

Caracterización de las mezclas bituminosas con NFU extendidas en el tramo de la carretera EX-370, de Plasencia a Montehermoso

BALTASAR RUBIO (*), MARISA CARMONA (**), JOSÉ M^o ÁVILA (**), RAFAEL JIMÉNEZ (*), SILVIA IZQUIERDO (**) y LEONARDO ENRIQUEZ (*)

RESUMEN El Plan Nacional de neumáticos fuera de uso y recientemente, el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR), establecieron como una aplicación prioritaria en la gestión de los neumáticos fuera de uso, su empleo en la fabricación de mezclas bituminosas. Sin embargo, hasta el año 2006 no se había realizado en la Comunidad de Extremadura ninguna experiencia en carreteras con el polvo de caucho de neumático fuera de uso (NFU). Es por ello que el Instituto Tecnológico de Rocas Ornamentales y Materiales de Construcción (INTROMAC) y la empresa ARAPLASA solicitaron y obtuvieron una ayuda para desarrollar el proyecto intitulado "Diseño y Desarrollo de Mezclas Bituminosas con polvo de Neumáticos", englobado en el III Plan Regional de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación de abril de 2006. En dicho proyecto intervino también como colaborador externo para evaluar el comportamiento del tramo de ensayo, el Centro de Estudios del Transporte del CEDEX. El principal objetivo de este proyecto era ofrecer al sector de la construcción de la Comunidad de Extremadura, el conocimiento necesario para profundizar en el diseño, fabricación y puesta en obra de nuevas mezclas bituminosas, utilizando polvo de NFU, contribuyendo a fomentar el desarrollo sostenible gracias al uso de residuos de otros procesos industriales en obras públicas. En este artículo se presenta el estudio de los materiales básicos y la dosificación de la mezcla bituminosa con polvo de neumático incorporado mediante vía seca, así como de la mezcla sin caucho utilizada como referencia. Además, se exponen los datos relativos a la fabricación, puesta en obra y control del tramo de refuerzo llevado a cabo en la carretera EX-370, tramo Plasencia-Montehermoso, de la Comunidad de Extremadura y finalmente, los resultados de caracterización de las dos mezclas bituminosas tipo AC22S puestas en obra, mediante testigos extraídos del pavimento, y a través de medidas de regularidad y textura superficial obtenidas con el perfilómetro láser y mediciones de ruido de rodadura con el equipo CPX.

CHARACTERIZATION OF BITUMINOUS MIXTURES CONTAINING CRUMB TYRE RUBBER, USED IN THE PLASENCIA-MONTEHERMOSO EXPERIMENTAL PAVEMENT SECTION

ABSTRACT *The use of crumb rubber from scrap tyres in the production of bituminous mixtures was established as a priority application for this waste material in both the National Plan for Scrap Tyres and more recently, the Integrated National Plan for Waste Materials. However, by 2006 no experience of use in road construction had been carried out yet in the Extremadura Community. For this reason, the project called 'Design and Development of Bituminous Mixtures using Crumb Tyre Rubber' was presented by INTROMAC and ARAPLASA and approved as a part of the 3rd. Regional Plan for R&D&I in April 2006. The CET- CEDEX also took part in the project as an external collaborator, by assessing the characteristics of the experimental pavement section constructed.*

The main objective for this project was to offer the construction industry in Extremadura a better knowledge, useful data and experience on the design, production and extension of new types of bituminous mixtures containing crumb rubber tyre, thus making a contribution to the promotion of a sustainable development by the use of a waste residue on public works.

This article describes a case study, namely the construction of an overlay section in the road EX-370, between Plasencia and Montehermoso, in the Extremadura Community, with an overview on the basic materials study, the mixture design, with the addition of crumb rubber following a dry process, and the design of a reference mixture used for comparison. It also includes field data related to the mixture production, paving and quality assessment operations. Finally, more characterization data from the two AC22S mixtures placed, obtained via testing of cores, and other finished pavement properties (such as surface regularity and roughness measurements by laser profilometer, noise measurements by CPX equipment), are also provided.

Palabras clave: Mezcla bituminosa, Neumáticos fuera de uso, Caucho, Ensayos, Auscultación.

Keywords: Bituminous mixture, Crumb tyres, Rubber, Testing, Roughness, Macrotecture.

(*) Centro de Estudios del Transporte, CEDEX.

(**) Instituto Tecnológico de Rocas Ornamentales y Materiales de Construcción (INTROMAC).

1. INTRODUCCIÓN

El polvo de caucho procedente de los neumáticos fuera de uso puede incorporarse a las mezclas bituminosas por dos procedimientos generales denominados vía húmeda y vía seca (1). El primero consiste en adicionar dicho material a un betún asfáltico para obtener un betún con caucho, que se utiliza posteriormente en la fabricación de la mezcla bituminosa. El segundo consiste en introducir el polvo de caucho de NFU en la amasadora de la planta de fabricación de mezcla bituminosa después de la dosificación de los áridos.

En el proceso por vía húmeda el polvo de caucho, de tamaño de partículas inferior a 1 mm, se mezcla con el betún a una temperatura elevada, de forma que se produce una interacción físico-química entre ambos componentes. Las propiedades del ligante obtenido dependen de la naturaleza y composición del betún y del polvo de caucho, así como de las proporciones relativas de ambos componentes, del tamaño de las partículas de caucho y del tiempo y temperatura de mezclado.

En el proceso por vía seca, el polvo de caucho actúa en parte como árido, pero las partículas más finas interactúan con el betún, modificando sus propiedades y consiguiéndose así mejorar el comportamiento de la mezcla bituminosa. Las propiedades y características de las mezclas bituminosas a las que se ha incorporado polvo de caucho dependen de la cantidad de polvo de caucho añadida y de su superficie específica, así como de las condiciones de fabricación de la mezcla bituminosa (tiempo y temperatura de amasado) y de las condiciones de puesta en obra (tiempo de maduración y sistema de compactación).

En España, las experiencias prácticas sobre el empleo de polvo de NFU en mezclas bituminosas se iniciaron en el año 1994 en Cataluña, en carreteras vecinales pertenecientes al término municipal de Vacarisses, empleando la vía seca con mezclas semidensas (2). Posteriormente en 1997 en la carretera B-140 a la entrada de Sabadell (3), si bien hasta la fecha hay recogidas otras varias referencias españolas (4-5). Respecto a la vía húmeda, el primer betún modificado con polvo de caucho de NFU, se desarrolló a escala industrial en el año 1996, existiendo numerosas experiencias posteriores (6-10). En el año 2002 se impulsó nuevamente el empleo de polvo de caucho en la fabricación de mezclas bituminosas, debido a la publicación del Plan de Neumáticos Fuera de Uso, así como de la Orden Circular 5bis/02, en la que se prescribía la prioridad en el empleo de los materiales procedentes del reciclaje de neumáticos en las mezclas bituminosas, siempre que su uso fuese técnica y económicamente viable. Posteriormente, en el año 2007 se publicó el Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas (1), que recogía el estado del arte en cuanto a conocimientos y experiencias de nuestro país en este campo, de cara a utilizar adecuadamente este material, definiendo las condiciones técnicas que permitieran su empleo para conseguir los beneficios potenciales de la técnica. Asimismo, la publicación de la O.C. 21/2007 por parte de la Dirección General de Carreteras (11), en la que se recogían las especificaciones y se definían las aplicaciones de los betunes-caucho, ha regulado e incrementado su uso, que ha sido finalmente corroborado de forma explícita en la O.C. 24/2008 (12), donde se modifican los artículos 542 y 543 referentes a mezclas bituminosas en caliente para adaptarlos a la nueva normativa europea.

