



# SIGNUS

SISTEMA COLECTIVO DE GESTIÓN DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO

# M

Manual de recomendaciones para  
el diseño y puesta en obra de  
mezclas bituminosas con polvo  
de caucho por vía seca



## ***Autores***

### **Fernando Moreno Navarro**

Profesor Titular del Área de Ingeniería de la Construcción, Universidad de Granada. Subdirector del Grupo LabIC.UGR

### **M<sup>a</sup> Carmen Rubio Gámez**

Catedrática del Área de Ingeniería de la Construcción, Universidad de Granada. Directora del Grupo LabIC.UGR

### **Miguel del Sol Sánchez**

Profesor Ayudante Doctor del Área de Ingeniería de la Construcción, Universidad de Granada. LabIC.UGR

### **Raúl Tauste Martínez**

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. LabIC.UGR

### **Gema García Travé**

Dr. Licenciada en Química. LabIC.UGR

### **Leticia Saiz Rodríguez**

Directora de Desarrollo e Innovación. SIGNUS Ecovalor

### **Roberto Pérez Aparicio**

Técnico de Desarrollo e Innovación. SIGNUS Ecovalor

## ***EXONERACIÓN DE RESPONSABILIDAD***

Las recomendaciones recogidas en este documento son fruto de un estudio riguroso de la literatura existente y de la experiencia adquirida en el estudio de estos materiales durante los últimos años, tanto a escala de laboratorio, como en las etapas de fabricación en planta, ejecución en obra y control de la evolución de pavimentos realizados con polvo de caucho por vía seca.

Los autores del presente manual lo han elaborado con el mejor criterio y mayor rigor técnico posible. Sin embargo, será en última instancia el criterio del usuario el único que puede garantizar un resultado satisfactorio para cada aplicación particular, por lo que los autores y SIGNUS Ecovalor se eximen de toda responsabilidad derivada de su aplicación práctica. Asimismo, es necesario destacar que este manual está dirigido especialmente al polvo de caucho procedente de la granulación del NFVU y que no ha sufrido ningún proceso posterior de tratamiento.

ISBN: 978-84-09-38497-6

©Copyright SIGNUS ECOVALOR

Depósito legal: M-6800-2022



# SIGNUS

SISTEMA COLECTIVO DE GESTIÓN DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO

## RESEÑA

SIGNUS Ecovalor es una entidad sin ánimo de lucro creada como sistema colectivo de responsabilidad ampliada del productor a disposición de todos aquellos fabricantes e importadores (productores) que debe cumplir sus obligaciones legales en relación con los neumáticos fuera de uso.

La misión de SIGNUS es responder a la necesidad que tiene la sociedad de vivir en un entorno sostenible, garantizando el adecuado tratamiento de los neumáticos fuera de uso desde su generación hasta su transformación en materias primas con valor.

Una de las más importantes aplicaciones para maximizar ese valor es la utilización del polvo de neumático procedente de los que han llegado al final de su vida útil en mezclas bituminosas, confiriéndoles unas propiedades específicas y cerrando el ciclo del concepto de Economía Circular.



# Agradecimientos

SIGNUS quiere agradecer a los autores de este documento su compromiso y dedicación en la elaboración de esta publicación, así como a los técnicos de laboratorio de LabI.C.UGR que realizaron los correspondientes ensayos experimentales. Además, SIGNUS tiene el deseo de reconocer y destacar la labor que realizan los autores M<sup>º</sup> Carmen Rubio Gámez y Fernando Moreno Navarro para contribuir al fomento y desarrollo de construcción de carreteras más sostenibles.

Mención especial a D. José Manuel Berenguer Prieto, gran profesional que se caracteriza por su esfuerzo, trabajo y gran calidad humana, además de ser un referente y experto en la materia, que cuenta con una larga experiencia y trayectoria en el sector de las mezclas bituminosas. Gracias a la generosidad que le caracteriza aceptó de forma desinteresada colaborar con los autores de este manual con quienes ha compartido su conocimiento, experiencia y su buen hacer en relación al diseño, fabricación y puesta en obra de las mezclas bituminosas modificadas con caucho por vía seca.



