligantes y mezclas bituminosas que incorporen caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU) y en 2009, la Orden Circular 21bis sobre betunes mejorados y betunes modificados de alta viscosidad con caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU) y criterios a tener en cuenta para su fabricación in situ y almacenamiento en obra. Desde el año 2002, se han venido realizando obras experimentales con empleo de caucho en sus diversas modalidades, que han tenido un seguimiento, en general a corto plazo, y sobre las que el CEDEX ha redactado diversos informes técnicos. En 2010 y 2011, en Valladolid, se realizaron dos obras de refuerzo de gran calado, sobre más de 108 km de calzada, utilizando mezclas con inclusión de betún procedente de NFVU. Estas obras han estado sometidas a un seguimiento a largo plazo de más de ocho años, en los que se han realizado diversas campañas de extracción de testigos para conocer la evolución de las mezclas y una auscultación completa de sus características, especialmente en lo referente a inspección visual, formación de fisuras, CRT, etc, incluida en las campañas periódicas realizadas desde la Dirección General de Carreteras. En este artículo, se presentan los resultados de ese seguimiento, lo que sin duda contribuirá a aclarar el comportamiento de estas técnicas, de las que en el Pliego, PG-3, siguiendo lo dispuesto en el apartado 8 del Plan Nacional Integrado de Residuos 2008- 2015, aprobado por Acuerdo de Consejo de Ministros de 26 de diciembre de 2008, se dice que se aplicarán prioritariamente siempre que sea técnica y económicamente posible.

María del Rosario Cornejo Arribas

Directora Técnica de la Dirección General de Carreteras

0. Introducción

En este artículo se presenta de forma resumida el comportamiento comparado a largo plazo de diferentes tipos de mezclas con caucho procedente de neumáticos al final de su vida útil utilizados en dos obras realizadas en los años 2010 y 2011 en sendos tramos de la A-6. Se trata de dos proyectos de rehabilitación estructural del firme en los que se han empleado diferentes tipos de mezclas (tipo AC, BBTM y otras) formuladas con ligantes convencionales, mejorados con caucho, modificados con polímero, modificados con polímero y caucho y de alta viscosidad con caucho.

Además de la información correspondiente a las fórmulas de trabajo empleadas, se recogen los resultados del control de calidad en obra, los resultados de la extracción de testigos en sendas campañas de los años 2011 y 2018, así como los resultados de la auscultación realizada en 2018 y 2019.

Por último, se recogen las principales conclusiones sobre la experiencia.

1. Descripción de los trabajos realizados

a. Tramo Tordesillas – Mota del Marqués

Este tramo pertenece a la autovía A-6 en su recorrido por la provincia de Valladolid, entre las poblaciones de Tordesillas y Mota del Marqués, pp.kk. 184+500 y 204+500, cuya construcción se terminó el año 1991. La obra consistió en el desdoblamiento de la antigua N-VI, por lo que hay tramos antiguos con firme de mezcla bituminosa sobre material granular y tramos nuevos con firme semirrígido correspondiente a la sección 134 de la 6.1 IC del año 1989,

formado por 15 cm de mezcla bituminosa apoyados sobre una base de 20 cm de gravacemento y una subbase de 20 cm de suelocemento, sobre una explanada E3. En 1997 se realizó un refuerzo general de 5 cm de espesor de mezcla bituminosa en caliente motivado por la aparición generalizada de fisuras reflejadas en rodadura.

La obra objeto de este informe se finalizó el año 2010 y consistió en la ejecución de un refuerzo estructural del firme mediante el fresado y reposición de todas aquellas capas de la calzada que se encontraban agotadas. Los espesores de fresado estuvieron entre 6 y 13 cm, en todo el ancho de la calzada, y se repusieron con una mezcla bituminosa en caliente tipo AC 22 base 40/50 S.

Sobre las zonas repuestas y sobre las que no presentaban agotamiento

estructural, se extendió un recrecido de 9 cm en la calzada izquierda y 8 cm en la calzada derecha.

El recrecido de la calzada izquierda estaba constituido por una capa intermedia de 6 cm de mezcla bituminosa en caliente tipo AC 22 bin BC 35/50 S y una capa de rodadura de 3 cm de mezcla bituminosa discontinua tipo BBTM 11 B BMC-3c o 3 cm de mezcla bituminosa discontinua tipo BBTM 11 B BM-3c, a todo el ancho de la plataforma.

El recrecido de la calzada derecha estaba constituido por una capa intermedia de 5 cm de mezcla bituminosa en caliente tipo AC 16 bin 40/50 S y una capa de rodadura de 3 cm de mezcla bituminosa discontinua tipo BBTM 11 B BMC-3c o 3 cm de mezcla bituminosa discontinua tipo BBTM 11 B BM-3c, a lo ancho de toda la plataforma.

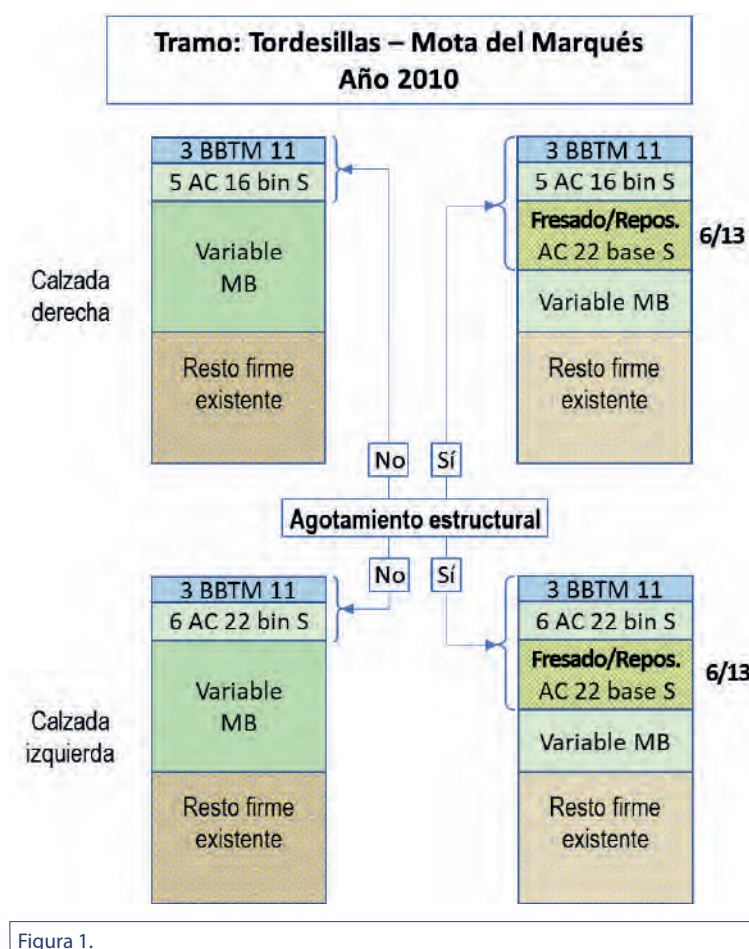


Figura 1.

Rutas Técnica

MOVILIDAD SEGURA, SOSTENIBLE Y CONECTADA

b. Tramo Arévalo – Medina del Campo

Este tramo pertenece a la autovía A-6 en su recorrido por las provincias de Ávila, Segovia y Valladolid, entre las poblaciones de Arévalo y Medina del Campo, pp.kk. 122+000 y 156+000. Este tramo de autovía se terminó de construir el año 1990 y, como en el otro tramo, la obra consistió en el desdoblamiento de la antigua N-VI, por lo que también hay tramos antiguos con firme de mezcla bituminosa sobre material granular y tramos nuevos con firme de mezcla bituminosa sobre gravacemento apoyado en suelocemento. También en este caso, la sección nueva empleada fue la 134 de la norma 6.1 IC del año 1989.

En 1998 se extendió un refuerzo de 4 cm de espesor de mezcla bituminosa en caliente motivado, nuevamente, por la aparición de fisuras en superficie. En concreto, en el momento de iniciar la obra de refuerzo, la capa de rodadura presentaba un agrietamiento generalizado con un 4,9% de la superficie con un índice de inspección visual¹ por encima de 4 y un 27,2% con un índice de inspección visual por encima de 2. Sin embargo, los valores de la deflexión en todo el tramo no eran sin embargo muy elevados, lo que indicaba un buen comportamiento de la capa de base de gravacemento.

La obra de este tramo se finalizó el año 2011 y consistió en la ejecu-

ción de un refuerzo estructural del firme mediante el fresado y reposición de todas aquellas capas de la calzada que se encontraban agotadas². El espesor de fresado fue de 10 cm en todas las zonas y a todo el ancho del carril. La reposición se realizó con una mezcla bituminosa en caliente tipo AC 22 base BC 50/70 S (similar a la AC 22 S del otro tramo, pero con ligante mejorado con caucho). Se empleó betún mejorado con caucho fabricado in situ y en central al objeto de comparar comportamientos y aptitudes de empleo en obra.