En Extremadura, hasta el año 2006 no se había realizado ninguna experiencia en carreteras con empleo del

polvo de caucho procedente de NFU, por lo que Instituto Tecnológico de Rocas Ornamentales y Materiales de Construcción (INTROMAC) y la empresa ARAPLASA solicitaron y obtuvieron una ayuda para desarrollar el proyecto intitulado "Diseño y Desarrollo de Mezclas Bituminosas con polvo de Neumáticos", englobado en el III Plan Regional de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación de abril de 2006, con número de expediente PDT06A063. En dicho proyecto intervino también como colaborador externo el Centro de Estudios del Transporte del CEDEX. Para completar el proyecto se contó con la colaboración y participación activa de la Dirección General de Infraestructuras y Agua, perteneciente a la Consejería de Fomento de la Junta de Extremadura, con el objetivo de disponer de un tramo real de prueba en el que poner en práctica los desarrollos del proyecto.

El principal objetivo de este proyecto era ofrecer al sector de la construcción y a la propia Administración de la Comunidad de Extremadura, el conocimiento necesario para profundizar en el diseño, fabricación y puesta en obra de nuevas mezclas bituminosas, utilizando polvo de neumáticos fuera de uso (NFU), contribuyendo a fomentar el desarrollo sostenible, mediante el uso en obras públicas de residuos generados en otros procesos industriales.

En este artículo se presenta el estudio de los materiales básicos y la dosificación de la mezcla bituminosa con polvo de neumático incorporado mediante vía seca, así como de la mezcla sin caucho utilizada como referencia. Además, se exponen los datos relativos a la fabricación, puesta en obra y control del tramo de refuerzo llevado a cabo con estas mezclas en la carretera EX-370 de la Comunidad de Extremadura, entre Plasencia y Montehermoso. Finalmente, se incluyen los resultados de caracterización de las dos mezclas bituminosas tipo AC22S puestas en obra, mediante los testigos extraídos del pavimento, así como las medidas de regularidad y textura superficial con el perfilómetro láser y las mediciones de ruido de rodadura con el equipo CPX.

2. DOSIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS

En Extremadura, las mezclas bituminosas de uso generalizado como capa de rodadura son las mezclas tipo hormigón bituminoso semidensas AC22S, dado que son relativamente impermeables para poder proteger las capas inferiores y la explanada de la acción del agua. Además presentan unas características superficiales adecuadas al tipo de tráfico que soportan las carreteras de la Comunidad de Extremadura. Por ello, en el tramo de ensayo se eligieron dos mezclas bituminosas tipo AC22S, la primera con polvo de caucho incorporado por vía seca y la segunda, empleada como referencia, una mezcla convencional sin caucho.

A continuación se indican las características de los materiales básicos y la dosificación de las mezclas bituminosas:

- Ligantes

El ligante empleado en este estudio fue un betún asfáltico tipo B 50/70 suministrado por CEPESA-PROAS.

- Áridos

El árido grueso utilizado en la fabricación de las mezclas fue una gravaca procedente de la cantera de Construcciones Araplaza situada en Plasencia, clasificado en tres fracciones 6/12, 12/20 y 12/32. Como árido fino se utilizó una arena 0/6 de naturaleza silíceo, procedente de la gravera las Viñuelas, y como polvo mineral se empleó el procedente de los propios áridos. Los resultados de los ensayos de caracterización se indican en la Tabla 1.

Ensayo	Norma	Resultado
ARIDO GRUESO - GRAUVACA		
DESGASTE LOS ÁNGELES, %	UNE EN 1097-2	19
PULIMENTO ACCELERADO	UNE EN 1097-8	60
ÍNDICE DE LAJAS, %	UNE EN 933-3	
Fracción 12/32		25
Fracción 12/20		26
Fracción 6/12		28
PARTÍCULAS FRACTURADAS, %	UNE EN 933-5	
Fracción 18/25		68
Fracción 12/18		86
Fracción 6/12		96
ARIDO FINO - SILICEO		
EQUIVALENTE DE ARENA	UNE EN 933-8	61
DENSIDAD APARENTE DEL FILLER	UNE EN 1097-3	0,55

TABLA 1. Características de los áridos.

- Polvo de neumático

Para fabricar y dosificar la mezcla bituminosa se ensayaron tres polvos de neumático de granulometrías 0/0,6, 0/0,8 y 0,8/2,5 mm, suministrados por la empresa RENEAL, seleccionándose como el más idóneo para su uso en el tramo, el de granulometría más fina.

- Mezclas bituminosas

Con los áridos descritos anteriormente se realizó la composición para encajar en el huso granulométrico AC22S, obteniéndose la granulometría que se indica a continuación en la Tabla 2 y en la Figura 1.

TAMIZ UNE, mm	HUSO AC22S		GRANULOMETRÍA
	mín	máx	MEZCLA AC22S
31,5	100		100
22,4	90	100	92
16	70	88	75
8	50	66	58
2	24	38	33
0,5	11	21	12
0,25	7	15	8
0,063	3	7	5,2

TABLA 2. Granulometría de la mezcla AC22S.

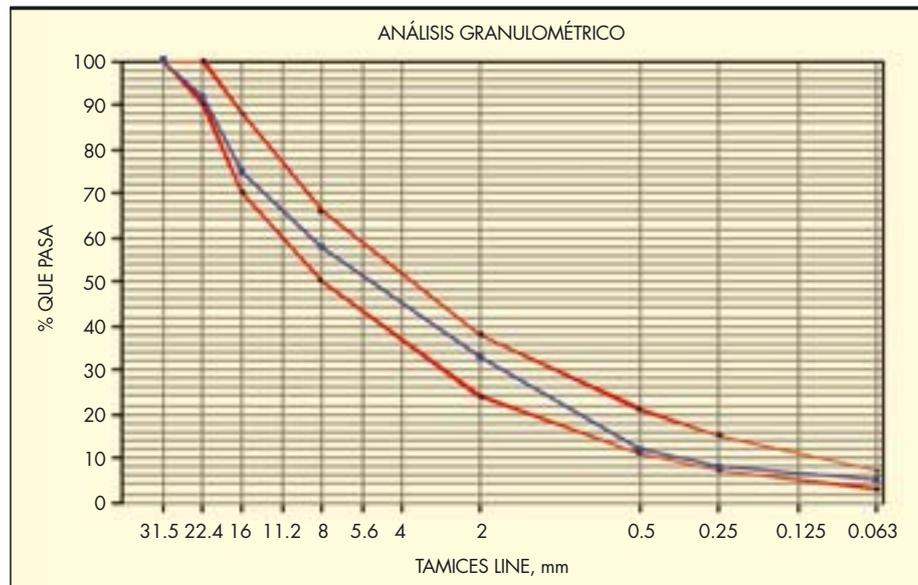


FIGURA 1. Curva granulométrica de la mezcla AC22S.

TIPO DE MEZCLA	AC22S Referencia	AC22S con caucho
Contenido óptimo de ligante, % s/a	4,8	5,3
Polvo de caucho, % s/a	-	1,0
Densidad mezcla, g/cm ³	2,380	2,390
Estabilidad, kN	17,9	17,9
Deformación, mm	3,3	3,2
Huecos en la mezcla, %	5,9	5,9
Huecos en áridos, %	16,5	17,8

TABLA 3. Características de las mezclas AC22S.

La mezcla bituminosa convencional se dosificó mediante el análisis de huecos y la resistencia a las deformaciones plásticas a través del método Marshall, empleando probetas cilíndricas con contenidos crecientes de betún. En base a los resultados obtenidos y aplicando los criterios y las especificaciones recogidas en el artículo 542 del PG-3 para este tipo de mezclas, se determinó un contenido óptimo de ligante de 4,8% en masa sobre áridos.

