

Determinación del contenido de betún y de caucho en las mezclas bituminosas que incorporan polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso

BALTASAR RUBIO GUZMÁN (*) y RAFAEL JIMÉNEZ SÁEZ (*)

RESUMEN El empleo en España del polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso como componente en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente para la construcción de carreteras se ha visto potenciado a nivel oficial en los últimos años, gracias a las diversas publicaciones realizadas por parte de la Administración, encaminadas por un lado a divulgar los conocimientos y la experiencia adquirida, y por otro, a regular sus posibles aplicaciones en obra mediante especificaciones. No obstante, se hace también necesario establecer nuevos métodos de ensayo que permitan un control del contenido de este material en las mezclas bituminosas que lo incorporan, independientemente de la técnica empleada (vía seca o vía húmeda) para su fabricación.

En el presente artículo se describe un procedimiento de ensayo basado en la combinación de los métodos ya normalizados de extracción con disolvente y de combustión, para determinar con suficiente fiabilidad, tanto el contenido de ligante bituminoso soluble como el de caucho, presentes en las mezclas bituminosas.

DETERMINATION OF BITUMEN AND RUBBER CONTENT IN BITUMINOUS MIXES CONTAINING CRUMB TYRE RUBBER

ABSTRACT *In recent years the use of crumb rubber from scrap tyres as a component of hot bituminous mixes for road construction, has been officially promoted by the Public Administration in Spain, by issuing several publications of both informative and normative nature, aimed to spread knowledge and experiences on the subject and also to specify the requirements and regulate the working applications for this material.*

However, it also seems necessary to develop new test methods which allows control of the rubber content in crumb rubber-added mixes, regardless of the process (wet or dry) followed for the mix production.

This article describes a procedure reliable enough to determine both the soluble bituminous binder and the rubber contents in bituminous mixes, based on two combined, previously standardized test methods: binder extraction with solvent and ignition.

Palabras clave: Caucho, Neumático fuera de uso, Mezcla bituminosa, Ligante bituminoso.

Keywords: Crumb rubber, Scrap tyres, Bituminous mixes, Bituminous binder.

1. ANTECEDENTES

Los neumáticos son estructuras toroidales muy complejas elaboradas con mas de 200 componentes, si bien están compuestos básicamente por cauchos naturales y sintéticos, cargas reforzantes (negros de carbono y sílices), antioxidantes, materiales metálicos, textiles y otros ingredientes necesarios para el proceso de vulcanización del caucho, como son el óxido de zinc, el ácido esteárico y el azufre.

En España, en el año 2007, se generaron 342.000 t de neumáticos fuera de uso (NFU) según los datos de la Asociación Europea de Fabricantes de Neumáticos y Artículos de

Caucho, ETRMA. Estos residuos deben recogerse de la forma más económica y eficaz posible mediante un sistema adecuado de gestión, seleccionándolos para ser aprovechados entre las variadas aplicaciones que tienen estos materiales, mantenido los principios ecológicos fundamentales de reducción, reutilización y reciclado, tal como se indica en España en la Ley 10/1998 para el tratamiento de los residuos:

REDUCIR la generación de NFU, aumentando la duración de la vida del neumático sin detrimento de otras prestaciones fundamentales como la adherencia.

REUTILIZAR los neumáticos, aprovechando al máximo todas las posibilidades de alargar su periodo de vida, como el reesculturado de neumáticos para vehículos industriales y el recauchutado, que dota al neumático de una nueva banda de rodadura y le proporciona prácticamente una nueva vida.

(*) Centro de Estudios del Transporte (CEDEX).

RECICLAR, recuperando bien las materias o la energía disponibles en el neumático y utilizándolas en la fabricación de otros productos. Las posibles aplicaciones de reciclado de los NFU son muy variadas. Los neumáticos enteros, sus flancos y bandas de rodamiento, pueden utilizarse como protección de muelles o embarcaciones, en rompeolas, taludes, barreras anti-ruídos, para estabilización de suelos en zonas anegadas, o para controlar la erosión, etc. La trituración de neumáticos, ya sea simplemente mecánica en molinos trituradores, o por medio de métodos criogénicos, genera trozos, gránulos o polvo de diferentes tamaños, según el proceso de trituración y/o molienda empleado. Los trozos se utilizan bien como combustible para cementeras, acerías, centrales eléctricas, industrias cerámicas, etc., o para la obtención posterior de partículas más finas de diferentes granulometrías. Los gránulos se emplean como drenaje en campos de deporte, pistas deportivas, planchas para revestimientos de zonas infantiles, alfombras, etc. Finalmente el polvo de caucho se puede utilizar en la fabricación de mezclas bituminosas de empleo en carreteras.

De entre todas estas aplicaciones de reciclado de los neumáticos fuera de uso, una de las que ofrecen mayor interés es la fabricación de mezclas bituminosas para carreteras, ya que tiene un gran potencial para consumir grandes cantidades de NFU y permite obtener mejoras en el comportamiento de las mezclas.

Aunque la utilización del polvo de caucho, procedente de neumáticos de desecho, en betunes modificados se inició en los años 60, su empleo comenzó a generalizarse en 1985 en Arizona y California. En Europa las primeras pruebas con betún modificado de alta viscosidad con caucho en mezclas drenantes se hicieron en los años 70, especialmente en Bélgica y Francia, pero el desarrollo de los ligantes modificados con polímeros (SBS, EVA, etc.), con los que se obtienen ligantes de elevadas prestaciones, limitaron su empleo.

En España el primer betún modificado con polvo de caucho de NFU, a escala industrial, se desarrolló en el año 1996. La publicación, en el año 2002, del Plan de Neumáticos Fuera de Uso, así como 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, impulsó nuevamente el empleo de polvo de caucho en la fabricación de mezclas bituminosas. Posteriormente tuvo lugar la publicación del 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 para 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, 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, donde se modifican los artículos 542 y 543 referentes a mezclas bituminosas en caliente para adaptarlas a la nueva normativa europea.