Sobre las zonas repuestas y sobre las que no presentaban agotamiento estructural, se extendió finalmente un recrido de 8 cm de mezclas bituminosas constituido por una capa inter-

media de 5 cm de mezcla bituminosa en caliente tipo AC 16 bin 40/50 S y una capa de rodadura de 3 cm de mezcla bituminosa discontinua tipo BBTM 11 B BM-3c a todo el ancho de la plataforma.

2. Mezclas y ligantes empleados. Fórmulas de Trabajo.

Pasando por alto las mezclas empleadas en la reposición de las zonas fresadas ya que se trataba de mezclas convencionales de empleo muy extendido, nos centraremos en las mezclas para capa intermedia y de rodadura. Conforme a lo descrito, las mezclas que se emplearon en estos dos tramos fueron las siguientes (Tabla 1).

Tabla 1.						
Denom. F.T.	Tramo	Capa	Granulom.	Áridos (tipo)	Polvo Mineral	Ligante (tipo)
Ref.	Tordesillas	Intermedia	AC 16	Síliceo del Río Duero	Carbonato cálcico	40/50
FT 43a			AC 22			BC 35/50
FT 44	Mota del Marqués	Rodadura	BBTM 11 B	Pórfido de Villacastín		BM-3c
FT 45a						BMC-3c
FT 56	Arévalo	Intermedia	AC 16	Corneana	Carbonato cálcico	BC 35/50 en central
FT 57						BC 35/50 in situ
FT 96	Medina del Campo	Rodadura	BBTM 11 B			60/70
FT 59						BM-3c
FT 60						BMAVC-1 in situ

a. Tramo Tordesillas – Mota del Marqués

La mezcla de referencia es una AC 16 bin 40/50 S que se empleó en la capa intermedia de la calzada derecha entre los pp.kk. 184+700 y 204+800, en ambos carriles. El contenido óptimo de betún se estableció en el 4,66% s/mezcla. El valor obtenido en el ensayo de pista (NLT-173) para una velocidad de deformación, entre 105 a 120 min, fue de 5,6 $\mu\text{m}/\text{min}$ y una profundidad de huella de 2,11 mm.

Los resultados del control de calidad realizado durante la obra indican que no se produjeron cambios significativos respecto a los valores establecidos en la fórmula de trabajo (F.T.).

La F.T. 43a se corresponde con una mezcla AC 22 fabricada con un betún mejorado con caucho fabricado en central. El fabricante no aportó el porcentaje de caucho empleado ni su tamaño máximo. La mezcla se aplicó en la capa intermedia de ambos carriles de la calzada izquierda entre los pp.kk. 184+400 y 204+500. El contenido de betún óptimo se estableció en el 4,60% s/mezcla. En el ensayo de rodadura (UNE-EN 12697-22) se obtiene una pendiente de deformación de 0,049 (mm por cada 103 ciclos) para un 4,90% de betún s/mezcla. El módulo de rigidez (UNE-EN 12697-26) obtenido con la fórmula de trabajo es de 5.256 MPa. La resistencia a la fatiga (UNE-EN 12697-24) para un 4,58% de betún BC 35/50 s/mezcla es de $13 \dots \dots \dots \bullet 10^{-6}$ para un millón de aplicaciones de carga, lo que, sin duda, resulta un valor excesivamente bajo.

A notar que, en el control del BC 35/50 suministrado, se encontró un valor de recuperación elástica del 55% a 25 °C, que es un valor alto que parece indicar la incorporación de polímeros elastoméricos en la fabricación del betún mejorado con caucho.

Los resultados del control de calidad realizado durante la obra indican

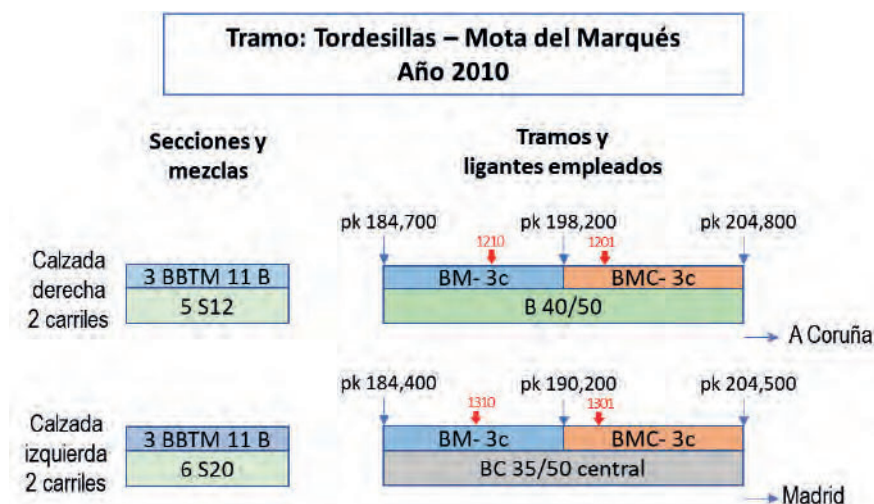


Figura 3.

que el valor medio del ligante total (soluble + insoluble) coincidía con el de la F.T. Para ello se emplearon en paralelo las normas UNE-EN 12697-1 (ligante por disolución) y UNE-EN 12697-39 (ligante por combustión). Por diferencia, se obtuvo que el contenido medio de caucho no digerido (insoluble) fue del 6,44% sobre ligante total.

Para las capas de rodadura se emplearon dos mezclas BBTM 11 B.

Una, con referencia F.T. 44, en la que se empleó un betún modificado con polímeros del tipo BM-3c (aproximadamente equivalente a un PMB 45/80-65 actual), que se utilizó en dos tramos: calzada derecha desde el p.k. 184+700 al p.k. 198+200 y calzada izquierda entre los pp.kk. 184+400 y 190+200. El contenido de betún óptimo se estableció en el 5,00% s/mezcla. La resistencia conservada fue del 94,3 %, bajando al 82,7 % cuando se hizo el ensayo con un 0,3% menos de betún. La mezcla no mostró escurrimiento (UNE-EN 12697-18).

El control de calidad no mostró desviaciones significativas respecto a la F.T. El contenido medio de ligante recuperado fue del 4,94% sobre mezcla, con una desviación de 0,12 %.

La segunda, con la referencia F.T. 45a, en la que se empleó un betún

modificado con polímeros y caucho de NFVU del tipo BMC-3c, se utilizó en los siguientes tramos: calzada derecha entre los pp.kk. 198+200 y 204+800 y calzada izquierda entre los pp.kk. 190+200 y pp.kk. 204+500. El contenido de betún óptimo se estableció en el 5,21% s/mezcla. El módulo de rigidez (UNE-EN 12697-26) obtenido al hacer la fórmula de trabajo fue de 2.441 MPa. La resistencia conservada fue del 90,4 %, bajando al 85,2 % cuando se hizo el ensayo con un 0,3% menos de betún. Esta mezcla tampoco mostró escurrimiento (UNE-EN 12697-18).

Siguiendo los mismos criterios que con el BC 35/50, el control se realizó con los ensayos de extracción por combustión y con disolvente en paralelo. En este caso se obtuvo un contenido de ligante total (soluble + insoluble) del 5,19% con una desviación del 1,22 %, algo excesiva. La parte insoluble, caucho no digerido, representó un 8,08% sobre el ligante total. En este caso, la recuperación elástica media del BMC-3 c fue del 77%.

Otros aspectos a destacar del control de calidad fueron:

- No se encontraron desviaciones significativas en las granulometrías con la excepción del pasa 8 mm de las BBTM 11 B que estuvo por

Rutas Técnica

MOVILIDAD SEGURA, SOSTENIBLE Y CONECTADA

debajo tanto del huso restringido de la F.T. como del genérico del artículo 543 del PG-3.

- Las mezclas BBTM 11 B empleadas en rodadura mostraron porcentajes de huecos muy superiores a los de la F.T. y, además, con fuertes desviaciones. Aunque las desviaciones fueron mayores en el caso de las BBTM fabricadas con BMC-3c que en las fabricadas con BM-3c, sin duda existe un problema en el control de huecos y densidades de estas mezclas que se aplican en capas delgadas y presentan fuertes macrotexturas.
- Respecto a las resistencias conservadas, en todos los casos, se mejoraron los datos obtenidos en la F.T. Esta mejora fue más evidente en la mezcla fabricada con BC 35/50.

b. Tramo Arévalo – Medina del Campo

En capa intermedia se emplearon mezclas del tipo AC16 bin S con tres tipos de ligantes: 40/50 convencional, BC 35/50 fabricado en central y BC 35/50 fabricado in situ.

La mezcla con 35/50 se aplicó en la capa intermedia de la calzada izquierda entre los pp.kk. 136+000 y 137+000, en ambos carriles. Los resultados del control de calidad realizado durante la obra indican que no

se produjeron cambios significativos respecto a los valores establecidos en la fórmula de trabajo: contenido de betún, granulometría y huecos.

Para la fabricación in situ, con una planta móvil, del BC 35/50, se empleó un caucho NFVU de 0,5 mm de tamaño máximo en un porcentaje del 14 % sobre betún.