# Índice

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>9</b>
<b>2. DISEÑO DE MEZCLAS BITUMINOSAS CON CAUCHO POR VÍA SECA</b>	<b>13</b>
2.1. Características del polvo de caucho	13
2.1.1. Distribución granulométrica	14
2.1.2. Contenido de impurezas	14
2.1.3. Densidad	15
2.1.4. Contenido de humedad	15
2.2. Diseño del esqueleto mineral	16
2.3. Ligante bituminoso	18
2.4. Aditivos	18
2.5. Fabricación y compactación en el laboratorio	19
2.6. Estudio del comportamiento mecánico de mezclas bituminosas con caucho	20
<b>3. FABRICACIÓN Y PUESTA EN OBRA</b>	<b>23</b>
3.1. Recepción y almacenamiento del polvo de caucho en planta	23
3.2. Dosificación del polvo de caucho	25
3.3. Incorporación de otros aditivos	27
3.4. Secuencia de mezclado	28
3.5. Puesta en obra	28
<b>4. BIBLIOGRAFÍA Y NORMAS DE REFERENCIA</b>	<b>31</b>
<b>A. DISEÑO DE ESQUELETO MINERAL DE MEZCLAS BITUMINOSAS CON POLVO DE CAUCHO POR VÍA SECA</b>	<b>37</b>
A.1. Selección de materiales	37
A.1.1. Áridos	37
A.1.2. Polvo de caucho	39
A.2. Diseño del esqueleto mineral	40
<b>B. SEGUIMIENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS CONSTRUIDOS CON POLVO DE CAUCHO POR VÍA SECA</b>	<b>69</b>
B.1. Carretera CV-870 (La Murada, Alicante)	69
B.2. Carretera CV-846 (Aspe, Alicante)	72
B.3. Carretera N-301 (Molina de Segura, Murcia)	79



# Introducción



En los últimos años, en el ámbito de la ingeniería de carreteras se ha producido un cambio de conciencia social que ha tenido como consecuencia el desarrollo de procesos constructivos más sostenibles, que abogan por la valorización y reciclado de materiales, con el objetivo de disminuir el consumo de recursos naturales, energético y los impactos ambientales causados en torno a emisiones y vertidos. En definitiva, ser capaces de ejecutar carreteras más duraderas que permitan una disminución del impacto que causa su rehabilitación y conservación. El modelo de producción lineal basado en extraer, producir y consumir se encuentra en transición hacia una economía circular donde reducir, reutilizar y reciclar pasan a ser los pilares de un nuevo modelo productivo.

En este contexto, la utilización de polvo de caucho procedente del neumático al final de su vida útil (NFVU) para la fabricación de mezclas bituminosas es cada vez más importante, puesto que además de contribuir a minimizar el impacto ambiental causado por estos residuos, permite mejorar las prestaciones mecánicas y durabilidad de estos materiales.

**“ El empleo de polvo de caucho en mezclas bituminosas permite fabricar carreteras más duraderas ”**

En la actualidad existen dos **técnicas de fabricación** de mezclas bituminosas con polvo de caucho consolidadas: (i) una consistente en la mezcla previa del polvo de caucho con el betún, obteniéndose un betún modificado con caucho que será empleado como ligante en la fabricación de la mezcla (**vía húmeda**); y (ii) otra en la que el polvo de caucho se adiciona directamente como un elemento más de la mezcla, como si de un árido más se tratara, incorporando posteriormente el betún y realizando el amasado de todos los componentes a la vez (**vía seca**). Recientemente también han surgido nuevos métodos que consisten en pretratar el polvo de caucho (mezclándolo y digiriéndolo con betún, aditivos y/u otras partículas minerales) antes de incorporarlo a la mezcla bituminosa por vía seca.