Para dosificar la mezcla con polvo de caucho se empleó también el método Marshall, estudiando polvos de caucho con tres tamaños máximos 0,6, 0,8 y 2,5 mm, y empleando tres porcentajes distintos de polvo: 0,5, 1,0 y 1,5%, así como tres tiempos de maduración diferentes, para permitir que los maltenos del betún hinchen el polvo de caucho. De los resultados obtenidos se dedujo que cuando se emplea polvo de caucho de mayor tamaño de partícula y cuanto mayor es el porcentaje de caucho incorporado, más se reduce la estabilidad de la mezcla y más aumentan los tiempos de maduración. Por ello se seleccionó el material de menor tamaño de partícula y un contenido del 1%, así como un mayor contenido de ligante (5,3% s/a)

En la Tabla 3, se indican las características obtenidas en las mezclas para los contenidos óptimos de betún seleccionados.

Las características de ambas mezclas son similares y cumplen las especificaciones exigidas a este tipo de mezclas cuando se emplean para capa de rodadura.

Con los contenidos óptimos de ligante determinados, se evaluaron la resistencia a las deformaciones plásticas de las mezclas AC22S mediante el ensayo en pista de laboratorio a 60°C, empleando el dispositivo pequeño y el procedimiento B en aire, descritos en la norma UNE EN 12697-22. También se determinó el efecto del agua sobre la cohesión de las mezclas bituminosas, mediante el ensayo sensibilidad al agua, de acuerdo con el método UNE EN 12697-12, realizándose la rotura de las correspondientes probetas a una temperatura de 15°C. Los resultados de estos ensayos se indican a continuación en la Tabla 4.

La resistencia a la acción del agua tanto de la mezcla de referencia como la de la mezcla que incorpora caucho es buena, obteniéndose índices de resistencia conservada superiores al 80%. Respecto a la resistencia a las deformaciones plásticas, ambas presentan una buena resistencia, si bien en la mezcla que incorpora caucho todos los parámetros del ensayo de pista son inferiores a los correspondientes a la mezcla de referencia, lo que indica una mejor resistencia a las deformaciones permanentes de la primera.

TIPO DE MEZCLA	AC22S Referencia	AC22S con caucho
Contenido óptimo de ligante, % s/a	4,8	5,3
Polvo de caucho, % s/a	-	1,0
Sensibilidad al agua, UNE EN12697-12		
Resistencia a tracción indirecta al aire, MPa	2,087	2,500
Resistencia a tracción indirecta al agua, MPa	1,695	2,201
Resistencia conservada ITSR, %	81,2	88,0
Pista de laboratorio, UNE EN12697-22 procedimiento B		
Pendiente WTS, mm/1000ciclos	0,053	0,033
Deformación total RD, mm	1,9	0,8
Porcentaje de deformación PRD, %	1,1	1,6

TABLA 4. Resistencia a las deformaciones plásticas y sensibilidad al agua.

3. TRAMO DE PRUEBA

Tomando como base la dosificación realizada en el laboratorio, se procedió a establecer la fórmula de trabajo en la central de fabricación, estableciéndose para la mezcla que incorpora caucho una temperatura de mezclado de 175°C y un tiempo total de mezclado de 100 segundos, para conseguir una buena dispersión y mezclado del polvo de caucho con los demás componentes. Una vez dosificados los áridos calientes en la amasadora se incorporó el polvo de neumático, a continuación el filler y finalmente el ligante.

La central de fabricación utilizada para la fabricación de las mezclas fue una planta discontinua INTRAME, modelo UM-160 (Figura 2), con una producción máxima de 160 t/h,



FIGURA 2. Central de fabricación de mezcla bituminosa.



FIGURA 3. Aspectos de la puesta en obra y del tramo.

provista de 4 tolvas de alimentación en frío y otras 5 de clasificación de áridos en caliente. Dispone de dos silos para polvo mineral recuperado y de aportación. El polvo de caucho se dosificó y se aportó a la mezcla como si se tratase de un filler de aportación.

El tramo de prueba consistió en la aplicación de un refuerzo de 6 cm de mezcla bituminosa tipo AC22S con polvo de caucho, procedente de neumáticos fuera de uso, por vía seca (1% de polvo de caucho de 0-0,6 mm de tamaño nominal) y como control, una mezcla convencional similar, fabricada con betún de penetración tipo B 50/70. Las mezclas bituminosas se fabricaron el día 06 de noviembre de 2008 por la empresa ARAPLASA y se extendieron en la carretera EX-370 de Plasencia a Montehermoso entre los PPKK 12+300 a 12+700. La puesta en obra se realizó, después de un tiempo de maduración de unos 60 minutos (45 min de almacenamiento en camión + 15-20 min de transporte al tajo) mediante una extendedora sobre orugas DYNAPAC DF115C, y la compactación utilizando un equipo compuesto por un compactador de rodillos liso, de 11 toneladas, DYNAPAC, modelo 422 y un compactador de neumáticos DYNAPAC, modelo C271, con una presión de inflado de 8 kg/cm².

En la Figura 3 se muestran vistas de la extendedora, el equipo de compactación, una panorámica general del tramo y la textura de la mezcla.

Según los datos de tráfico correspondientes al año 2007, la intensidad media diaria de tráfico pesado (IMDp) correspondiente al tramo de prueba es de 395 vehículos pesados/día).

3.1. CONTROL DE CALIDAD

Durante la realización del tramo de prueba se tomaron muestras de mezcla bituminosa para determinar composición y características mecánicas. Los resultados de los ensayos de extracción (granulometría y contenido de betún), Marshall, sensibilidad al agua y pista de laboratorio se indican a continuación en las Tablas 5 y 6.

TAMIZ UNE, mm	AC22S Referencia	AC22S con caucho
31,5	100	100
22,4	92	96
16	75	76
8	58	52
2	33	26
0,5	12	11
0,25	8	9
0,063	5,2	6,3
Contenido de ligante, % s/a	4,7	5,2

TABLA 5. Granulometría y contenido de ligante.

Los resultados de los ensayos de control son similares a los obtenidos en la fase de proyecto y las diferencias existentes son atribuibles a los reajustes necesarios realizados en planta para establecer la fórmula de trabajo.

4. CAMPAÑAS DE MEDIDA

Los trabajos llevados a cabo en esta fase estaban encaminados a diseñar el plan de auscultación del tramo de prueba, con objeto de poder comparar las secciones del tramo ejecutadas con y sin polvo de neumático, evaluando las características superficiales del firme, y estudiando la evolución de las mismas con el tiempo.

Se realizaron dos campañas de medida: la primera en enero de 2009 y la segunda en septiembre del mismo año.

TIPO DE MEZCLA	AC22S Referencia	AC22S con caucho
Ensayo Marshall		
Densidad mezcla, g/cm ³	2,387	2,387
Estabilidad, kN	17,9	14,7
Deformación, mm	3,2	2,8
Huecos en la mezcla, %	4,3	4,8
Huecos en áridos, %	15,2	16,3
Sensibilidad al agua UNE EN12797-12		
Resistencia conservada ITSr, %	81	83
Pista de laboratorio, UNE EN12697-22 procedimiento B		
Pendiente WTS, mm/1000 ciclos	0,050	0,086
Deformación total RD, mm	1,1	2,8
Porcentaje de deformación PRD, %	1,9	4,6

TABLA 6. Características de las mezclas AC22S.

En ambas campañas se extrajeron del pavimento, mediante sonda, testigos de 100 mm de diámetro, con los que se realizaron medidas de módulo resiliente y de resistencia a la fatiga, ambos a compresión diametral. Además el tramo de ensayo se caracterizó también mediante medidas de regularidad y textura superficial, con el perfilómetro láser, y de ruido de rodadura, con el equipo CPX.