El control de calidad en la fabricación de mezclas bituminosas que incorporen polvo de caucho de NFU exige, al igual que en las mezclas convencionales, la determinación del contenido de ligante mediante métodos de extracción con disolventes orgánicos según el procedimiento UNE-EN 12697-1.

Cuando una mezcla bituminosa que contiene caucho se extrae con disolventes, el contenido de ligante soluble que se obtiene corresponde al betún de penetración, al extracto so-

luble del polvo de caucho y, en su caso, a la parte más fina del polvo de caucho que puede pasar a través del papel de filtro, del tamiz del equipo de extracción, o que no se recoge en el vaso colector de la centrifuga.

El polvo de caucho, que es un material vulcanizado y, en consecuencia, insoluble en disolventes, quedará con los áridos y el polvo mineral, y solamente los componentes solubles que se hayan extraído con el disolvente estarán con el betún.

Por tanto, para controlar la fabricación de las mezclas con polvo de caucho es necesario llevar a cabo una calibración previa de la mezcla que se vaya a poner en obra, reproduciendo en laboratorio su composición con la cantidad requerida de polvo de caucho respecto al betún o a la mezcla bituminosa, para obtener la composición definida en la fórmula de trabajo. La determinación del contenido de ligante mediante el procedimiento que se vaya a utilizar en el control, permite calcular un coeficiente de calibración que se puede comprobar posteriormente en amasadas de prueba.

Ante esta problemática que presentan las mezclas con caucho para determinar el contenido de ligante y de polvo de caucho, se ha realizado un estudio para tratar de determinar ambos contenidos en las mezclas que incorporan polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso.

Para ello, se han preparado dos series de mezclas bituminosas con polvo de caucho en el laboratorio. La primera utilizando la denominada vía húmeda, en la que se incorpora el polvo de caucho al betún asfáltico mantenido en agitación y a temperaturas elevadas y posteriormente este ligante se emplea para fabricar la mezcla bituminosa. La segunda mediante la vía seca, que consiste en añadir el polvo de caucho directamente a la mezcla bituminosa junto con los áridos y el betún.

Empleando ambos métodos se han preparado dos tipos de mezclas de uso general, como son las mezclas semidensas y las discontinuas en capa delgada tipo M. Las muestras de polvo de caucho utilizadas corresponden a dos tamaños: inferior a 0,5 mm e inferior a 1 mm, con dos contenidos diferentes de polvo de caucho en las mezclas bituminosas. Una vez fabricadas, se ha determinado en cada una de las mezclas, el contenido de ligante mediante extracción con tricloroetileno según el método UNE-EN 12697-1. Sobre los áridos extraídos se ha determinado la cantidad de materia orgánica presente, aplicando el método de ignición recogido en la norma UNE-EN 12697-39.

Los resultados obtenidos indican que, utilizando estos dos procedimientos normalizados y de uso habitual para determinar el contenido de ligante en mezclas bituminosas (UNE-EN 12697-1 y UNE-EN 12697-39), es posible conocer el contenido de betún asfáltico y de polvo de neumático de una mezcla que incorpore polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso.

2. INTERACCIÓN POLVO DE CAUCHO-LIGANTE Y METODOLOGÍA DE ENSAYO

Como se ha indicado, los neumáticos son estructuras complejas en las que se pueden diferenciar cuatro partes principales: la carcasa, la banda de rodadura, los flancos y los talones. Cada una de estas partes tiene distintas misiones y por tanto están fabricadas con cauchos de diferente naturaleza (NR, SBR, BR, EPDM, etc.) y con distintas formulaciones. Aunque cada fabricante utiliza diferentes mezclas de caucho para cada tipo de neumático, se puede establecer de forma general que la composición media de un neumático es la mostrada en la tabla 1.

MATERIAL	Turismo/Servicios	Camión
Caucho	48	45
Negro de carbono y sílice	22	22
Metal	15	25
Textil	5	-
Óxido de cinc	1	2
Azufre	1	1
Aditivos	8	5

TABLA 1. Composición media de los neumáticos.

En la tabla 1 se distingue entre los neumáticos de turismo y de camión por su distinto contenido en caucho, pero además se diferencian por las proporciones relativas de caucho natural y sintético, que afecta a las propiedades finales del producto. En los neumáticos de turismo el contenido de caucho natural es del orden del 65% del caucho total, mientras que en los de camión es del 72% aproximadamente.

El polvo de caucho reciclado se obtiene triturando por medios mecánicos los neumáticos enteros hasta el tamaño deseado y separando después los metales y tejidos que puedan incorporar. Los elementos metálicos se separan magnéticamente y los textiles se recuperan mediante equipos separadores de aire. Posteriormente, el material se somete a un proceso de granulado o molienda hasta reducirlo al tamaño deseado, tal como se indica en el esquema de la figura 1. La molienda se puede hacer por procedimientos mecánicos o criogénicos.

La forma de trituración, la granulometría de las partículas y el contenido remanente de contaminantes metálicos y textiles son factores que influyen en las propiedades del polvo de caucho obtenido.

En España, para su utilización en mezclas bituminosas, se exige que el caucho reciclado esté en forma de partículas finas de tamaños inferiores a 1 mm. Por tanto el polvo de caucho está constituido por partículas finas de diferentes mezclas vulcanizadas de caucho natural y cauchos sintéticos de tamaños inferiores a 1 mm. Durante la vulcanización, las cadenas moleculares del caucho se unen entre sí mediante puentes de azufre, dando lugar a una estructura reticulada. Dicha estructura tiene una baja densidad de entrecruzamiento, ya que sólo uno de cada doscientos átomos de carbono interviene en la formación de un enlace con otro átomo de una cadena molecular adyacente, lo que proporciona la gran capacidad de deformación que tienen los cauchos vulcanizados.