La mezcla AC 16 bin S con este ligante, referencia FT 57, se aplicó en la capa intermedia de ambos carriles de la calzada derecha e izquierda según se puede ver en el esquema longitudinal.

La mezcla con este BC 35/50 en central se aplicó en la capa intermedia de ambos carriles de la calzada derecha e izquierda según se indica en el esquema (Figura 4)

Para la capa de rodadura de este tramo se utilizó una mezcla discontinua tipo BBTM 11 B BM-3c (actualmente PMB 45/80-65), excepto en los siguientes tramos:

- pp.kk. 143+100 al 144+700. Este tramo se dejó sin ningún tipo de actuación para poder seguir la evolución de los tramos experimentales que se hicieron el año 2006, en los que se emplearon mezclas discontinuas BBTM tipo B:
- Dos con betunes altamente modificados con polímeros fa-

bricados en central cumpliendo las especificaciones de los betunes de alta viscosidad. Dosificación del 6,5% s/mezcla. En su momento, se denominaron como BMAV-3 y actualmente serían PMB 45/80-75

- Uno con betún modificado BM-3c. Dosificación del 5% s/mezcla.
- Uno con betún modificado de alta viscosidad con caucho (20% caucho s/ligante final) fabricado in situ. Dosificación del 9% s/mezcla

- pp.kk. 132+000 al 136+000. En este tramo, en lugar de la mezcla discontinua BBTM 11 B, se empleó una mezcla, también discontinua, con betún BMAVC-1 fabricado in situ.

Esta última mezcla contiene el 8,40 % de un betún de alta viscosidad con caucho tipo BMAVC-1, del que un 20% es PNFVU de granulometría fina (tamaño máximo: 0,5 mm). Este alto contenido de betún obliga a formular una mezcla con un mayor contenido de huecos en áridos para poder albergar el ligante BMAVC-1 manteniendo el porcentaje mínimo de huecos necesario.

En todas las mezclas de rodadura, se utilizaron áridos de naturaleza corneana de Villacastín y carbonato

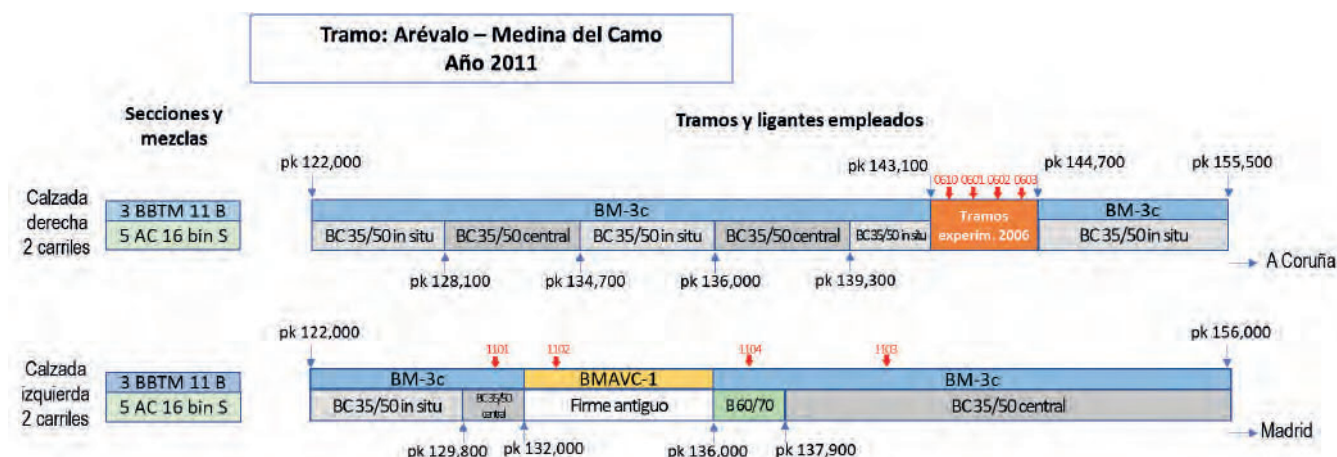


Figura 4.

cálcico como polvo mineral de aportación.

En el control de calidad, las mayores dispersiones en cuanto a los contenidos de ligante respecto a las fórmulas de trabajo se dan en las F.T. con caucho. Todos los ensayos se hicieron por duplicado para facilitar la eliminación de valores erráticos.

- FT56. AC 16 bin BC 35/50 S. Betún Mejorado con caucho fabricado en central.

Una parte de los ensayos de extracción se realizaron tanto con empleo de disolvente como por combustión. Los resultados comparados de ambos tipos de ensayos indican que por combustión se obtienen valores ligeramente más altos. Así, la media de los valores obtenidos mediante extracción por disolvente es de 4,76 %, con una desviación típica de 0,10 %, mientras que en los ensayos por combustión la media obtenida fue de 4,84 % con una desviación típica de 0,07 %. Pero quizás lo más importante de estas series es que en todos los casos, excepto en uno, el valor por combustión estuvo por encima del valor por disolvente, aunque, como se ve, la diferencia fue pequeña.

- FT57. AC 16 bin BC35/50 S. Betún Mejorado con caucho fabricado in situ.

En esta mezcla, se utiliza un porcentaje de ligante más elevado (5,40 % s/m) que en la fórmula con betún de penetración y que en la fórmula con betún mejorado con caucho fabricado en central. El porcentaje de caucho sobre betún utilizado para la fabricación del betún mejorado con caucho fue del 14 %, lo que implicaría un 0,66 % sobre mezcla, mientras que el betún puro sería un 4,74 %.

De los resultados obtenidos se obtiene una media de 4,99 %, con una desviación típica de 0,10%. Todos los valores están por debajo del valor objetivo de 5,40. Lo más probable es que debido al sistema de fabricación in situ, sólo parte del caucho ha podido ser digerido completamente por lo que el sistema de extracción con disolventes no extrae todo el caucho como si fuera betún.

- FT96. AC 16 bin 60/70 S

Esta fórmula con betún de penetración 60/70 puede considerarse la de referencia respecto a las fórmulas con betún mejorado con caucho. Se utilizó en un tramo de la calzada izquierda, entre los pppk 137+834 y 136+000. Los resultados de los ensayos coincidieron con los de la fórmula de trabajo, con un valor medio del porcentaje de betún sobre mezcla del 4,79 %, con una desviación típica de 0,02.

- FT59. BBTM 11B BM-3c

Se hicieron 108 ensayos de extracción que proporcionaron un valor medio del porcentaje de betún sobre mezcla de 4,80, con una desviación típica de 0,06%, muy ajustado al valor objetivo de la fórmula de trabajo de 4,70.

- FT 60 BBTM 11B BMAVC-1. Betún de Alta Viscosidad con caucho fabricado in situ

Se hicieron 7 ensayos de extracción que proporcionaron un valor medio del porcentaje de ligante sobre mezcla de 7,67, con una desviación típica de 0,23%, por debajo del valor objetivo de la fórmula de trabajo de 8,40.

En este caso pasa lo mismo que en el caso de la mezcla con betún mejorado con caucho fabricado in situ, obteniéndose valores en el ensayo de extracción con

disolvente por debajo del porcentaje de betún introducido, caucho incluido, probablemente por las mismas razones. En este caso, se agrava la diferencia al contener el betún un 20 % de caucho.

Además de los contenidos de ligante, en el control de calidad de obra se hicieron los ensayos habituales. En las mezclas utilizadas en capa intermedia, FT 56, FT 57 y FT 96, en cuanto a huecos y densidad, sólo la fórmula con betún mejorado con caucho fabricado in situ proporcionó valores de densidad algo inferiores a los de referencia, con un porcentaje de huecos algo superior, un pasa por el tamiz 8 algo superior, mientras que el pasa por el tamiz 0,5 era inferior al de referencia.

La resistencia conservada fue buena en todos los casos.

De los resultados de los ensayos sobre las mezclas de rodadura, la mezcla BBTM 11B BM-3c presentó un porcentaje medio de huecos de 19,57 % con una desviación típica de 1,69%. Este porcentaje de huecos obtenido en obra está por encima del exigido para este tipo de mezcla discontinua y lo situaría en el rango de las mezclas drenantes. Dado que el resto de los parámetros está en línea con las F.T. y que en obra se respetaron los criterios de temperaturas y de número de pasadas de los compactadores, se vuelve a plantear, como en el otro tramo, que existe un problema en el control de huecos y densidad de estas mezclas que se aplican en capas delgadas y presentan fuertes macrotexturas.

Sin ser tan acusada la diferencia, en la mezcla con betún de alta viscosidad se registró un porcentaje medio de huecos en mezcla del 17,76 % con una desviación típica de 1,30, cuando el valor establecido en la fórmula de trabajo es de 15,20 %.

Rutas Técnica

MOVILIDAD SEGURA, SOSTENIBLE Y CONECTADA

3. Algunos aspectos destacables de la ejecución de las obras

En el tramo entre Tordesillas y Mota del Marqués, se empleó una planta de fabricación que estaba situada en Rueda, muy próxima a la obra. Se trataba de una planta de tipo discontinuo con una capacidad nominal de 200 t/h de mezcla convencional.