4.1. MODULO RESILIENTE A TRACCIÓN INDIRECTA

La medida del módulo resiliente (a tracción indirecta) se ha realizado de acuerdo con el procedimiento recogido en la norma UNE- EN 12697-26, anexo C. El ensayo consiste en la aplicación de una carga de compresión diametral a la probeta, midiendo la variación de la longitud de su diámetro horizontal. La carga aplicada es un pulso de fuerza de 124 milisegundos de duración, seguido por un periodo de reposo de 3 segundos. La amplitud de la carga es la necesaria para producir en la probeta un aumento transitorio de 5 µm en la longitud de su diámetro horizontal.

La determinación del módulo resiliente se ha realizado mediante una prensa neumática de la marca COOPER RESEARCH, modelo NU14, contenida en una cámara termostática regulada a 20°C.

TIPO DE MEZCLA	AC22S Referencia	AC22S con caucho
1ª CAMPAÑA		
Densidad, g/cm ³	2,340	2,346
Módulo a 20°C, MPa	3911	3691
2ª CAMPAÑA		
Densidad, g/cm ³	2,358	2,382
Módulo a 20°C, MPa	8276	7948

TABLA 7. Módulos resilientes de las mezclas bituminosas con y sin caucho.

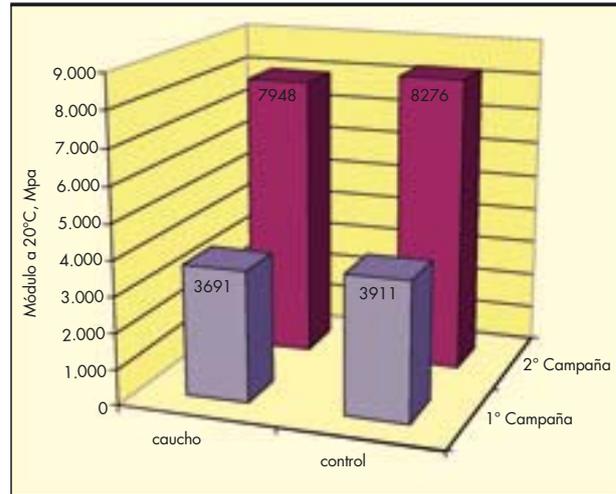


FIGURA 4. Módulos resilientes a 20°C de las mezclas AC22S.

Los resultados de los ensayos realizados en ambas campañas de medida se indican en la Tabla 7 y su representación gráfica, en la Figura 4.

En la Figura 4 se representan los valores medios de los módulos de las mezclas bituminosas con caucho y con betún B 50/70, correspondientes a las dos campañas de medidas.

En ambas campañas de medida, el módulo de la mezcla con polvo de caucho es ligeramente inferior a la de la mezcla de referencia (control) fabricada con betún convencional B 50/70. Es de destacar en estos resultados, el aumento considerable de los módulos experimentado por ambas mezclas en menos de un año de servicio, que es el tiempo transcurrido entre ambas campañas de medida. En este corto periodo de servicio los módulos prácticamente se han duplicado.

Es un hecho conocido que el envejecimiento del ligante y, si existe, la postcompactación experimentada en las mezclas por el tráfico, producen una rigidificación de las mezclas bituminosas, con el consiguiente aumento del módulo; pero entendemos que no es habitual que dicho aumento sea tan elevado.

4.2. FATIGA A TRACCIÓN INDIRECTA

La medida de la resistencia al agrietamiento de la mezcla bituminosa se evalúa mediante su ley de fatiga, que en este trabajo se ha realizado aplicando el procedimiento de tracción indirecta recogido en el anexo E de la norma europea UNE EN 12697-24.

Los ensayos de fatiga según el método indicado consisten en la aplicación de pulsos de carga constante de compresión diametral a la probeta, hasta provocar su fallo. En ellos se determina para cada pulso, la deformación máxima de extensión en el centro de la probeta, correspondiente a la carga de ensayo aplicada. El valor inicial (después de 100 pulsos) de dicha deformación es tomado como referencia para determinar el fallo de la probeta, ya que el ensayo se da por finalizado cuando la deformación aumenta hasta el doble de su valor inicial, lo que equivale a que su módulo resiliente inicial se haya reducido a la mitad.

La ley de fatiga en deformación se obtiene representando los valores de ε_{x, max} y el número de ciclos hasta fallo N_f de cada probeta, en un gráfico doble logarítmico. La recta de regresión de log₁₀(ε_{x, max}) frente a log₁₀(N_f) es la ley de fatiga.

$$\log_{10}(\epsilon_{x, \max}) = d + c \times \log_{10}(N_f)$$

TABLA 8. Resultados del ensayo de fatiga. 1ª campaña.

TIPO DE MEZCLA	DENSIDAD g/cm ³	MÓDULO INICIAL A 20°C, MPa	LEY DE FATIGA		
			c	d	ε ₆
AC22S con caucho	2,340	4291	-0,223	3,115	59
AC22S referencia	2,339	4709	-0,206	2,945	51

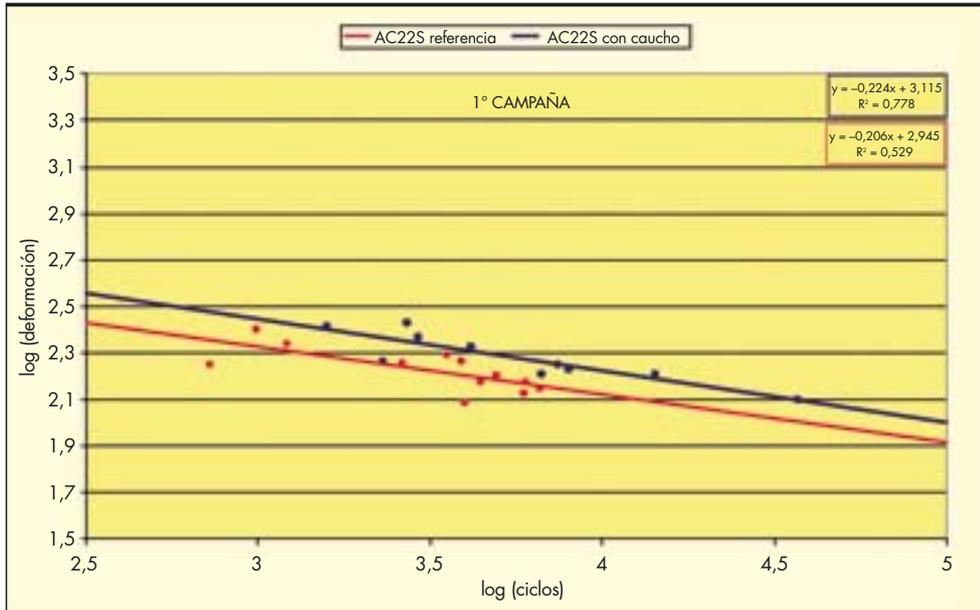


FIGURA 5. Leyes de fatiga en deformación AC22S con y sin caucho. 1ª campaña.

TABLA 9. Resultados del ensayo de fatiga. 2ª campaña.

TIPO DE MEZCLA	DENSIDAD g/cm ³	MÓDULO INICIAL A 20°C, MPa	LEY DE FATIGA		
			c	d	ε ₆
AC22S con caucho	2,340	8113	-0,224	3,011	47
AC22S referencia	2,347	8538	-0,206	2,918	48

Como parámetro para estimar la resistencia al agrietamiento por fatiga, se emplea el valor de la deformación correspondiente a una duración de ensayo de un millón de ciclos.

$$\epsilon_6 = 10^{(d + 6 \times c)}$$

Los ensayos de fatiga sobre las mezclas empleadas en el tramo experimental se realizaron, siguiendo el procedimiento citado, mediante una prensa neumática NU14 de la marca COOPER RESEARCH, contenida en una cámara termostática regulada a 20°C. Se emplearon testigos extraídos del pavimento acondicionados a esta temperatura de ensayo durante 24 horas.