Los mecanismos por los que el polvo de caucho modifica las propiedades de los betunes asfálticos no se conocen perfectamente, debido a la elevada complejidad de ambos materiales. No obstante, se acepta por parte de la mayoría de los investigadores que, cuando el polvo de caucho se incorpora a un betún a elevada temperatura (vía húmeda), las partículas de caucho absorben los componentes más ligeros del betún, produciéndose en ellas un hinchamiento de hasta dos o tres veces su volumen original (2). El hinchamiento hace que disminuya la distancia entre partículas y el ligante se hace más viscoso, dando lugar a un material gelificado. Este fenómeno se suele denominar maduración.

Sin embargo se ha comprobado que el hinchamiento es insuficiente para explicar los aumentos de la viscosidad (3) experimentados y que debe de producirse además un cambio en la naturaleza de los componentes. Estudios posteriores (4-6) han atribuido dicho cambio a la degradación del polvo de caucho, mediante reacciones de despolimerización y desvulcanización producidas por efecto de la temperatura y del cizallamiento durante el proceso de fabricación o durante el periodo de almacenamiento a elevadas temperaturas.

Industrialmente el proceso de fabricación se controla mediante la medida de la viscosidad del ligante. Las características del producto resultante de la mezcla de betún y polvo



FIGURA 1. Esquema de la obtención del polvo de caucho.

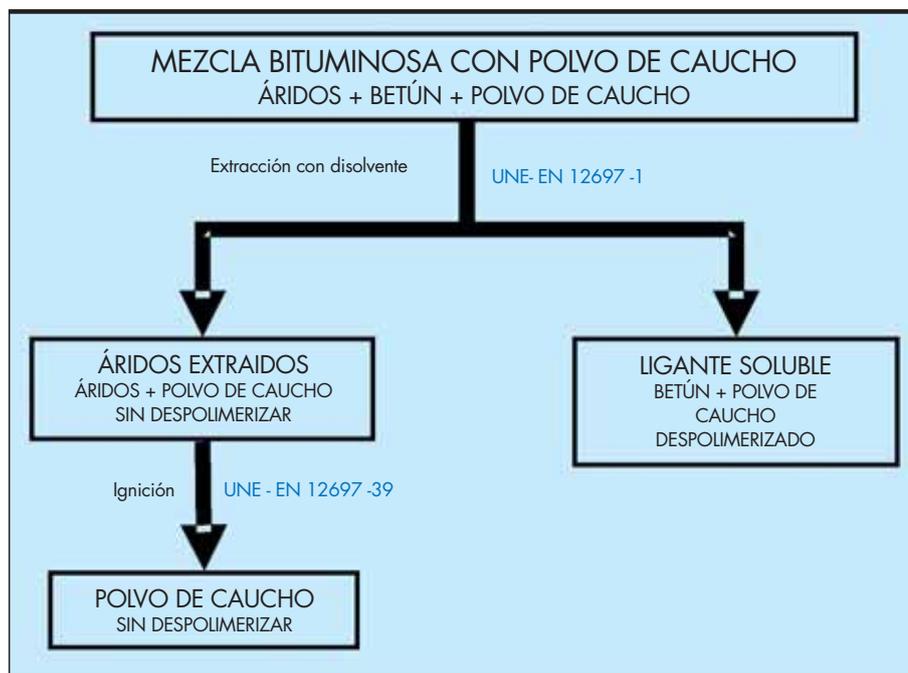


FIGURA 2. Esquema seguido para la determinación de los contenidos de ligante y de polvo de caucho.

de caucho dependen de la naturaleza y proporción de ambos componentes, del tamaño de las partículas de caucho (7) y del tiempo y la temperatura de mezclado. Las temperaturas elevadas, los tiempos de mezclado largos y las partículas de caucho más pequeñas son los factores que favorecen unas interacciones betún- caucho mayores y/o más rápidas.

En la vía seca, el polvo de caucho actúa en parte como árido, aunque las partículas más finas interaccionan también con el betún, tal como se ha descrito en los párrafos anteriores, modificando sus propiedades. El aumento de la temperatura y del tiempo de mezclado en las instalaciones de fabricación de mezcla bituminosa, así como el periodo de almacenamiento en silo o en camión que debe establecerse antes de la compactación de las mezclas bituminosas, tienen por objeto favorecer la interacción betún-polvo de caucho y evitar que el hinchamiento no continúe después de la puesta en obra.

Según este mecanismo de interacción, el polvo de neumático permanece como una fase sólida dispersa en el betún y únicamente el porcentaje de caucho despolimerizado y/o desvulcanizado se habría solubilizado en el betún. Ello significa que mediante el empleo de un disolvente se podrían obtener el betún y el caucho degradado procedentes de una mezcla bituminosa con caucho, mientras que la mayor parte del polvo de caucho quedaría junto con los áridos.

Por ello, se podría determinar tanto el contenido de betún como el porcentaje de polvo de caucho de una mezcla bituminosa: El primero mediante extracción con tricloroetileno según el método UNE-EN 12697-1, y para el contenido de polvo de caucho, aplicando sobre los áridos obtenidos de la extracción el método de ignición recogido en la norma UNE-EN 12697-39, siempre que se pudiese evaluar el porcentaje de caucho degradado para hacer las correcciones necesarias. En el esquema de la figura 2 se muestra el procedimiento aplicado en este estudio, con indicación de los componentes que se obtendrían en cada paso.

En base a este procedimiento se elaboró un plan de trabajo en el que se prepararon en el laboratorio distintas mezclas bituminosas con polvo de caucho, tratando de abarcar

las experiencias realizadas en nuestro país y las aplicaciones que contempla nuestra normativa.

Se han estudiado las mezclas semidensas y las discontinuas tipo M porque, en los últimos años, la mayoría de las mezclas que se han aplicado en España corresponde a estos tipos. Para fabricar dichas mezclas se ha utilizado tanto la vía húmeda como la vía seca.