Para la fabricación de la mezcla AC 22 S con BC 35/50, el betún mejorado con polvo con caucho se recibía fabricado desde las instalaciones del suministrador. Para su almacenamiento se instaló un tanque calorifugado de eje vertical, con revestimiento aislante exterior, provisto de termómetros situados en puntos visibles, sistema de recirculación y agitación, y salida del ligante por la parte inferior del tanque. Estos tanques permiten mantener homogéneo el ligante, evitando la decantación del caucho, y simplifican su manejo y dosificación. Es importante recordar que la recirculación y agitación del betún mejorado deben mantenerse en todo momento, incluso durante la noche y fines de semana, aunque no se trabaje en la producción de mezcla. Si se desea parar la recirculación hay que planificar la recepción del ligante y la producción de mezcla para asegurar que el tanque vertical quede vacío, o prácticamente vacío, antes de hacerlo. Este es un aspecto delicado para el contratista por los costes adicionales (personal, electricidad y combustible) que supone el mantener la instalación en marcha en estos periodos no activos.

En el caso del tramo de Arévalo a Medina del Campo, se empleó también una planta de fabricación tipo discontinuo, de 200 t/h, situada muy próxima a la obra. Asimismo,



Figura 5. Tanque vertical de almacenamiento

mo, para los betunes mejorados con caucho fabricado en las instalaciones del suministrador, se instalaron también tanques verticales para su almacenamiento, según lo exigido en la Orden Circular 21bis (Figura 5).

Para el betún caucho fabricado in situ se utilizó una planta móvil propiedad de la empresa contratista. El betún convencional se dosificaba al mezclador de la planta móvil desde los depósitos de la planta y el caucho, suministrado en bigbags, se descargaba en una tolva y se introducía por la parte superior mediante un sinfín. El betún y el caucho se procesaban en el mezclador durante 45 minutos y, a continuación, la mezcla se descargaba en un depósito. Éste estaba conectado a la planta de fabricación de la mezcla hacia donde se bombeaba directamente. El proceso de descarga y pesaje del betún mejorado con caucho (BC) fabricado in situ se manejaba desde la cabina de la planta asfáltica como en el caso de un betún convencional. El dispositivo se presenta en las figuras 6 y 7. La capacidad de producción de este sistema era de unas 12 t/h, suficiente para la ca-



Figura 6. Planta móvil de fabricación de betún mejorado con caucho. Descarga de PNFVU

pacidad nominal de fabricación de mezcla de la planta.

Este sistema de producción in situ elimina algunos de los problemas del sistema de producción en central, en particular, el sobrecoste, de adquisición y de operación, del almacenamiento del betún mejorado en los tanques verticales. Por el contrario, requiere de una sincronización exquisita entre la producción de la mezcla y la del betún mejorado, so pena de sufrir pérdidas de rendimiento de la planta. Además, complica mucho el control de calidad e impide tener un criterio claro del cumplimiento de la especificación ya que el único control que se realiza en la planta es el de la viscosidad del betún mejorado.

El ligante BMAVC-1 para la mezcla discontinua del tramo 132+000 a 136+000 de esta mezcla se fabricó en la planta móvil que se presenta en la figura 8. Esta planta se compone de una tolva para la descarga del caucho en polvo que a través de un sinfín llega a un mezclador al que entra el betún desde los depósitos de la planta asfáltica. Después de un periodo de mezcla, el nuevo betún pasa a un depósito donde termina de rea-



Figura 7. Planta móvil de fabricación de betún mejorado con caucho.



Figura 8. Planta móvil de fabricación de betún modificado de alta viscosidad con caucho.

lizarse la digestión del caucho. De este depósito el betún con caucho (BMAVC-1) pasa al dispositivo de descarga y pesada del ligante de la planta asfáltica.

Como en el caso del betún mejorado fabricado in situ, a la salida del betún de la planta móvil se comprueba su viscosidad con un viscosímetro HAAKE para verificar el proceso de fabricación.

4. Campaña de seguimiento

En los años 2011 y 2018 se realizaron sendas campañas de extracción de testigos y ensayos. Para que el seguimiento se haga siempre sobre las mismas zonas se establecieron tramos de referencia de un kilómetro de longitud aproximadamente. Los resultados se comparan con las F.T. y los ensayos

del control de calidad. En total se extrajeron 108 testigos, 39 en el tramo Tordesillas a Mota del Marqués y 69 en el tramo Arévalo a Medina del Campo.

- Resultados de los controles de densidad y contenido de ligante (Tabla 2).
- Resultados de los controles de sensibilidad al agua (sólo se

Tabla 2.

Tramo	FT	Mezcla	Pk _i	Pk _f	F.T		2011		2018
					Densidad (kg/dm ³)	% ligante / mezcla	Densidad (kg/dm ³)	% ligante / mezcla	Densidad (kg/dm ³)
Tordesillas- Mota del Marqués	45a	BBTM 11 B BMC-3c	199+500	200+500	2,201	5,21	2,101	5,29	2,110
	36	S-12 c/ B 40/50	199+500	200+500	2,331	4,90	2,278	4,69	2,306
	44	BBTM 11 B BM-3c	193+800	195+000	2,138	5,00	2,108	5,23	2,023
	36	S-12 c/ B 40/50	193+800	195+000	2,331	4,90	2,257	4,64	2,280
	45a	BBTM 11 B BMC-3c	192+000	192+850	2,201	5,21	2,086	5,29	2,102
	43a	S-20 c/ BC-35/50	192+000	192+850	2,364	4,60	2,319	4,59	2,293
	44	BBTM 11 B BM-3c	188+000	187+000	2,138	5,00	2,113	5,18	2,027
	43a	S-20 c/ BC-35/50	188+000	187+000	2,364	4,60	2,305	4,31	2,299
Arévalo- Medina del Campo	Tramos Exprim. 2006	M10 c/ BM-3c	143+134	143+566	Tramo Experimental 2006		2,01	4,86	1,89
		Exprim. 2006	143+584	143+968			2,15	5,93	2,06
		M10 c/ BMAV-3	143+980	144+364			2,17	5,95	2,01
		M10 c/ BMAVC-1	144+380	144+860			2,06	8,04	1,87
	60	BBTM 11 B BMAVC-1	133+500	132+500	2,06	8,40	2,00	8,42	1,89
	59	BBTM 11 B BM-3c	131+500	130+500	1,96	4,70	1,93	5,13	1,80
	56	AC 16 bin BC-35/50 central S	131+500	130+500	2,35	4,80	2,32	4,81	2,27
	59	BBTM 11 B BM-3c	141+000	142+150	1,96	4,70	1,90	5,04	1,846
	57	AC 16 bin BC-35/50 in situ S	136+000	137+900	2,37	5,40	2,23	5,50	2,29
	59	BBTM 11 B BM-3c	136+000	137+900	1,96	4,70			1,85
	96	AC 16 bin 50/70 S	136+000	137+900	2,39	4,80			2,34

Rutas Técnica

MOVILIDAD SEGURA, SOSTENIBLE Y CONECTADA

Tabla 3.

Tramo	Mezcla		Pk	Tracción Indirecta		
				Resist. Aire (kPa)	Resist. Agua (kPa)	% conservada
	Capa de rodadura					
Tordesillas- Mota del Marqués	BBTM 11 B BM-3c		187+500	1298	820	63,1 %
	BBTM 11 B BM-3c		187+500	1885	1414	75,0 %
	BBTM 11 B BMC-3c		191+500	1779	1446	81,3 %
	BBTM 11 B BM-3c		196+500	1817	1502	82,7 %
	BBTM 11 B BMC-3c		200+000	2011	1727	85,9 %
Arévalo- Medina del Campo	BBTM 11 B PMB-45/80-65		131+000	1086	1047	96,41%
	BBTM 11 B BMAVC-1		133+500	1178	1028	87,27%
	BBTM 11 B PMB-45/80-65		137+000	1358	1333	98,16%
	BBTM 11 B PMB-45/80-65		141+500	1350	1110	82,22%
	Tramo experimental 2006	M10 c/ BM-3c	143+550	1585	1159	73,12%
		M10 c/ BMAV-3 R	143+900	1953	1539	78,80%
		M10 c/ BMAV-3 C	144+000	2007	1830	91,18%
		M10 c/ BMAVC-1	144+400	1048	801	76,43%
	Capa intermedia					
Tordesillas- Mota del Marqués	BC-35/50 S		187+500	2418	1481	61,2 %
	BC-35/50 S		187+500	1991	1014	50,9 %
	BC-35/50 S		191+500	1865	1145	61,4 %
	S-12 B 40/50		196+500	2430	1091	44,9 %
	S-12 B 40/50		200+000	2469	1733	70,2 %
Arévalo- Medina del Campo	AC 16 BC 35/50 S en central		131+000	2102	1055	50,19%
	S 20 c/ B 40/50 (año 99)		133+500	2303	591	25,66%
	AC16 BIN B 60/70		137+000	2087	1172	56,16%
	AC 16 BC 35/50 S in situ		141+500	2344	1229	52,43%
	Tramo experimental 2006	S-12 B 40/50	143+550	2412	976	40,46%
		S-12 B 40/50	143+900	1925	666	34,60%
		S-12 B 40/50	144+000	2028	412	20,32%
		S-12 B 40/50	144+400	2006	701	34,95%

dispone de datos de la campaña de 2018 (Tabla 3)).