Los resultados de los ensayos realizados se indican a continuación la Tabla 8 para los testigos extraídos en la primera campaña. Las representaciones gráficas de las leyes de fatiga obtenidas se muestran en la Figura 5.

La mezcla AC22S con caucho presenta un valor de ε₆ ligeramente más elevado que la mezcla fabricada con betún B 50/70, lo que denota una resistencia a la fisuración ligeramente superior a la mezcla control; si bien hay que señalar que esta mayor deformación para un millón de ciclos puede

ser debida al menor módulo de la mezcla con caucho respecto a la convencional.

En la Tabla 9 se indican los resultados de los ensayos de fatiga de los testigos de las dos mezclas bituminosas tomados en la segunda campaña, y su representación gráfica en la Figura 6.

Ambas mezclas presentan resistencias a la fisuración por fatiga muy similares. Los módulos iniciales de las dos mezclas AC22S, determinados en este ensayo de fatiga, son sensiblemente superiores a los correspondientes módulos de las mezclas de la primera campaña de medidas, lo que concuerda con el aumento de módulo resiliente señalado en el apartado anterior.

Con objeto de comparar los resultados entre las dos campañas de medida, en la Figura 7 se han representado todos los resultados.

De ellos se deduce que la mezcla con betún convencional presenta, en ambas campañas, resistencias al agrietamiento por fatiga muy similares, mientras que en la mezcla con caucho dicha resistencia ha disminuido ligeramente respecto al resultado de la primera campaña.

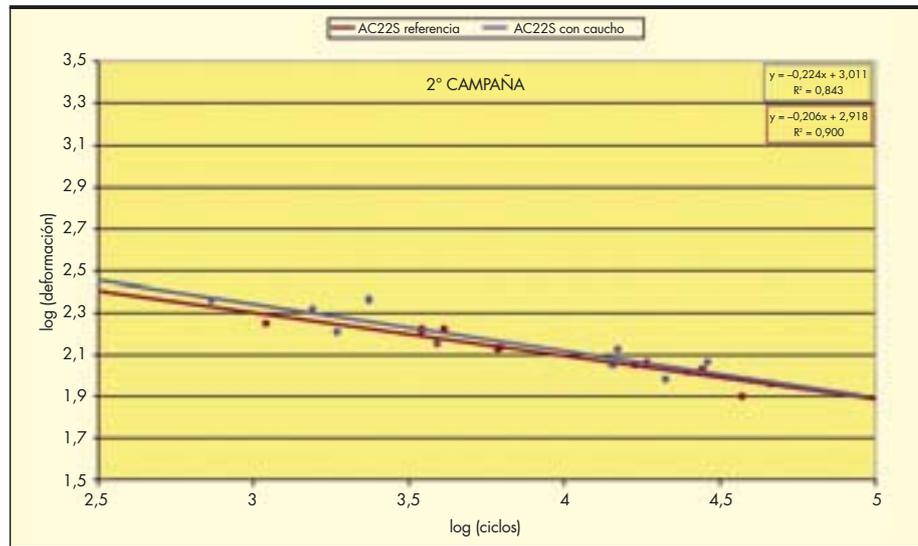


FIGURA 6. Ley de fatiga en deformación AC22S con y sin caucho. 2ª campaña.

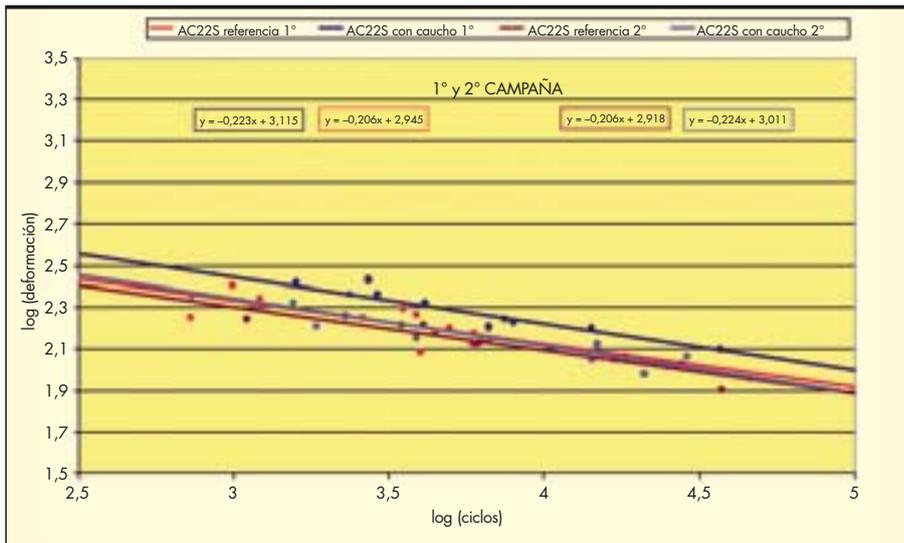


FIGURA 7. Ley de fatiga de las mezclas bituminosas AC22S. 1ª y 2ª campaña.

4.3. REGULARIDAD SUPERFICIAL Y MACROTEXTURA DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS

Las medidas de la regularidad superficial y de la macrotextura del pavimento se han realizado mediante el perfilómetro láser Greenwood Profilograph, del Centro de Estudios del Transporte del CEDEX, que se muestra en la Figura 8.

4.3.1. Regularidad superficial

La regularidad superficial se ha calculado de acuerdo con el procedimiento NLT-330 para el cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI). Los resultados obtenidos en las dos campañas de medidas, realizadas en cada carril y en cada rodada, se indican en las Figuras 9 a 12.

En general, los dos kilómetros de carretera auscultados presentan una regularidad superficial buena, ya que en todos los carriles y rodadas se obtiene que el 100% de los hectómetros presenta un índice de regularidad internacional menor de 2, sensiblemente inferior a la exigencia en refuerzos que es de 3. No se detecta que en el tiempo transcurrido

entre las campañas, se haya modificado este parámetro de medida de la regularidad.



FIGURA 8. Equipo Greenwood Profilograph, perfilómetro láser del CEDEX.

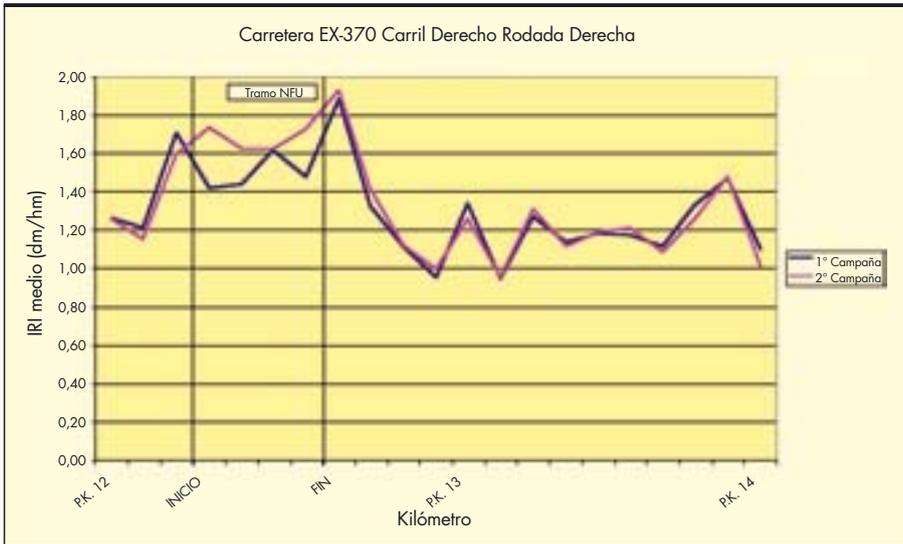


FIGURA 9. IRI carril derecho rodada derecha.