Respecto a las mezclas fabricadas por vía húmeda, la O.C. 21/2007 recoge el uso de tres tipos de betunes-caucho según los niveles de incorporación de polvo de caucho. Cuando la cantidad de caucho añadido al betún es baja, generalmente inferior al 8%, el ligante se denomina betún mejorado con caucho (BC). Si el porcentaje de caucho incorporado es moderado (generalmente entre 10 y 18%), se denomina betún modificado con caucho (BMC). Si el porcentaje de caucho es elevado (18 - 22%), el ligante presenta una elevada viscosidad y se denomina betún modificado de alta viscosidad con caucho (BMAVC). De estos tres tipos de ligante, en el presente trabajo se han empleado un betún modificado con un 12% de polvo de caucho y un betún de alta viscosidad con un 20% de polvo de caucho. No se ha ensayado ningún betún mejorado con caucho por la baja proporción de polvo empleado en su fabricación. Para preparar ambos tipos de ligante se han utilizado dos polvos de caucho de tamaños inferiores a 0,5 mm y 1 mm, puesto que en la citada orden circular se establece que el tamaño de partícula del polvo de caucho debe ser inferior a 1mm.

Las mezclas fabricadas por vía seca han correspondido también a los tipos S y M, con polvos de caucho de tamaños máximos 0,5 y 1 mm añadidos en porcentajes del 0,5 y 1% sobre mezcla bituminosa, por ser éstos los contenidos más empleados en nuestras obras de carreteras.

Los ligantes fabricados por vía húmeda se prepararon en el laboratorio inmediatamente antes de su empleo, en cantidad suficiente para todas las muestras de mezcla previstas. De cada tipo de mezcla bituminosa se han fabricado muestras por duplicado de 1200 gramos, empleándose la totalidad de la muestra para hacer los ensayos pertinentes y así evitar los errores debidos al cuarteo o división de la mezcla.

	B 60/70	Polvo de NFU 0,5 mm	Polvo de NFU 1,0 mm
BC 1	88	12	-
BC 2	80	20	-
BC 3	88	-	12
BC 4	80	-	20

TABLA 2. Composición de los betunes-caucho (% en masa).

3. MATERIALES

De acuerdo con los objetivos del trabajo, se han seleccionado para la realización de este estudio los materiales que se indican a continuación.

3.1. BETUNES

En este trabajo se ha utilizado un betún de penetración tipo B 60/70 de uso generalizado en nuestro país en la fabricación de mezclas bituminosas.

3.2. BETUNES CON CAUCHO

Para la fabricación de mezclas bituminosas con caucho mediante la técnica de la vía húmeda se han empleado cuatro betunes modificados con polvo de caucho. Todos han sido preparados en laboratorio tomando como base el betún B 60/70 antes referido y dos tipos de polvo de caucho, con tamaños inferiores a 0,5 y 1,0 mm respectivamente. La composición de estos ligantes, en porcentaje en masa de cada componente, se indica en la tabla 2.

Los betunes con caucho se han fabricado incorporando el polvo de caucho sobre el betún caliente a 180°C en constante agitación durante un periodo de tiempo de 60 minutos.

3.3. ÁRIDOS

Los áridos empleados en la realización de este trabajo proceden del machaqueo de grava natural de naturaleza silico-calcárea, procedente de la gravera de Velilla de San Antonio, en Madrid.

3.4. POLVO MINERAL

En las mezclas tipo S12 se ha utilizado como polvo mineral el procedente de los propios áridos, y en las mezclas tipo M10 se ha utilizado como polvo un cemento tipo CEM II/B-M 32,5.

3.5. MEZCLAS BITUMINOSAS

Con los materiales básicos indicados anteriormente se han estudiado las composiciones de áridos para su ajuste a los husos de mezclas tipo semidenso S12, y discontinuas en capa delgada tipo M10, de uso habitual en nuestro país. Las mezclas bituminosas se han fabricado con los ligantes por vía húmeda señalados anteriormente, y por vía seca incorporando el polvo de neumático directamente a la mezcla bituminosa durante el proceso de envuelta. En las mezclas tipo S12 por vía húmeda se ha empleado un 5,2% de betún-caucho sobre áridos y en las de tipo M10 un 5,5%, por ser éstos los contenidos más usuales en este tipo de mezclas. Las mezclas bituminosas por vía seca se han fabricado con los mismos porcentajes de betún B 60/70, siendo el 0,5% y 1% los porcentajes de polvo de caucho sobre mezcla empleados.

En las tablas 3 y 4 se relacionan las mezclas fabricadas, indicando los ligantes utilizados, así como el contenido de ligante y el porcentaje de polvo de caucho incorporado a las mezclas.

REF.	MEZCLA	LIGANTE	LIGANTE s/ árido,%	NFU 0,5 mm s/mezcla, %	NFU 1,0 mm s/mezcla, %
SH1	S12	BC 1	5,2	0,6	-
SH2	S12	BC 2	5,2	1,0	-
SH3	S12	BC 3	5,2	-	0,6
SH4	S12	BC 4	5,2	-	1,0
MH1	M10	BC 1	5,5	0,6	-
MH2	M10	BC 2	5,5	1,0	-
MH3	M10	BC 3	5,5	-	0,6
MH4	M10	BC 4	5,5	-	1,0

TABLA 3. Composición de las mezclas bituminosas fabricadas por vía húmeda.

REF.	MEZCLA	LIGANTE	LIGANTE s/ árido,%	NFU 0,5 mm s/mezcla, %	NFU 1,0 mm s/mezcla, %
SS1	S12	B 60/70	5,2	0,5	-
SS2	S12	B 60/70	5,2	1	-
SS3	S12	B 60/70	5,2	-	0,5
SS4	S12	B 60/70	5,2	-	1
MS1	M10	B 60/70	5,5	0,5	-
MS2	M10	B 60/70	5,5	1	-
MS3	M10	B 60/70	5,5	-	0,5
MS4	M10	B 60/70	5,5	-	1

TABLA 4. Composición de las mezclas bituminosas fabricadas por vía seca.