**Figura 1. Principales formas de fabricación de mezclas bituminosas con polvo de caucho procedente del neumático al final de su vida útil**

En España se han hecho importantes avances en lo que se refiere a especificaciones de ligantes bituminosos y mezclas bituminosas que incorporan caucho procedente del neumático, respecto a otros países europeos. El empleo de polvo de caucho tanto en betunes asfálticos como en mezclas bituminosas está recogido y regulado en la actualidad por las órdenes circulares OC 21/2007 (11 de julio de 2007) y OC 21bis/2009 (23 de marzo de 2009), además del "Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas" elaborado por el CEDEX (mayo de 2007). En lo que se refiere a la incorporación de polvo de caucho pretratado o aditivos de caucho, en el año 2020 se publicó la nota técnica NT 02/2020 donde se define la forma de proceder cuando se emplea un aditivo de caucho por vía seca en sustitución de un betún mejorado con caucho (BC).

No obstante, y a pesar de estas especificaciones y de las ventajas derivadas de la utilización del polvo de caucho en pavimentos asfálticos, aún existen limitaciones que suponen un obstáculo para su empleo. Especialmente, en lo que respecta a la incorporación del polvo de caucho por vía seca, la normativa española reduce su aplicación a mezclas bituminosas para carreteras con tráficos medios o bajos. Este hecho contrasta con los resultados obtenidos en experiencias en las que este tipo de mezclas han demostrado un excelente comportamiento mecánico ante condiciones de tráfico y ambientales severas (algunos ejemplos de ellas vienen recogidas en el Anexo B de este manual).



Por este motivo, el objetivo principal de este manual es dar a conocer la técnica y los aspectos fundamentales para facilitar su uso de forma segura, proporcionando una serie de recomendaciones técnicas necesarias para un adecuado diseño, fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas con polvo de caucho por vía seca. Con ello se pretende dotar al sector de la información necesaria para fomentar su uso y su posterior desarrollo a nivel formativo.

En base a ello, en el capítulo 2 se establecen las recomendaciones de diseño, continuando en el capítulo 3 con las particularidades relacionadas con la fabricación y puesta en obra. Finalmente, el manual incluye dos anexos en los que se explican ejemplos prácticos de dosificación granulométrica de mezclas bituminosas por vía seca (Anexo A) y se analiza el estado actual de pavimentos asfaltados con esta técnica tras varios años de vida de servicio (Anexo B).

Esta publicación junto con otras anteriores<sup>1</sup> forma parte de un plan de acción diseñado por SIGNUS Ecovalor para fomentar la utilización del polvo de caucho en carreteras. De esta forma, se contribuye a cumplir con los requisitos adicionales establecidos a través del Plan Estratégico Marco de Residuos 2016-2022 del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, y las políticas de fomento de la sostenibilidad de la actividad económica impulsando la Estrategia Española de Economía Circular.

**“ Experiencias de mezclas bituminosas con caucho por vía seca han demostrado un excelente comportamiento mecánico ante condiciones de tráfico y ambientales severas”**

<sup>1</sup> “Mezclas semicalientes con polvo de caucho procedente del neumático al final de su vida útil” (2019)  
“20 años de mezclas asfálticas con polvo de neumático en las carreteras españolas” (2018)  
“Guía para la fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas con polvo de neumático (2017)  
“Guía para la fabricación de betunes con polvo de neumático” (2014)



→ ASPHALT SUPPLY →

CS SAMPLE VALVE

# Diseño de mezclas bituminosas con caucho por vía seca

## 2

Las mezclas bituminosas con caucho por vía seca son mezclas bituminosas convencionales que incorporan una determinada cantidad de polvo de caucho entre sus materiales constituyentes, como si de un árido más se tratase. En el presente epígrafe se describen los aspectos más relevantes a considerar en el diseño: en primer lugar, los relativos a la selección del polvo de caucho a utilizar, continuando con el diseño del esqueleto mineral (según el tipo de mezcla permitirá albergar mayor o menor cantidad de caucho) y la dosificación del polvo de caucho, el ligante bituminoso, la fabricación y compactación en laboratorio y por último, el análisis de las propiedades mecánicas de la mezcla bituminosa con caucho por vía seca obtenida.

### 2.1. Características del polvo de caucho

El factor más importante a tener en cuenta a la hora de seleccionar el tipo de polvo de caucho a utilizar en la fabricación de mezclas bituminosas por vía seca es su **tamaño de partícula**. Es recomendable que el tamaño de éstas **no sea excesivamente grande**, de lo contrario el esqueleto mineral no podrá acomodarlas y el caucho interferirá en el contacto entre áridos. Así, se recomienda el empleo de polvo de caucho de tamaño inferior a 0.5 mm, lo que además permite **aumentar su superficie específica para garantizar una mejor interacción con el betún**.