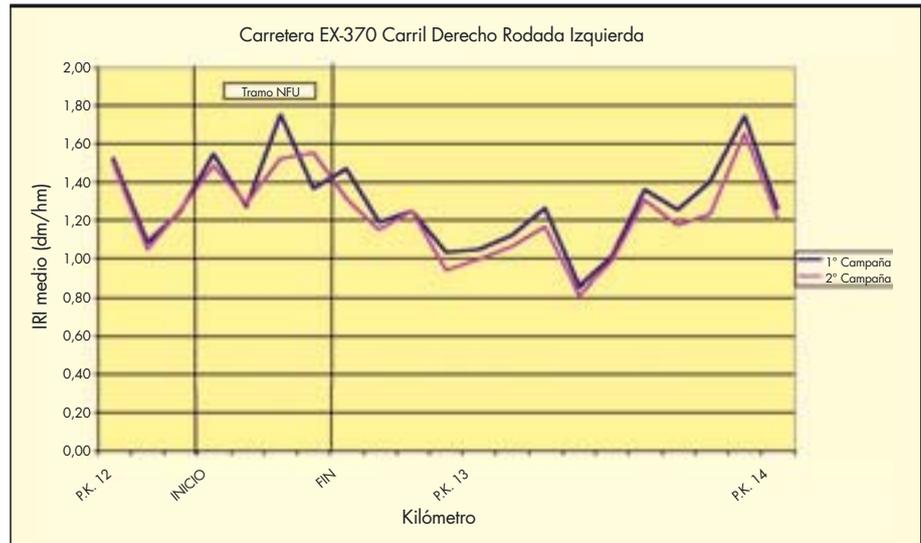


FIGURA 10. IRI carril derecho rodada izquierda.

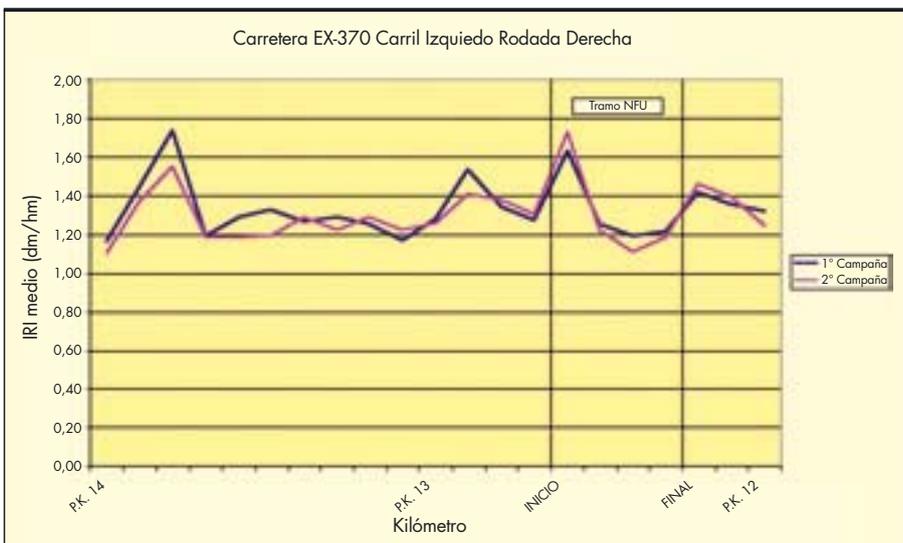


FIGURA 11. IRI carril izquierdo rodada derecha.

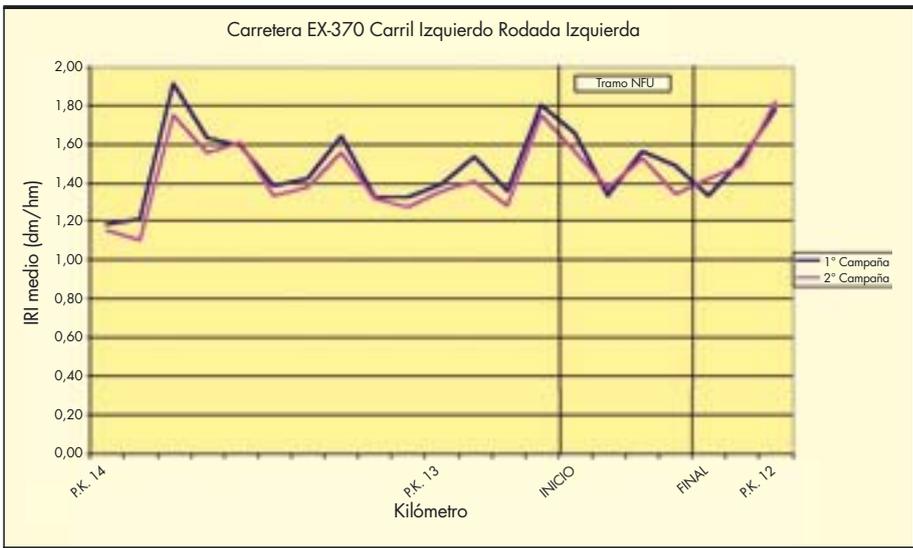


FIGURA 12. IRI carril izquierdo rodada izquierda.

4.3.2. Macrotextura

La medida de la macrotextura se ha determinado mediante la profundidad media del perfil MPD (Mean Profile Depth), definido como la diferencia entre la recta de regresión de los puntos del perfil y una paralela trazada por su punto más alto (ISO 13473). También se ha determinado el ETD (Estimated Texture Depth), mediante la ecuación, establecida en el CEDEX, que correlaciona el perfil con el valor de círculo de arena. Los resultados obtenidos para ambos parámetros en las dos campañas de medida se indican en las Figuras 13 y 14.

Los índices de textura determinados con el perfilómetro (MPD y ETD) son bajos, tanto en la sección con caucho como en la que no lo tiene, lo que pone de manifiesto que ambas mezclas presentan una textura superficial inferior a la que se obtiene habitualmente para este tipo de mezclas semidensas. La textura no se ha modificado sensiblemente entre las dos campañas de medidas, si bien parece que la textura tiende a aumentar en el tramo de NFU y algo más en el carril derecho. Habría que seguir la evolución e inspeccionar el

tramo, ya que el aumento podría deberse a ligeros descarnamientos de la mezcla bituminosa.

4.4. RUIDO DE RODADURA

Los equipos de medición del ruido de rodadura emplean un procedimiento para cuantificar selectivamente este tipo de ruido, lo más cerca posible del contacto neumático-pavimento. El equipo del CEDEX (Figuras 15 y 16) utiliza un remolque que soporta dos cámaras semi-anechoicas independientes, en cuyo interior giran libremente las ruedas de referencia, con objeto de medir, simultáneamente, el ruido de rodadura en las dos rodadas del carril. Junto a cada rueda de referencia van montados dos micrófonos, cuyo diafragma está situado a 35 cm de distancia del centro de simetría de la huella de contacto entre neumático y pavimento.

Las medidas se han realizado a 50 y 80 km/h y el procesamiento de datos para el cálculo de los índices CPX se ha realizado de acuerdo con el proyecto de norma ISO/DIS 11819-2:2008.