REF. COMPOSICIÓN	S 12 vía húmeda				M 10 vía húmeda			
	SH1	SH2	SH3	SH4	MH1	MH2	MH3	MH4
BETUN ,% s/a REAL	4,58	4,16	4,58	4,16	4,84	4,40	4,84	4,40
BETUN ,% s/m REAL	4,35	3,95	4,35	3,95	4,59	4,17	4,59	4,17
CAUCHO,% s/a REAL	0,62	1,04	0,62	1,04	0,66	1,10	0,66	1,10
CAUCHO,% s/m REAL	0,59	0,99	0,59	0,99	0,63	1,04	0,63	1,04
B+C ,% s/a REAL	5,20	5,20	5,20	5,20	5,46	5,44	5,46	5,44
B+C ,% s/m REAL	4,94	4,94	4,94	4,94	5,21	5,21	5,21	5,21
BETUN ,% s/m determinado	4,44	4,29	4,43	4,09	4,60	4,40	5,03	4,25
valor individual	4,48	4,21	4,27	4,04	4,60	4,37	5,02	4,22
valor individual	4,40	4,37	4,59	4,14	4,60	4,43	5,03	4,27
BETUN s/m, diferencias	-0,09	-0,34	-0,08	-0,14	-0,01	-0,23	-0,44	-0,07
CAUCHO,% s/a extraído	0,70	0,77	0,70	0,96	0,54	0,96	0,75	1,04
valor individual	0,63	0,85	0,63	0,97	0,47	0,94	0,76	0,96
valor individual	0,76	0,69	0,77	0,94	0,60	0,97	0,74	1,11
CAUCHO s/m, diferencias	-0,07	0,25	-0,08	0,07	0,11	0,13	-0,09	0,05
CAUCHO,% s/m determinado	0,67	0,74	0,67	0,92	0,51	0,91	0,71	0,99
B+C,% s/m determinado	5,11	5,03	5,10	5,01	5,11	5,31	5,74	5,24

TABLA 5. Resultados de las mezclas bituminosas fabricadas por vía húmeda.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con las mezclas fabricadas en el laboratorio, según las condiciones descritas en el apartado anterior, se ha procedido a determinar los contenidos de ligante soluble y de polvo de caucho de acuerdo con el procedimiento del esquema de la figura 2. En primer lugar se comentan los resultados de las mezclas fabricadas por vía húmeda y, a continuación, las fabricadas por la vía seca.

4.1. VÍA HÚMEDA

Se recogen en la tabla 5 los resultados obtenidos para las mezclas fabricadas mediante vía húmeda. Los valores indicados son la media de dos determinaciones. Con objeto de fa-

cilitar la comparación, en la parte superior de esta tabla se indican los contenidos reales de betún y de caucho de cada mezcla, y en la parte inferior los resultados obtenidos en las determinaciones realizadas en este estudio.

En las mezclas fabricadas por vía húmeda, los contenidos de ligante soluble de todas las mezclas, determinados mediante extracción con tricloroetileno según el método UNE-EN 12697-1, son ligeramente superiores a los contenidos de betún realmente empleados en la fabricación de la mezcla (ver figura 3), lo que pone de manifiesto que una pequeña cantidad de polvo de caucho se ha extraído con el disolvente. El tamaño del polvo incorporado al betún no parece tener una influencia significativa en los valores obtenidos.

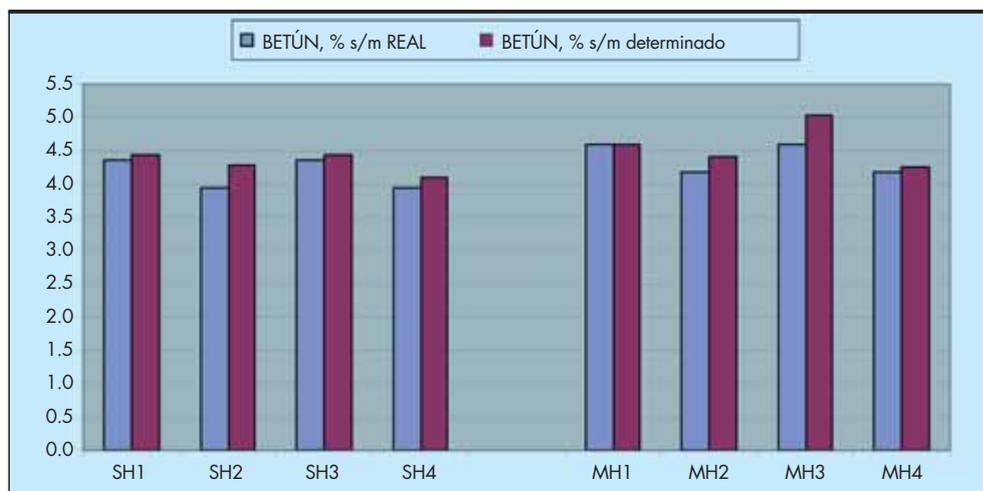


FIGURA 3. Contenido de betún de las mezclas fabricadas por vía húmeda.

Para verificar si este aumento del contenido de ligante soluble se debe sólo a los componentes solubles en tricloroetileno extraíbles del polvo de caucho, o también al caucho despolimerizado durante la fabricación del ligante por vía húmeda, tal como se indica en la bibliografía, se ha determinado la fracción soluble tanto del polvo de caucho como de los dos ligantes betún-caucho. Para ello se ha introducido un gramo de cada uno de estos materiales en tricloroetileno y después de mantener las muestras unas 18 horas en contacto con el disolvente (tiempo equivalente al que se mantiene la mezcla bituminosa en tricloroetileno para determinar el contenido de ligante soluble) se ha determinado la cantidad de material soluble, de forma similar al método de la membrana filtrante recogido en la norma NLT-130.

Los resultados de materia soluble (*S*) obtenidos se muestran en la tabla 6. En ella se han incluido también los porcentajes de polvo de caucho extraíble (*E*) necesarios para obtener estos resultados de solubilidad *S*, conociendo los porcentajes de betún (prácticamente 100% soluble) y de caucho presentes en las muestras. Dichos porcentajes *E* se han calculado mediante la expresión:

$$S = b + \left(c \times \frac{E}{100} \right)$$

de donde:

$$E = \frac{S - b}{c} 100$$

siendo:

E: solubilidad obtenida del polvo de caucho (%).