**“ El tamaño de partícula del polvo de caucho es un factor clave para garantizar el éxito de la fabricación de una mezcla bituminosa con caucho por vía seca ”**

La caracterización del polvo de caucho se lleva a cabo mediante el análisis de la distribución granulométrica y el contenido de fibra textil, materiales ferromagnéticos y otras impurezas, además de la determinación de su densidad y humedad. Dicha caracterización se realiza en base a los siguientes ensayos normalizados:

### 2.1.1. Distribución granulométrica

El método de ensayo para determinar la distribución granulométrica se describe en la norma europea UNE-EN 14243-2:2019 "Materiales producidos a partir de neumáticos al final de su vida útil. Parte 2: Granulado y polvo. Métodos para la determinación de sus dimensiones e impurezas, incluyendo contenido de acero libre y textil libre". Este ensayo consiste en introducir una muestra de unos 150 gramos durante 12 minutos en un equipo de tamizado que tenga un movimiento de vibración aplicado en tres dimensiones, para clasificar el material por tamaños mediante distintos tamices.



**Figura 2. Equipo de tamizado para el análisis granulométrico**

### 2.1.2. Contenido de impurezas

Los ensayos correspondientes para determinar el contenido de fibra textil, materiales ferromagnéticos y otras impurezas son los descritos en la norma europea UNE-EN 14243-2:2019 "Materiales producidos a partir de neumáticos al final de su vida útil. Parte 2: Granulado y polvo. Métodos para la determinación de sus dimensiones e impurezas, incluyendo contenido de acero libre y textil libre".

- **Contenido de fibra textil libre:** Durante el tamizado descrito en la norma, además de la clasificación por tamaños (granulometría), las fibras textiles que pueda contener la muestra tienden a formar pequeñas aglomeraciones que, una vez finalizado el tamizado, se separan y se pesan para su cuantificación.



**Figura 3. Equipo para análisis del contenido de fibra textil libre**

- **Contenido de material ferromagnético:**

El método descrito se basa en la extracción del acero libre mediante un imán haciendo varias pasadas sobre una muestra extendida en una bandeja.



**Figura 4. Análisis del contenido de material ferromagnético**

- **Otras impurezas:** El método de ensayo descrito en la norma está basado en una separación densimétrica de materiales mediante una solución salina cuya densidad es aproximadamente de  $1.25 \text{ g/cm}^3$ . Esta densidad es superior a la del caucho (del orden de  $1.16 \text{ g/cm}^3$ ) lo que provoca que los elementos extraños localizables en el polvo de caucho como arena, vidrio o alguna partícula metálica no ferromagnética, decanten en el fondo del recipiente empleado.

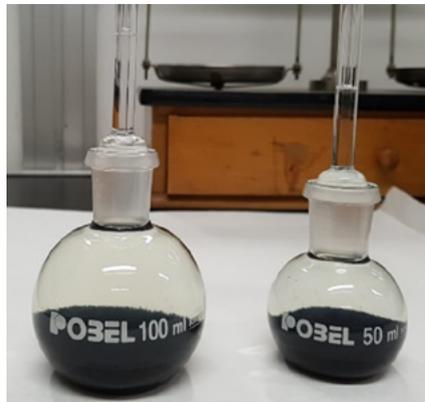


**Figura 5. Material de laboratorio para el análisis del contenido de otras impurezas**

### 2.1.3. Densidad

La densidad aparente de las partículas de caucho puede variar ligeramente en función del proceso de producción. No obstante, como valor de referencia se puede tomar una densidad aparente del orden de  $0.5 \text{ g/cm}^3$ , con ligeras variaciones en función de la granulometría.

Por otro lado, el método de ensayo para determinar la densidad específica del polvo de caucho se describe en la especificación técnica europea CEN/TS 17189:2018 "*Materiales obtenidos a partir de neumáticos al final de su vida útil. Determinación de la densidad real de los granulados. Método basado en la picnometría del agua*". El valor de la densidad para el polvo de caucho está entre 1.16 - 1.22 (adimensional).