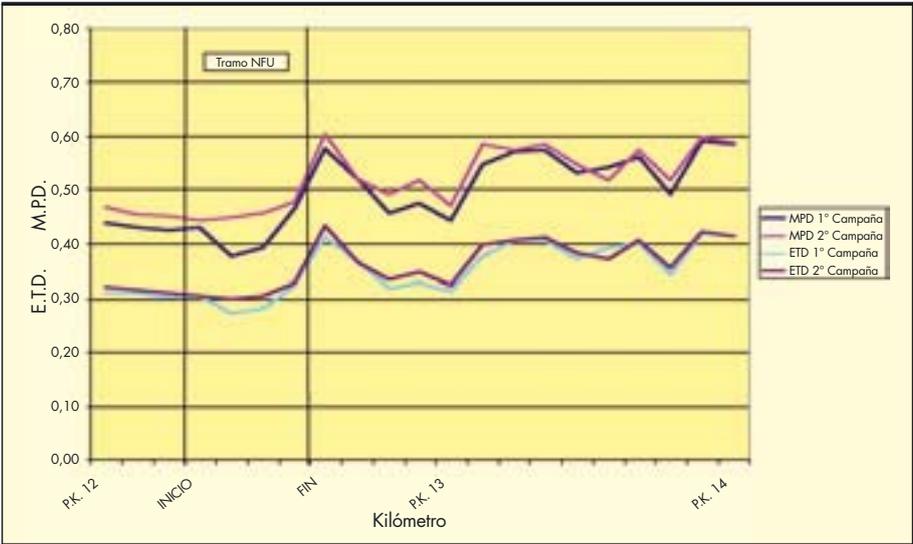


FIGURA 13. MPD Y ETD carril derecho.

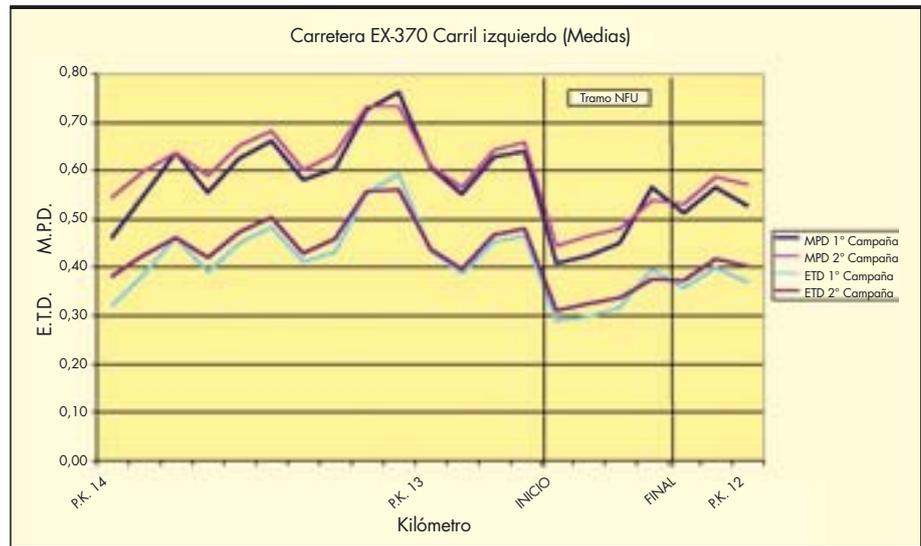


FIGURA 14. MPD Y ETD carril izquierdo.



FIGURA 15. Equipo de medida del CPX del CEDEX.

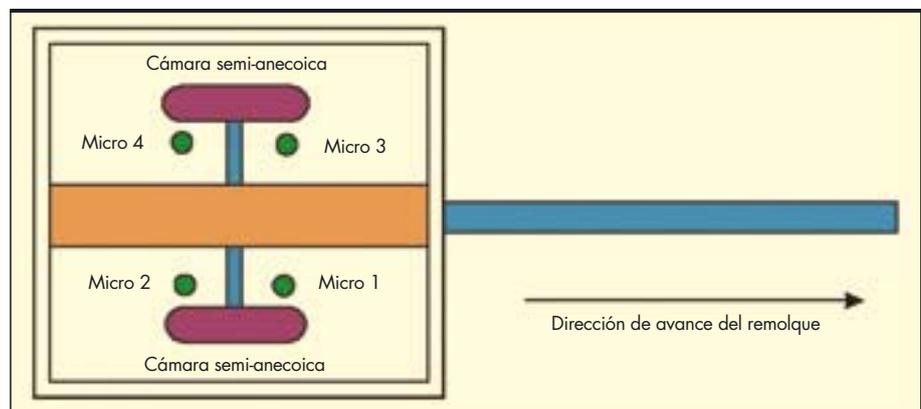


FIGURA 16. Croquis del remolque CPX del CEDEX.

CARRIL	Pk inicial	Pk final	RODADA DERECHA				RODADA IZQUIERDA				SECCIÓN
			CPXI [dB(A)]		Desv. típica		CPXI [dB(A)]		Desv. típica		
			50	80	50	80	50	80	50	80	
1	12,000	12,275	91,4	98,7	0,2	0,5	92	98,9	0,3	0,5	sin caucho
1	12,275	12,630	91,3	98,3	0,6	0,6	91,6	98,8	0,4	0,5	betún-caucho
1	13,000	14,000	90,7	97,9	0,7	0,7	90,7	98,1	0,6	0,6	sin caucho
2	14,000	13,000	90,4	97,6	0,4	0,5	91,6	99,1	0,6	0,6	sin caucho
2	12,630	12,275	90,6	97,7	0,4	0,7	91,8	99,1	0,4	0,4	betún-caucho
2	12,275	12,000	90,4	97,5	0,4	0,5	91,9	99,1	0,3	0,4	sin caucho

TABLA 10. Datos de CPX- 1ª campaña. Fecha de medida: 20 nov 2008.

CARRIL	Pk inicial	Pk final	RODADA DERECHA				RODADA IZQUIERDA				SECCIÓN
			CPXI [dB(A)]		Desv. típica		CPXI [dB(A)]		Desv. típica		
			50	80	50	80	50	80	50	80	
1	12,000	12,275	91,6	98,9	0,4	0,6	91,8	98,8	0,3	0,4	sin caucho
1	12,275	12,630	91,2	98,3	0,5	0,5	91,1	98,2	0,5	0,6	betún-caucho
1	13,000	14,000	91,1	98,4	0,5	0,6	91,1	98,4	0,5	0,5	sin caucho
2	14,000	13,000	91,7	99,2	0,4	0,5	91,9	99,4	0,5	0,6	sin caucho
2	12,630	12,275	91	98,2	0,4	0,6	91,4	98,8	0,3	0,4	betún-caucho
2	12,275	12,000	91,2	98,5	0,4	0,4	91,6	99,1	0,3	0,3	sin caucho

TABLA 11. Datos de CPX- 2ª campaña. Fecha de medida: 8 sept 2009.

En las Tablas 10 y 11 anteriores, se indican los datos de identificación de cada tramo y sus niveles de ruido de rodadura. Estos niveles se dan en forma de índices globales CPXI [dB(A)], para cada rodada y velocidad. En la Figura 17 se muestran gráficamente los valores medios de

los índices globales para la sección con caucho y la sección control.

Los valores de CPX son muy similares entre las secciones con betún convencional y con caucho. No se aprecia una mejora del ruido de rodadura en la mezcla que incorpora caucho.