En los tramos ejecutados en 2006, se puede deducir que el betún que proporciona valores más altos de resistencia a tracción indirecta y de resistencia conservada son los betunes de alta viscosidad con polímeros (BMAV-3) a pesar del tiempo pasado desde su colocación (12 años). Comparados con los otros betunes de estos tramos, el betún que proporciona valores más bajos en resistencia a tracción es el BMAVC-1, siendo su resistencia conservada del mismo orden de magnitud que la ofrecida por el betún modificado BM-3c (Figura 9).

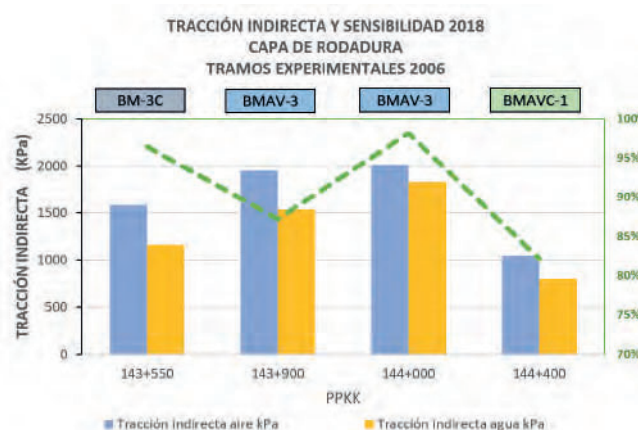


Figura 9.

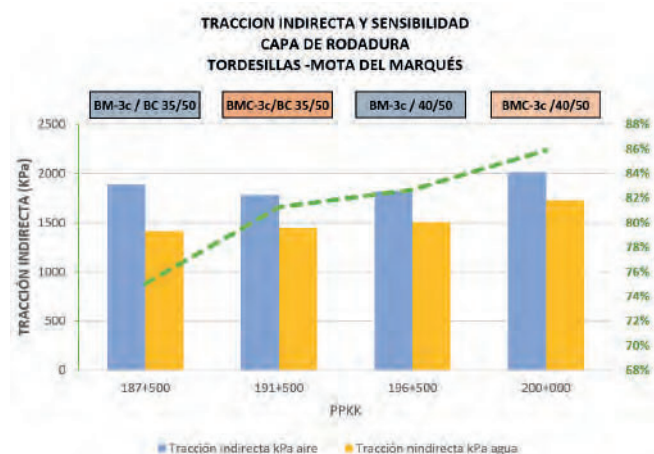


Figura 10.

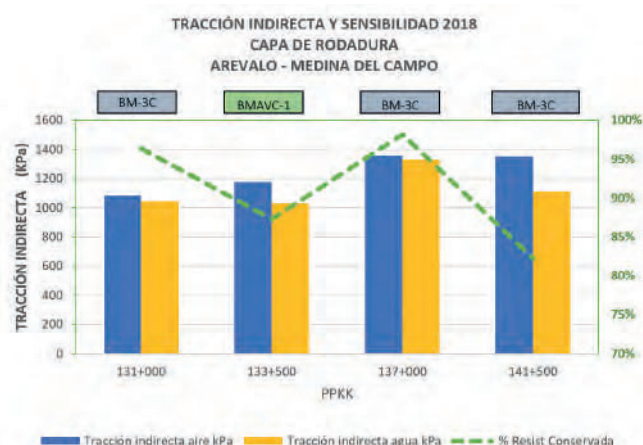


Figura 11.

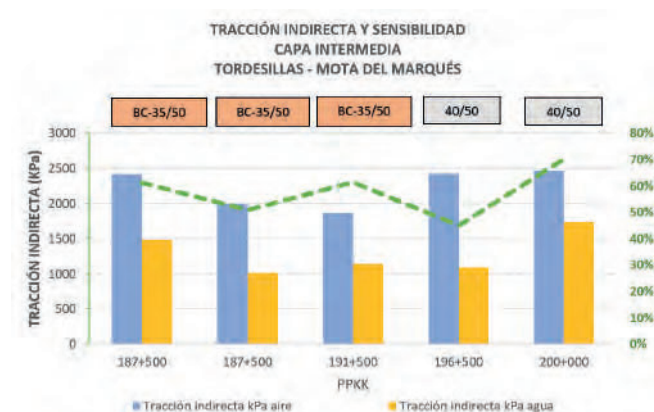


Figura 12.

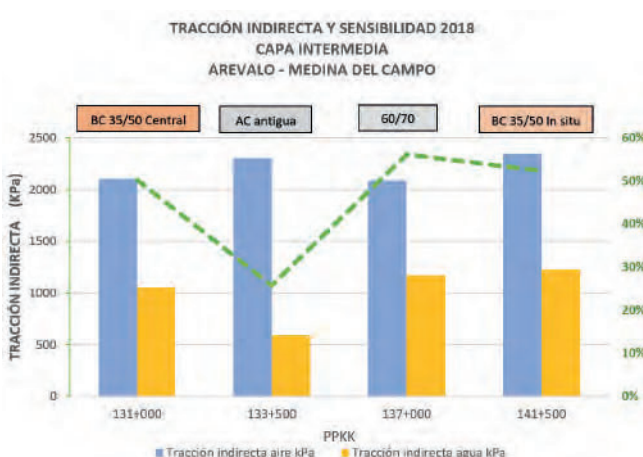


Figura 13.

Respecto a las capas de rodadura de los años 2010 y 2011:

- o Las ejecutadas en 2010 en el tramo Tordesillas a Mota del Marqués con mezclas tipo BBTM 11 B, presentan valores similares, con las variaciones propias de este tipo de pruebas, sin que se pueda apreciar ninguna tendencia marcada de comportamiento (Figura 10).
- o Entre las ejecutadas en 2011 en el tramo Arévalo a Medina del Campo con mezclas tipo BBTM 11 B, las que llevan como ligante un BM-3c “convencional” tienen valores de resistencia a tracción indirecta y valores de resistencia conservada algo mejores (92,3% frente a 87,3% de media) que

las mezclas con BMAVC-1, aunque tampoco se puede decir que haya una tendencia muy marcada al efecto (Figura 11).

En cuanto a las capas intermedias, los valores de resistencia a tracción indirecta en aire y saturadas son prácticamente similares, con una ligera ventaja en las mezclas que no tienen caucho. Teniendo en cuenta la dispersión de los valores podríamos concluir que cada tipo de mezcla, con y sin caucho, se ha comportado de manera similar. (Figura 12 y 13).

Lo que sí es muy reseñable es que, en las mezclas con más de 20 años en servicio, se comprueba que los valores de resistencia conservada son muy bajos, de hasta el 20 %. Esto supone que, en situaciones en

las que pueda entrar agua a través de las capas superiores (por fisuración reflejada, por ejemplo), el riesgo de un rápido deterioro es muy alto.

- Resultados de los controles de módulo y fatiga. En este momento sólo se dispone de datos de ensayos realizados sobre los testigos de la primera campaña de 2011 (Tabla 4)

Aunque no hay un número relevante de datos, parece que podríamos concluir que hay diferencias, tanto en lo que hace al módulo como a la fatiga, entre las mezclas fabricadas con y sin caucho, que se pueden apreciar en el tramo de Tordesillas a Mota del Marqués, donde se hicieron ensayos a ambos tipos de mezclas. Así, en este tramo se apreciaba que el

Rutas Técnica

MOVILIDAD SEGURA, SOSTENIBLE Y CONECTADA

Tabla 4.

Mezcla	Tramo	Pk	Fatiga		Módulo (MPa)
			R ²	ε ₀	
Capa de rodadura					
BBTM 11 B BMAVC-1	Arévalo- Medina del Campo	133+500 a 135+500	0,90	52	2210
Capa intermedia					
S-12 c/ B 40/50	Tordesillas – Mota del Marqués	199+500 a 200+500	0,87	131	7244
S-12 c/ B 40/50		193+800 a 195+000	0,85	85	6283
S-20 c/ BC 35/50 S		192+000 a 190+850	0,89	60	3785
S-20 c/ BC 35/50 S		188+000 a 187+000	0,92	62	3476
AC 16 BIN BC-35/50 central S	Arévalo – Medina del Campo	131+500 a 130+500	0,95	82	4491
AC 16 BIN BC-35/50 in situ S		131+000 a 142+150	0,81	95	4960

módulo es del orden del doble en las mezclas sin caucho y que el valor de ϵ_f es claramente mejor que en las mezclas con caucho.