S: solubilidad total obtenida (%).

b: contenido real de betún en la muestra (%).

c: contenido real de polvo de caucho en la muestra (%).

	solubilidad en tricloroetileno S,%	Polvo de caucho extraíble E,%
Polvo de caucho	5,5	5,5
Betún-caucho (88/12), BC1	89,8	14,8
Betún-caucho (80/20), BC2	84,5	27,7

TABLA 6. Resultados de solubilidad del polvo de caucho y de los betunes-caucho.

De estos resultados se deduce que, si se ensaya aisladamente, el polvo de caucho tiene un 5,5% de material extraíble en tricloroetileno, posiblemente debido a los plastificantes, antioxidantes, resinas y otros componentes solubles, mientras que los dos ligantes betún-caucho presentan una solubilidad que supone una cantidad de material extraíble del caucho muy superior a este 5,5%. Esto demuestra que una parte de polvo de caucho se ha despolimerizado por la acción mecánica y de las elevadas temperaturas durante el proceso de mezclado con el betún, haciéndose más soluble.

Los contenidos de polvo de caucho determinados experimentalmente mediante el método de ignición recogido en la norma UNE-EN 12697-39 sobre los áridos extraídos, son similares a los realmente empleados en la fabricación de las mezclas, siendo las diferencias absolutas entre ellos inferiores al 0,1%, a excepción de la mezcla SH2, donde es considerablemente mayor, tal como se muestra en la figura 4.

Además, estas diferencias encontradas entre porcentajes reales y experimentales son tanto positivas (contenido real > contenido experimental) como negativas, aunque predominan las primeras. Esto indica que tales diferencias son más bien asociables al propio error experimental del método y no a un factor presente en todos los casos, cuya influencia daría lugar a diferencias sistemáticas siempre en un mismo sentido. Dicho factor sería la despolimerización del caucho, que provocaría disminuciones en los contenidos experimentales de caucho con respecto a los contenidos reales, al contrario de lo observado anteriormente con los contenidos de betún. Dado que los contenidos de caucho sobre mezcla son valores mucho más bajos que los de betún sobre mezcla, parece lógico que el error asociado al ensayo tenga más peso que la despolimerización y aquél se haga más patente en las determinaciones del contenido de caucho, dando lugar a diferencias en ambos sentidos.

Para verificar si queda polvo de caucho en el "filler" extraído, se ha determinado, mediante calcinación en mufla a 550°C, el contenido de materia orgánica de los "filleres" recuperados de las mezclas bituminosas, obteniéndose en todos ellos un contenido inferior al 1%, lo que significa que prácticamente todo el polvo de caucho queda con los áridos.

Si se comparan los contenidos reales de betún-caucho de las mezclas fabricadas (B+C, % s/m real) con los obtenidos como suma del betún y del caucho determinados mediante el procedimiento descrito, se obtienen resultados similares (figura 5), si bien en general se observa que el contenido de li-

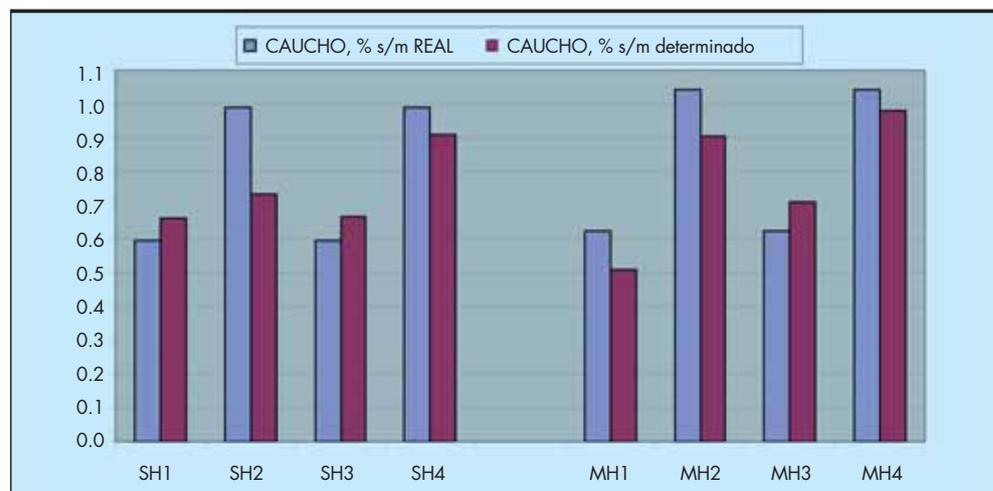


FIGURA 4. Contenido de polvo de caucho en las mezclas fabricadas por vía húmeda.

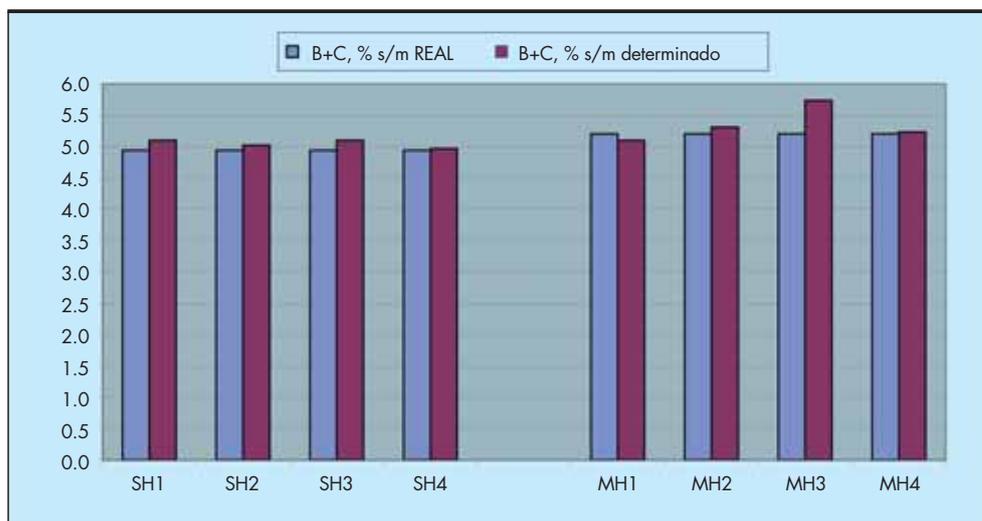


FIGURA 5. Contenido de ligante betún - caucho de las mezclas fabricadas por vía húmeda.

gante betún+caucho determinado suele ser ligeramente superior al real, del orden de una décima de punto.