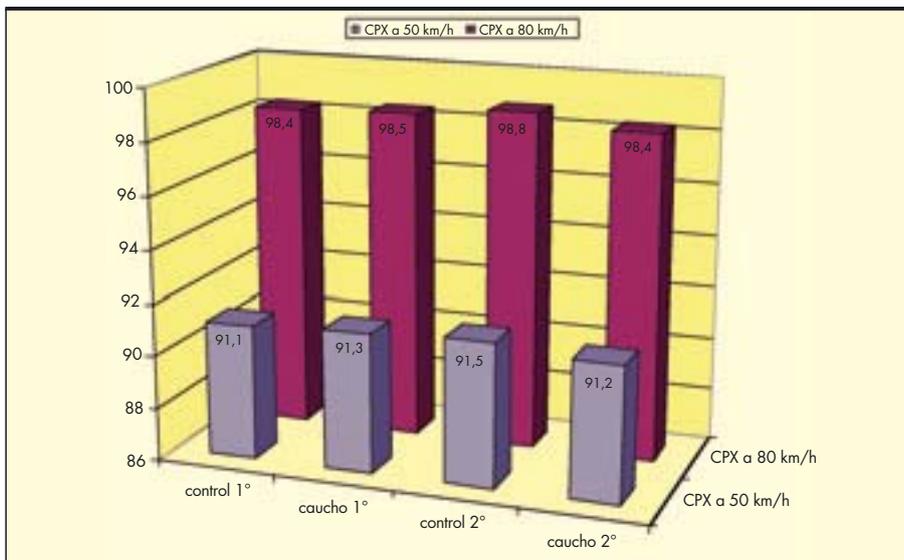


FIGURA 17. Valores medios de CPX en el tramo.

5. CONCLUSIONES

Del trabajo experimental realizado se deducen las siguientes conclusiones:

- La dosificación de una mezcla bituminosa con polvo de caucho incorporado por vía seca puede realizarse mediante los procedimientos habituales empleados en las mezclas bituminosas convencionales, si bien hay que tener en cuenta que es necesario aumentar la temperatura de mezclado en unos 15 a 20°C. Así mismo, se debe determinar el tiempo de maduración de la mezcla, que permita la interacción del caucho con el betún, con el fin de obtener una adecuada compactación y obtener mejores características mecánicas.
- La interacción del caucho con el betún se mejora si se reduce el tamaño de la fracción granulométrica de NFU. Así, con el empleo de polvo con tamaños inferiores a 0,6 mm, los tiempos de maduración son más cortos y efectivos.
- En la central de fabricación, el caucho se puede almacenar y dosificar como si se tratase de un filler de aportación. El proceso de fabricación de la mezcla requiere trabajar a temperaturas más elevadas que las habituales para mezclas convencionales y aumentar el tiempo de mezclado.
- Después de su fabricación las mezclas necesitan de un tiempo de maduración, bien en un silo de almacenamiento o en el propio camión de transporte, antes de realizar su puesta en obra. En nuestro caso, este tiempo fue de aproximadamente una hora.
- Los parámetros Marshall y la resistencia a la acción del agua de la mezcla con caucho incorporado por vía seca son similares a los obtenidos con la mezcla de referencia. La resistencia a las deformaciones plásticas de la mezcla con caucho es mejor que la mezcla convencional de control.
- En las dos campañas de seguimiento realizadas, en enero y septiembre de 2009, el módulo resiliente a 20°C de la mezcla con polvo de caucho es ligeramente inferior al de la mezcla control fabricada con betún convencional B 55/70.
- Se constata un aumento considerable de los módulos de ambas mezclas (con caucho y de referencia) en menos de un año de servicio, que es el tiempo transcurrido entre las dos campañas de medida efectuadas. Este aumento de la rigidificación de las mezclas bituminosas podría atribuirse tanto al envejecimiento del ligante como a la postcompactación experimentada en las mezclas por la acción del tráfico. Sin embargo, no es habitual que dicho aumento sea tan elevado.
- Al inicio de la puesta en servicio del tramo, la mezcla AC22S que incorpora caucho presenta un valor de ϵ_6 ligeramente más elevado que el de la mezcla control fabricada con betún B 55/70. Esto denota una resistencia a la fisuración por fatiga ligeramente superior en la mezcla control; si bien hay que señalar que esta mayor deformación para un millón de ciclos puede ser debida también al menor módulo de la mezcla con caucho respecto a la convencional. En la segunda campaña de medida, ambas mezclas, con y sin caucho, presentan una resistencia al agrietamiento por fatiga muy similar.
- Tanto la mezcla con caucho como la mezcla convencional presentan una regularidad superficial buena, con valores del IRI sensiblemente inferiores a la exigencia recogida en el artículo 542 del PG-3 para este tipo de mezclas.
- Los índices de textura (MPD y ETD) determinados mediante el perfilómetro son bajos, tanto en la sección de mezcla con caucho como en la de mezcla control. Esto pone de manifiesto que ambas mezclas presentan una textura superficial inferior a la que se obtiene habitualmente para este tipo de mezclas semidensas.
- Los valores de CPX en las dos secciones, con mezcla convencional y con caucho, son muy similares, no existiendo diferencias significativas entre ellas, lo que indica que el polvo

de caucho en esta mezcla bituminosa no mejora apreciablemente el nivel de ruido de rodadura.

- Aunque las diferencias de comportamiento entre la mezcla que incorpora polvo de caucho por la vía seca y la mezcla de referencia son poco significativas, el seguimiento del tramo de ensayo a medio plazo es posible que pueda ya indicar mayores variaciones entre las propiedades de ambas mezclas bituminosas.

6. AGRADECIMIENTOS

- Consejería de Economía, Comercio e Innovación - Junta de Extremadura.
- Dirección General de Infraestructuras y Agua - Consejería de Fomento - Junta de Extremadura.
- Construcciones ARAPLASA.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. CEDEX, MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, MINISTERIO DE FOMENTO 2007 "Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas".
2. GONZÁLEZ, DAVID. 1996 "Estudio sobre el diseño y construcción de mezclas bituminosas en caliente con granos de caucho reciclado, empleando husos granulométricos españoles". Tesis doctoral UPC.
3. VÁZQUEZ I RAMONICH, E. Y RUBIO GUZMÁN, B. 1998 "Mezcla bituminosa con polvo de neumáticos. Tramo de ensayo en la carretera B-140". I Congreso Andaluz de Carreteras. Granada.
4. WITOSZEK, S.B., HERNÁNDEZ O.F., BENITO M.C. Y ALONSO F.M. 2004 "Diseño, desarrollo y seguimiento de un aglomerado asfáltico con polvo de caucho, procedente del reciclado de los neumáticos usados, e incorporado por vía seca". VI Congreso Nacional de Firms. León.
5. F.J. VERDÚ, A. CUENCA, J.M. BERENGUER, E. GRIÑAN. 2009 "Utilización de polvo de caucho NFU aportado por vía seca para la fabricación de mezclas bituminosas en caliente para capas de base y antifisuras". IV Jornada Nacional ASEFMA.
6. GALLEGO, J. Y DE LOS SANTOS, L. 2003 "Mezclas bituminosas fabricadas con betunes de alto contenido de caucho. Aplicación al recrecimiento de un pavimento rígido en la A-7". Revista de Obras Públicas, N° 3439, p7-26.
7. PAYÁN DE TEJADA, F.J. 2004 "Empleo de polvo de neumáticos fuera de uso en mezclas de carreteras". IX Jornadas de Conservación de Carreteras. Salamanca.
8. DE LOS SANTOS, L. 2004 "Mezclas bituminosas con betunes de alto contenido de caucho de neumáticos: tecnología, fabricación y comportamiento. Experiencia en la carretera Revilla-Puente Arce, Cantabria". Jornadas Técnicas. Santander.
9. GARCÍA, C., DEL CERRO, J. Y ARGÜELLO, J. 2005 "Incorporación por vía húmeda de polvo de neumáticos usados a betunes convencionales para la fabricación de mezclas bituminosas en caliente". I Jornada Técnica ASEFMA, p 375-387. Madrid.
10. PÉREZ LEPE, A., PÁEZ DUEÑAS, A. 2009 "Experiencias en el empleo de betún modificado con NFU por vía húmeda". IV Jornada Nacional ASEFMA.
11. DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS - MINISTERIO DE FOMENTO 2007. 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)".
12. DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS - MINISTERIO DE FOMENTO 2008. Orden Circular 24/2008 "Sobre el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). Artículos 542 y 543.