En el tramo de Arévalo a Medina del Campo, todas las mezclas ensayadas contienen caucho, unas en forma de betunes mejorados y otra en forma de betún de alta viscosidad. Tanto los valores de módulo, como

los de fatiga, son inferiores para la mezcla con betún de alta viscosidad. (Figuras 14, 15, 16 y 17)

En cuanto a la mezcla con BMAV-1, el módulo obtenido parece algo bajo, aunque no hay referencia para comparar con otras mezclas BBTM. Lo que sí resulta sorprende es el bajo valor de ϵ_f obtenido, máxime para una mezcla con tan fuerte contenido de ligante

Resultados del ensayo FENIX

Con objeto de realizar el ensayo FENIX sobre las mezclas utilizadas, se remitieron los testigos necesarios a la Universidad de Cataluña donde generosamente los ensayaron.

Del informe emitido por el profesor Rodrigo Miró incluimos los gráficos resumen de los resultados obtenidos y sus conclusiones.

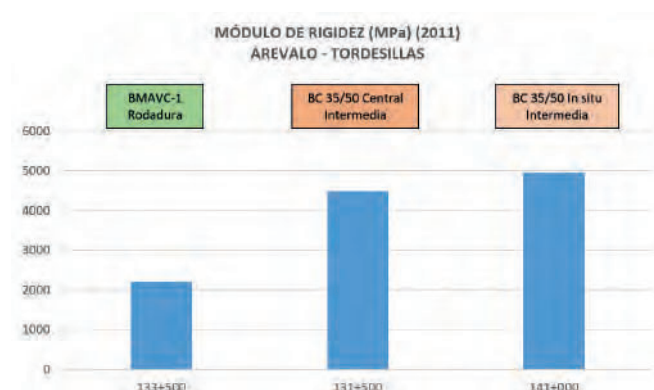


Figura 14.

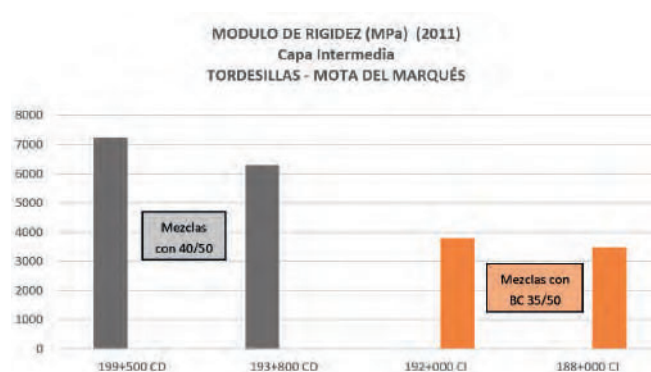


Figura 15.

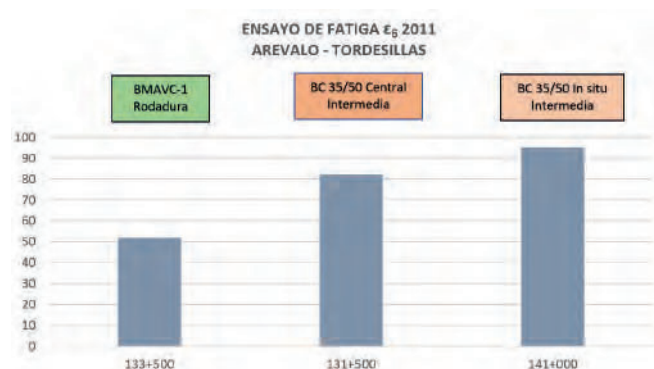


Figura 16.

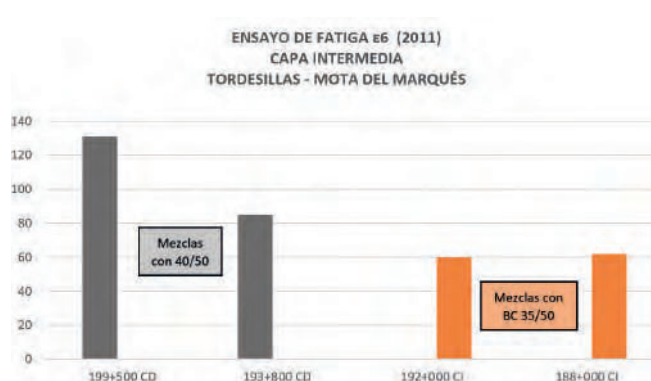


Figura 17.

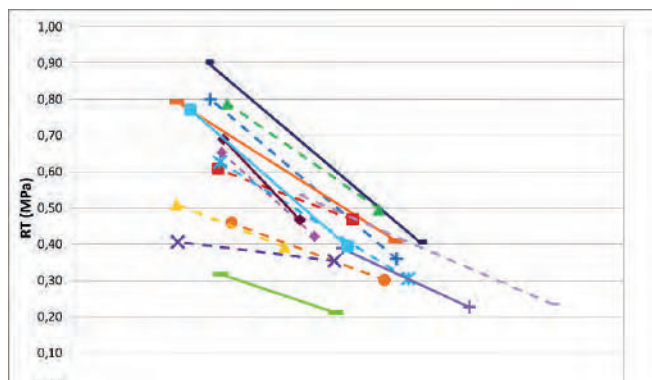


Figura 18. Capa rodadura

“Los resultados obtenidos se presentan a continuación en forma de gráficos resistencia-ductilidad, confeccionados a partir de dos parámetros del ensayo Fénix: la resistencia obtenida a partir de la carga máxima y el desplazamiento al 50% de la carga máxima post-pico, como medida de la ductilidad de la mezcla. Las rectas de los gráficos representan la variación de la resistencia y la ductilidad con la temperatura: los puntos de más a la derecha corresponden a los valores obtenidos a 20°C y los de más a la izquierda, a 5°C. En todos los casos, al bajar la temperatura, la resistencia aumenta y la ductilidad disminuye. (Figura 18 y 19)

Los resultados muestran que tanto con los betunes modificados con polímeros como con los betunes caucho se pueden obtener mezclas que presentan diferencias en su comportamiento. Esto puede ser debido a variaciones en su composición: granulometría, naturaleza del árido o tipo y proporción de ligante utilizado (los betunes de alta viscosidad, por ejemplo). Esto ocurre tanto en el caso de mezclas para capa de rodadura como para capa intermedia.

Sin embargo, de estos resultados no se podría deducir una diferencia en la respuesta de las mezclas por el uso o no de betún caucho. En el caso de las mezclas para capas de rodadura se pueden obtener resultados similares a las fabricadas con betunes modificados y en el caso de

las mezclas para capa intermedia, su respuesta es similar a las fabricadas con betunes convencionales (aunque éstas últimas son algo menos dúctiles que las mezclas con caucho, para cualquiera de las temperaturas ensayadas).”

5. Campañas de auscultación en 2018.

a. Inspecciones visuales

En la provincia de Valladolid se vienen haciendo inspecciones visuales de toda la red cada dos años, por lo que se dispone de datos de la evolución de los tramos objeto de este informe a lo largo del tiempo desde su construcción. Las inspecciones se realizan siguiendo la metodología establecida en la O.C. 9/2000 “Rehabilitación de firmes”, valorando los daños observados cada 25 m. Los resultados de fisuración estructural,

es decir, sin contabilizar los de las grietas transversales que se consideran de reflexión de las de la base de gravacemento, se recogen en la siguiente tabla. Valores por debajo de 8 cada 100 metros mostrarían un estado aceptable, entre 8 y 16 el estado sería malo y por encima de 16 el estado sería muy malo. (Figura 20)

Las mezclas extendidas sobre la calzada antigua son las que, como media, han dado peores valores del índice de inspección visual. En el caso de la mezcla de rodadura fabricada con BM-3c sobre una capa intermedia fabricada con BC 35/50 se aprecia un deterioro mayor que para el resto de las mezclas y combinaciones, si bien este tramo se corresponde casi en un 80 % con la calzada vieja. El siguiente tramo con una mezcla de rodadura fabricada con BMC-3c sobre una AC 22 con BC 35/50, se apoya en más de un 80 % en calzada nueva con base de gra-

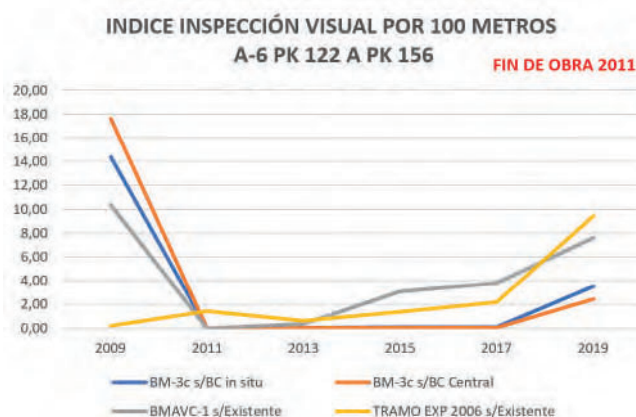


Figura 20.