En consecuencia se entiende que el método descrito permite determinar el contenido de ligante (betún y polvo de caucho) con una razonable exactitud, para que pueda utilizarse como procedimiento de control de las mezclas fabricadas con ligantes betún-caucho.

4.2. VÍA SECA

Los resultados obtenidos de las mezclas fabricadas por vía seca se recogen en la tabla 7. Con objeto de facilitar la comparación, se indican también en la parte superior de esta ta-

bla los contenidos reales de betún y de caucho de cada mezcla, y en la parte inferior los resultados obtenidos en las determinaciones realizadas en este estudio.

De estos resultados se deduce que los contenidos de betún determinados por extracción con tricloroetileno son similares a los contenidos reales (figura 6), existiendo diferencias tanto positivas como negativas, por lo que no puede concluirse que se haya despolimerizado una parte del caucho, como ocurre con la vía húmeda.

Los contenidos de polvo de caucho determinados experimentalmente mediante el método de ignición sobre los áridos extraídos, son similares a los realmente empleados en la

COMPOSICIÓN	S 12 vía seca				M 10 vía seca			
	SS1	SS2	SS3	SS4	MS1	MS2	MS3	MS4
BETUN ,%s/a REAL	5.20	5.20	5.20	5.20	5.50	5.50	5.50	5.50
BETUN ,%s/m REAL	4.92	4.89	4.92	4.89	5.19	5.16	5.19	5.16
CAUCHO,% s/a REAL	0.53	1.05	0.53	1.05	0.53	1.05	0.53	1.05
CAUCHO,% s/m REAL	0.50	0.99	0.50	0.99	0.50	0.99	0.50	0.99
B+C ,%s/a REAL	5.73	6.25	5.73	6.25	6.03	6.55	6.03	6.55
B+C ,%s/m REAL	5.41	5.88	5.41	5.88	5.68	6.15	5.68	6.15
BETUN ,%s/m determinado	4.81	4.95	4.86	4.90	5.24	5.30	5.17	5.24
valor individual	4.79	4.93	4.87	4.84	5.37	5.30	5.13	5.25
valor individual	4.83	4.96	4.85	4.95	5.10	6.17	5.21	5.23
BETUN s/m, diferencias	0.11	-0.05	0.06	0.00	-0.05	-0.14	0.02	-0.08
CAUCHO,% s/a extraídos	0.50	0.97	0.59	1.09	0.68	0.84	0.57	1.03
valor individual	0.51	0.99	0.66	1.01	0.59	0.81	0.63	1.04
valor individual	0.48	0.95	0.52	1.16	0.77	0.87	0.50	1.02
CAUCHO s/m, diferencias	0.03	0.07	-0.06	-0.03	-0.15	0.20	-0.04	0.02
CAUCHO,% s/m determinado	0,47	0,91	0,56	1,02	0,64	0,79	0,53	0,97
B+C,%s/m determinado	5.28	5.86	5.42	5.92	5.88	6.09	5.70	6.21

TABLA 7. Resultados de las mezclas bituminosas fabricadas por vía seca.

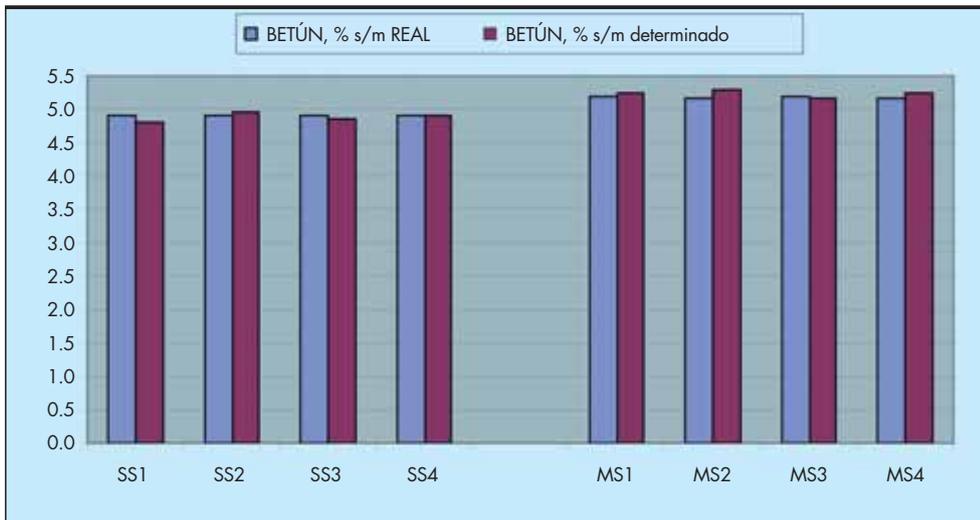


FIGURA 6. Contenido de betún en las mezclas fabricadas por vía seca.