**Figura 6. Determinación de la densidad específica de caucho de NFVU mediante el método del picnómetro (UNE-CEN/TS 17189)**

### 2.1.4. Contenido de humedad

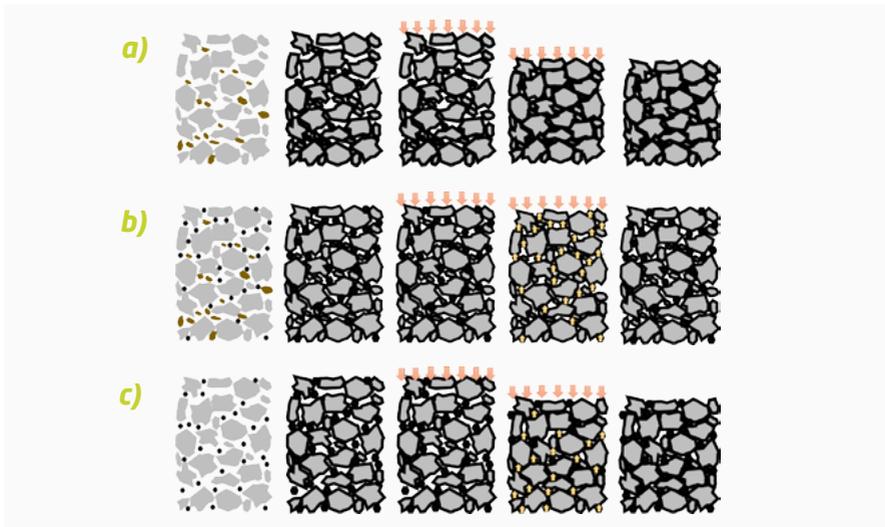
El método específico para la determinación del contenido de humedad del polvo de caucho es el descrito en la especificación técnica CEN/TS 16916 "*Materiales obtenidos a partir de neumáticos al final de su vida útil - Determinación de los requerimientos específicos para el muestreo y la determinación del contenido de humedad mediante el método del secado en horno*".

## 2.2. Diseño del esqueleto mineral

A la hora de abordar el diseño del esqueleto mineral de la mezcla hay que tener en cuenta su tipología (continua, discontinua/abierta, etc.), la cantidad de caucho que se pretende añadir y el tamaño de sus partículas.

A pesar de que el polvo de caucho se considera como un árido más, no podemos olvidar que se trata de un material con propiedades muy diferentes a los áridos (densidad, elasticidad, etc.). Por ello, hay que garantizar en todo momento que el caucho tenga el espacio necesario dentro del esqueleto mineral de la mezcla para no interferir con las partículas minerales. Es decir, una vez seleccionados la cantidad y el tamaño del polvo de caucho, el esqueleto mineral de la mezcla bituminosa elegida tiene que tener los huecos necesarios para albergar el volumen de las partículas de caucho. Cuando la mezcla seleccionada no dispone de los huecos suficientes, el caucho y los áridos "rivalizan" por ocupar un mismo espacio, lo que dificultará la trabajabilidad y compactación de la mezcla. Esto es debido a que las partículas de caucho actuarán como elementos elásticos, absorbiendo parte de la energía de compactación, haciéndola menos efectiva.

Así, partiendo de una mezcla bituminosa con un determinado volumen de material granular y ligante (Figura 7a), si incorporáramos un cierto volumen de polvo de caucho (Figura 7b), la capacidad de envuelta del ligante se vería reducida, ya que el material granular de la mezcla ha experimentado un incremento en su superficie específica. Además, se vería también reducida su capacidad de lubricar y facilitar la densificación del material ante el mismo esfuerzo de compactación. Por otro lado, si los huecos existentes entre las partículas minerales son inferiores al volumen ocupado por las partículas de caucho incorporadas, éstas actuarán como un resorte elástico dentro la mezcla, disminuyendo la eficacia del esfuerzo de compactación utilizado para disminuir el volumen final ocupado por los materiales. Debido a ello, se obtendrán mezclas con menor densidad y mayor contenido de huecos (Figura 7b). Por el contrario, si se reduce el volumen de áridos con un tamaño similar al polvo de caucho incorporado a la mezcla (Figura 7c), el mismo contenido de ligante podría envolver y lubricar las partículas del esqueleto, facilitando su compactación para el mismo tipo de esfuerzo. Además, dado que los áridos que rivalizan con el polvo de caucho han sido eliminados, el esqueleto dispone del espacio necesario para albergarlo y su efecto negativo sobre la compactación se vería mitigado.