Rutas Técnica

MOVILIDAD SEGURA, SOSTENIBLE Y CONECTADA

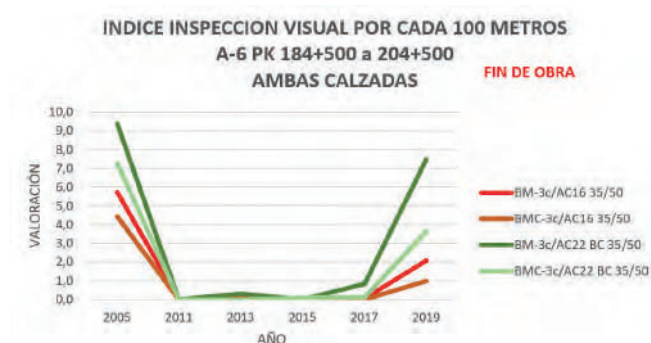


Figura 21.

vacemento y el índice de inspección visual baja a la mitad. (Figura 21)

Una primera conclusión que se puede extraer de este tramo es que las capas intermedias con betún mejorado con caucho, ya sea in situ o en central, proporcionan valores y comportamientos similares. El tramo con BMAVC-1 presenta un comportamiento peor, si bien en este caso la mezcla se extendió directamente sobre la superficie de la carretera existente sin intercalar una capa intermedia nueva, lo que ha penalizado, sin duda, esta solución, aunque se eligió una zona donde los datos de deflexión e inspección visual eran buenos.

El tramo experimental extendido en 2006 no es comparable en este caso y a continuación se hace un análisis independiente del mismo.

En el gráfico siguiente se presenta la evolución de la fisuración transversal de cada uno de los subtramos en que se dividió el tramo experimental del año 2006. (Figura 22)

Se puede comprobar que las mezclas que mejor se han comportado son las de alta viscosidad modificadas con polímeros, mientras que la fabricada con betún modificado BM-3c y la fabricada con betún de alta viscosidad modificada con caucho se han comportado de forma similar, a pesar de que la fabricada con BM-3c tiene un centímetro menos de espesor y una dosificación de ligante mucho menor (5% vs 9%).

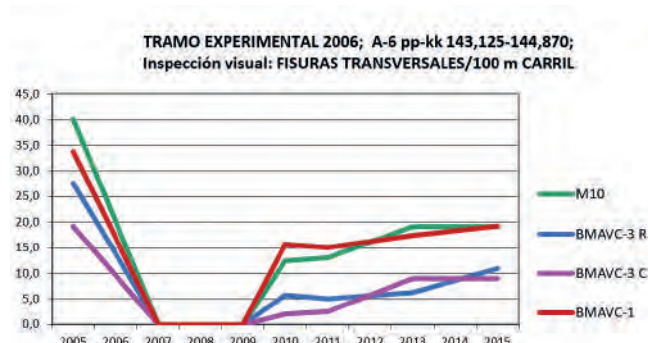


Figura 22.

b. Auscultación en 2018

Durante 2018 se hizo una auscultación mediante imágenes 3D de las carreteras dependientes de la Unidad de Carreteras de Valladolid y se obtuvieron los distintos índices de fisuración.

Para los tramos de alta viscosidad extendidos en 2006, los resultados se presentan en la tabla 5.

Se puede comprobar que el tramo en mejor estado es el extendido con mezclas que contenían betunes de alta viscosidad con polímeros fabricados en planta. Entre el tramo fabricado con BM-3c y el tramo fabricado con BMAVC-1, los resultados son favorables al betún BM-3c, teniendo en cuenta que en el tramo con betún de alta viscosidad con caucho presenta además una mayor dispersión, lo que implica valores extremos más altos, aparte de las diferencias, ya señaladas, de espesor y de dosificación de ligante.

En el siguiente cuadro se presentan los resultados obtenidos para la fisuración transversal en los tramos de calzada nueva dentro del desdoblamiento, que son los que están contruidos con gravacemento (Tabla 6).

Se comprueba que el tramo con una mayor fisuración transversal es el correspondiente a la mezcla con BMAVC-1, mientras que en los tramos con mezcla discontinua con betún BM-3c no parece que haya diferencia entre aquellos en los que la capa in-

termedia incluye BC fabricado in situ o en central. Hay que indicar, como ya se dijo en el apartado de inspección visual, que el tramo con BMAVC-1 se extendió directamente sobre la rodadura existente, lo que puede haber penalizado esta solución, aunque se eligió una zona donde los datos de deflexión e inspección visual eran buenos, pero con una fisuración transversal ya marcada.

Otro aspecto interesante es la comparación de comportamiento entre la calzada nueva semirrígida (desdoblamiento) y la calzada antigua semiflexible, en relación a la fisuración no transversal. Haciendo la media de los tramos homogéneos por tipo de base y rodadura se encuentra lo expuesto en Figura 23 y 24.

Según los resultados obtenidos, los tramos de firme semirrígido presentan valores bastante homogéneos, lo que resulta coherente con su construcción en fechas próximas. Por el contrario, en el firme antiguo, que se apoya en bases granulares, hay resultados muy diferentes en los dos tramos y, en un caso, los resultados son peores que en el firme semirrígido y, en el otro, son mejores.

Además, en el firme semirrígido, el tramo en el que se colocó únicamente una capa discontinua con betún BMAVC-1 presentó una mayor fisuración que el tramo en el que la capa de rodadura era una mezcla discontinua BBTM con betún BM-3c y la capa intermedia una mezcla tipo

Tabla 5.

TIPO BETUN	PK Inicial	PK final	Media (m)	Desviación (s)
BM-3c	143+125	143+575	10,01	4,1
BMAV-3	143+575	144+370	2,52	1,69
BMAVC-1	144+370	144+870	13,06	7,54

Tabla 6.

Tramo	Mezcla		Pk	Tracción Indirecta		
Tramo Tordesillas – Mota del Marqués						
BM-3c	AC 16 c/ B 40/50	184+700	198+200	1	AMBOS	0,05
BMC-3c	AC 16 c/ B 40/50	198+200	204+800	1	AMBOS	0,00
BM-3c	AC 22 c/ BC-35/50 S	188+030	189+170	2	AMBOS	0,32
BMC-3c	AC 22 c/ BC-35/50 S	191+050	191+850	2	AMBOS	0,00
		192+050	193+420	2	AMBOS	0,10
		194+030	197+880	2	AMBOS	0,17
		198+800	204+800	2	AMBOS	0,03
Tramo Arévalo – Medina del Campo						
PMB-45/80-65	AC 16 BC 35/50 S in situ	122+730	125+620	1	AMBOS	0,37
		125+880	127+060	1	AMBOS	0,13
		127+140	128+100	1	AMBOS	0,12
	AC 16 BC 35/50 S central	128+100	129+160	1	AMBOS	0,24
	AC 16 BC 35/50 S in situ	142+480	143+100	1	AMBOS	0,42
	Tramo experimental 2006	143+100	144+700	1	AMBOS	3,02
	AC 16 BC 35/50 S in situ	144+700	150+280	1	AMBOS	0,63
	AC 16 BC 35/50 S in situ	122+000	123+600	2	AMBOS	0,49
		125+130	127+880	2	AMBOS	1,36
		128+520	129+800	2	AMBOS	1,50
	AC 16 BC 35/50 S central	129+800	132+000	2	AMBOS	1,12
BMAVC-1	Existente	132+000	136+000	2	AMBOS	3,1
PMB-45/80-65	AC 16 B 60/70	136+000	137+900	2	AMBOS	0,39
	AC 16 BC 35/50 S central	137+900	145+360	2	AMBOS	0,31
			156+000	2	AMBOS	0,70

TOTAL FISURACIÓN (%) (Malla, Longitudinal y Errática)
Tramo Arévalo - Medina del Campo

Rodad.	B8TM 11 BM-3c	B8TM 11 BM-3c	B8TM 11 BMAVC-1	B8TM 11 BM-3c	B8TM 11 BM-3c
Interm.	AC 16 bin S BC 35/50 In situ	AC 16 bin S BC 35/50 Central	Firme existente	AC 16 bin S BC 35/50 In situ	AC 16 bin S BC 35/50 Central



Figura 23. Tramo Tordesillas – Mota del Marqués

TOTAL FISURACIÓN (%) (Malla, Longitudinal y Errática)
Tramo Tordesillas – Mota del Marqués

Rodadura	B8TM 11 BM-3c	B8TM 11 BMC-3c	B8TM 11 BMC-3c	B8TM 11 BM-3c	B8TM 11 BM-3c	B8TM 11 BMC-3c
Intermedia	AC 16 S 40/50	AC 16 S 40/50	AC 22 S BC 35/50	AC 22 S BC 35/50	AC 22 S BC 35/50	AC 22 S BC 35/50

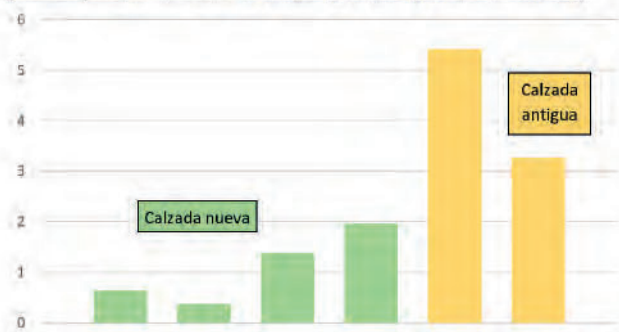


Figura 24. Tramo Arévalo – Medina del Campo

Rutas Técnica

MOVILIDAD SEGURA, SOSTENIBLE Y CONECTADA

AC con betún BC fabricado in situ, y esta a su vez presenta mayor fisuración que la misma rodadura apoyada en una mezcla tipo AC fabricada con betún BC fabricado en central.