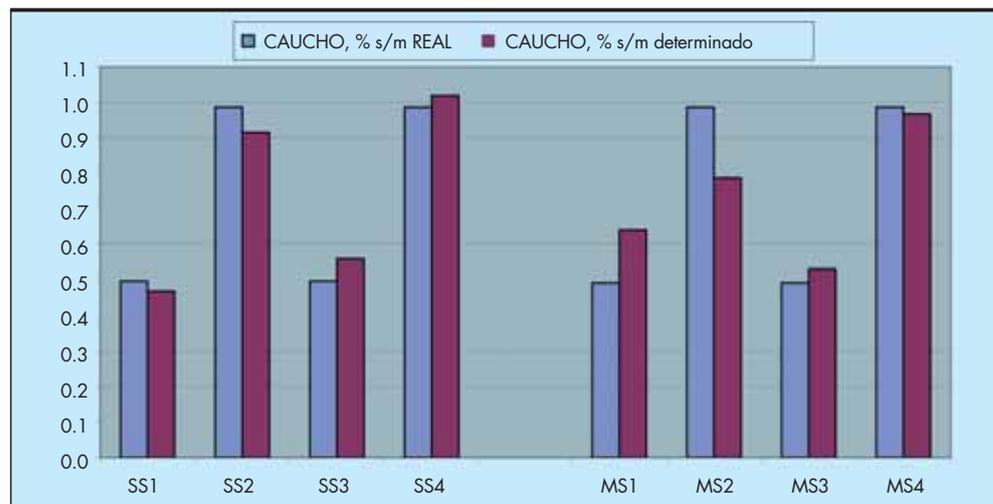


FIGURA 7. Contenido de polvo de caucho en las mezclas fabricadas por vía seca.

fabricación de las mezclas, siendo las diferencias absolutas entre ellos inferiores al 0,1%, a excepción de las mezclas MS1 y MS2, donde son superiores al valor citado pero inferiores al 0,2%, tal como se muestra en la figura 7. Nuevamente las diferencias entre los contenidos de polvo de caucho reales y determinados son tanto positivas como negativas, por lo que no puede asegurarse que se haya producido despolimerización del caucho en la vía seca.

En definitiva, puede afirmarse que el procedimiento descrito permite determinar el contenido de betún y de polvo de caucho con una razonable exactitud para que pueda utilizarse como procedimiento de control de las mezclas que incorporen polvo de caucho mediante la vía seca.

5. CONCLUSIONES

Como resultado del estudio realizado en las determinaciones del contenido de betún y de caucho en las mezclas bituminosas que incorporan polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso, pueden establecerse las siguientes conclusiones:

1. El método de extracción con tricloroetileno descrito en la norma UNE-EN 12697-1, aplicado a una mezcla bitumi-

nosa que incorpore polvo de caucho, sirve para determinar el contenido de material soluble de la mezcla bituminosa.

2. En las mezclas fabricadas por vía húmeda, los contenidos de material soluble determinados mediante este método, son ligeramente superiores a los contenidos de betún realmente empleados en la fabricación de las mezclas. Ensayos complementarios han puesto de manifiesto que una pequeña cantidad de polvo de caucho se extrae con el disolvente. Dicha cantidad se debe a las materias que el propio disolvente extrae del caucho (plastificantes, antioxidantes y otros componentes), así como al caucho despolimerizado, que no está reticulado y es soluble en tricloroetileno.
3. En las mezclas fabricadas por vía seca, los contenidos de material soluble determinados por extracción con tricloroetileno son similares a los contenidos reales de betún, sin poderse concluir que se haya despolimerizado una parte del caucho, como ocurre con la vía húmeda.
4. El tamaño del polvo de caucho incorporado, bien al betún en la vía húmeda, como a la mezcla bituminosa en la

vía seca, no parece tener una influencia significativa en los valores obtenidos.

5. Los contenidos de polvo de caucho determinados experimentalmente mediante el método de ignición, recogido en la norma UNE-EN 12697-39, aplicándolo sobre los áridos previamente extraídos con tricloroetileno de las mezclas bituminosas con caucho, son similares a los realmente empleados en la fabricación de las mezclas, preparadas tanto por vía húmeda como por vía seca.
6. En definitiva, se puede determinar con una buena aproximación el contenido de betún y el porcentaje de polvo de caucho de una mezcla bituminosa que incorpore polvo de caucho; el primero mediante extracción con tricloroetileno según el método UNE-EN 12697-1, y el contenido de polvo de caucho aplicando el método de ignición recogido en la norma UNE-EN 12697-39 sobre los áridos extraídos, tal como se ha indicado en este estudio. El procedimiento descrito permite determinar el contenido de betún y de polvo de caucho con una razonable exactitud para que pueda utilizarse como método de control de las mezclas con polvo de caucho.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su gratitud a la dirección del Laboratorio de Infraestructura Viaria, perteneciente al Centro de Estudios del Transporte del CEDEX, por las facilidades dadas para la realización del trabajo experimental, así como a los señores E. Corrochano, S. Muñoz, A. Viñuales y a la señora E. Sosa, por su colaboración en dicho trabajo.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas. Centro de estudios de Transporte- Monografía CEDEX, 2007.
2. Heitzman, M. Estate of the practice-Design and construction os asplalt paving materials wth crumb rubber modifier.Report FHWA-SA-92-022. FHWA, US. Departement of Transportation, May 1992.
3. Bahía, H., Davies R. Effect of crumb rubber modifiers (CRM) on performance-related properties of asphalt binders. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 63, 1994.
4. Zanzotto, L, G. J. Kennepohl. Development of rubber and asphalt binders by depolymerisation and devulcanization of scrap tires in asphalt. Transportation Research Record 1530, TRB, National Research Council, Washington D. C.,1996.
5. Billiter,T.C., Davison R.R., Glover C. J., Bullin J.A.. Production of asphalt-rubber binders by high-cure conditions. Transportation Research Record 1586, TRB, National Research Council, Washington D. C.,1997.
6. Abdelrahman M. A., Carpenter S. H. Mechanism of interaction of asphalt cement with crum rubber modifier. Transportation Research Record 1661, TRB, National Research Council, Washington D. C., 1999.
7. Huang S., Pauli A.T. Particle size effect of crumb rubber on rheology and morphology of asphalt binders with long-term aging. Road Materials and Pavement Design. Vol. 9- n° 1/2008.