Respecto a la comparación entre mezclas con/sin caucho de NFVU, los resultados muestran que los tramos con capa intermedia de mezcla convencional funcionan mejor que los tramos con mezcla con betún mejorado con caucho, sin diferencia clara entre las fabricadas en central o in situ. Por el contrario, las rodaduras con BMC-3c muestran algo menos de fisuración que las que llevan BM-3c.

c. Coeficiente de rozamiento transversal

La evolución del CRT no muestra diferencias significativas en función del tipo de ligante empleado en las mezclas BBTM 11 B.

Los datos más amplios se refieren al tramo de Tordesillas a Mota del Marqués. Los valores de CRT arrancan en 2010 de 75 en calzada derecha y 70 en calzada izquierda, evolucionando prácticamente en paralelo las zonas con BM-3c y BMC-3c hasta el año 2018 en las que los valores en ambas calzadas se sitúan alrededor de 57-58.

En el caso del tramo de Arévalo a Medina del Campo, los datos son más recientes, sin diferencias significativas entre el BM-3c y el BMAVC-1. Van evolucionando de 63-64 en 2015 a 57-59 en 2018 como el otro tramo.

6. Conclusiones

Este artículo se ha preparado con el objetivo de mostrar el comportamiento a largo plazo de dos tramos rehabilitados de la A-6 en la provincia de Valladolid, ejecutados en los años 2010 y 2011, poniendo el foco en las

mezclas fabricadas con adición de caucho procedente de NFVU.

En estos tramos se han empleado mezclas de granulometría continua semidensa con betunes convencionales 40/50 y betunes mejorados con caucho BC 35/50 fabricados in situ y en central. Respecto a las capas de rodadura, se han empleado mezclas BBTM 11 B con betunes modificados con polímeros BM-3c, con polímeros y caucho BMC-3c y de alta viscosidad con caucho BMAVC-1.

También se han recogido los resultados de un tramo experimental del año 2006 en los que se comparan rodaduras con BM-3c, BMAVC-1 y BMAV-3 (equivalente al actual PMB 45/80-75).

La significativa longitud de los tramos de carretera estudiados permite soslayar los problemas de condiciones locales o aspectos puntuales que hubieran podido afectar a los datos. Las principales conclusiones que se pueden obtener, a juicio de los autores, son las siguientes:

1. Los ensayos de extracción con disolvente no reflejan los porcentajes de betún+caucho introducidos en la mezcla, proporcionando valores intermedios entre el porcentaje de betún puro y el de betún+caucho. Los porcentajes de betún obtenidos por combustión reflejan mucho mejor los porcentajes de betún+caucho introducidos. La diferencia entre ambos ensayos nos daría una idea del porcentaje de caucho de NFVU no digerido, pero no la del caucho total empleado que debería ser una información facilitada por el fabricante.
2. En las fórmulas de trabajo con BC 35/50, el porcentaje óptimo de betún+caucho sobre mezcla es superior al de las mezclas convencionales. Esta diferencia es mayor en el caso de los betunes

mejorados fabricados in situ, posiblemente por el menor tiempo de digestión. Si consideramos sólo el betún, los porcentajes son similares, lo que vendría a indicar que el caucho debe ser considerado, al menos parcialmente, como un aditivo sólido en lugar de un ligante.

3. Los resultados de los ensayos de sensibilidad al agua indican que, en rodadura, las mezclas que mejor se han comportado son las fabricadas con el 6,5% de betún de alta viscosidad con polímeros, BMAV-3, mientras que las mezclas con el 9% de betún de alta viscosidad con caucho, BMAVC-1, proporcionan un comportamiento peor que estas y similar a las mezclas con el 5% de betún modificado con polímeros, BM-3c.

Las mezclas utilizadas en la capa intermedia, tanto con betún mejorado con caucho como con betún de penetración, dieron valores similares.

4. Los valores de módulo obtenidos de las mezclas con caucho son inferiores (50-70 %) a los de las mezclas continuas semidensas fabricadas con betunes convencionales de similar penetración. Probablemente ello se deba a que la presencia del caucho ocasiona una disminución del valor de penetración que no se corresponde con la viscosidad del betún de la mezcla betún+caucho.
5. Los ensayos de fatiga muestran, por su parte, que las deformaciones para un millón de ciclos en las mezclas con betún convencional son mayores que las que llevan caucho. Lo que sería indicativo de un peor comportamiento frente a las tracciones que se corrobora por su mayor fisuración al final del periodo analizado.

6. Para analizar la información obtenida para la inspección visual se ha tenido en cuenta el tipo de capa de rodadura y de intermedia existente.

Los tramos con el mismo tipo de capa de rodadura y capas intermedias con betunes mejorados de cualquier tipo, in situ o en central, se han comportado de forma similar pero algo peor que los de las mezclas con betunes convencionales.

Por el contrario, cuando la capa intermedia es la misma, los tramos con rodaduras con BMC-3c presentan un comportamiento frente a la fisuración algo mejor que las capas con BM-3c.

En general, puede decirse que las diferencias entre la utilización de mezclas con o sin caucho no son significativas y en todos los casos se ha empezado a manifestar la fisuración al mismo tiempo, más o menos.

Sin embargo, la capa de rodadura con BMAVC-1, que se extendió directamente sobre el firme existente, sí presenta un peor comportamiento, lo que puede deberse a no haberse apoyado en una capa intermedia nueva.

7. Para el tramo experimental de 2006, los mejores resultados de inspección visual se obtienen para los tramos con betunes de alta viscosidad con polímeros, BMAV-3, mientras que las mezclas con BMAVC-1 y BM-3c presentan un comportamiento similar. En el gráfico de evolución de la fisuración transversal se puede advertir como ésta se empieza a manifestar a partir del cuarto año, y cómo es menor en los tramos con betún de alta viscosidad modificados con polímeros.

8. En cuanto a la fisuración apreciada mediante la tecnología por imagen 3D, los resultados indican que la mezcla con betún de alta viscosidad con caucho ha presentado una menor resistencia a la propagación de fisuras transversales, lo que puede ser debido también al menor espesor total de mezcla nueva sobre la mezcla vieja ya fisurada.

9. En relación con el resto de fisuración, no transversal, también los peores resultados se han obtenido para la mezcla con betún de alta viscosidad con caucho, mientras que los mejores resultados se han obtenido para los tramos en los que la capa intermedia estaba formada por una mezcla con betún convencional. Entre las mezclas de betún mejorado con caucho parece haber funcionado algo mejor las fabricadas en central.

10. En relación con el ensayo Fénix, para cada tipología de mezcla, el comportamiento, usando o no betún con caucho, es similar, es decir, no hay diferencias significativas en el comportamiento de una mezcla por usar o no betún caucho.

11. En cuanto al CRT, los resultados obtenidos son similares para todas las BBTM 11 B, independientemente del ligante utilizado.

Como última conclusión general, en el caso que nos ocupa, no parece que la utilización de betunes que incorporan PNFVU hayan proporcionado ninguna ventaja respecto al empleo de betunes convencionales, si bien los betunes altamente modificados con polímeros (actuales PMB 45/80-75) se han comportado claramente mejor que el resto de betunes modificados, mientras que las mezclas fabricadas con betunes modificados de alta viscosidad

con caucho BMAVC-1 han tenido un comportamiento peor que el resto de mezclas.

7. Agradecimientos

Los autores quieren manifestar en este punto su agradecimiento a D. Alberto Bardesi Orúe-Echevarría, por sus innumerables, precisas y valiosas aportaciones a la redacción de este artículo.

Igualmente quieren agradecer su buena disposición a todos los que hicieron posible la ejecución de las obras comentadas, contratistas y técnicos, de la Administración y de las empresas privadas participantes, que asumieron el riesgo de hacer a gran escala algo sobre lo que no había demasiada experiencia.

8. Bibliografía

- [1] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Pliego de prescripciones técnicas para obras de carreteras y puentes. PG-3. Varios artículos.
- [2] Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana. Dirección General de Carreteras. Orden Circular 21/2007 sobre el uso y especificaciones que deben cumplir los ligantes y mezclas bituminosas que incorporen caucho procedente de neumáticos fuera de uso (nfu).
- [3] Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana. Dirección General de Carreteras. Orden Circular 21bis/2009 sobre betunes mejorados y betunes modificados de alta viscosidad con caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU) y criterios a tener en cuenta para su fabricación in situ y almacenamiento en obra. ❖