**Figura 7. Detalle de la influencia del volumen del polvo de caucho incorporado a la mezcla en la organización y densificación del esqueleto mineral**

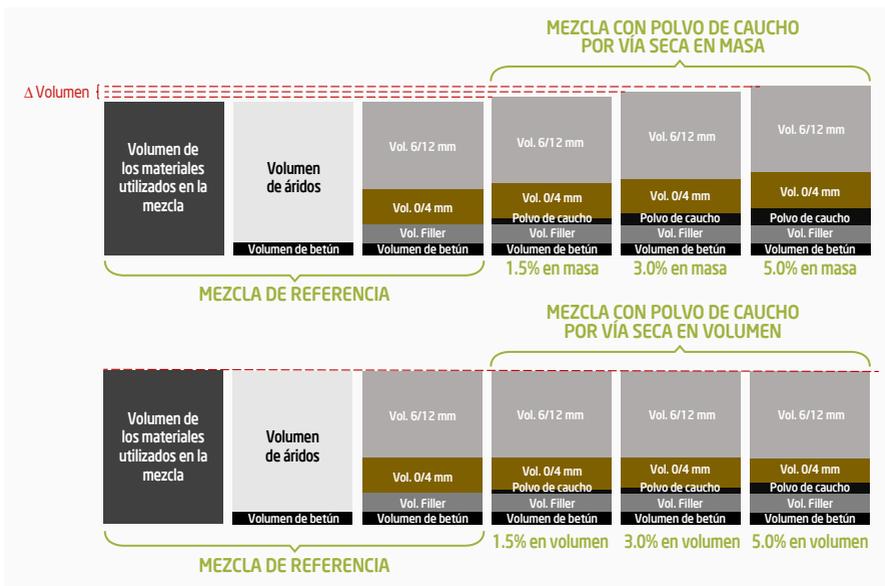
Las **mezclas bituminosas continuas**, con un esqueleto mineral más cerrado y, por tanto, con menor contenido de huecos donde ubicar nuevas partículas, **permiten menores aportaciones de polvo de caucho**, siendo recomendable limitar las dotaciones al **0.5% en masa sobre la mezcla**. Por el contrario, en las **mezclas discontinuas/abiertas** el esqueleto mineral dispone de mayores cantidades de huecos en los que albergar nuevas partículas, lo que **permite dotaciones de hasta el 2% en masa de polvo de caucho** sobre la mezcla. Como consecuencia, tras la fabricación de la mezcla discontinua con polvo de caucho, el contenido de huecos final de la mezcla podría reducirse con respecto al esperado para un esqueleto discontinuo/abierto. En este sentido, si se deseara mantener un contenido de huecos elevado, se recomienda que el esqueleto se diseñe en la zona inferior del huso del tamaño arena (0-4 mm).

Finalmente, hay que tener en cuenta que la densidad de las partículas de caucho es aproximadamente de 1.2 g/cm<sup>3</sup>, bastante más reducida que la de los áridos naturales, que está en torno a los 2.6 g/cm<sup>3</sup>. Por este motivo, cuando se dosifica el polvo de caucho como sustituto de

una cantidad determinada de masa de los áridos naturales del esqueleto mineral, se incurre en un incremento considerable del volumen de partículas que lo forman (incrementando su superficie específica y alterando el resultado que se pretende conseguir). Así, resulta primordial que durante el diseño de mezclas bituminosas por vía seca, los **cálculos de dosificación** de los materiales que conformarán el esqueleto mineral **se realicen en términos volumétricos** (Figura 8).

Con el objetivo de profundizar más en este aspecto tan importante del diseño de mezclas bituminosas con polvo de caucho por vía seca, el Anexo A de este manual ofrece algunos ejemplos representativos de cómo debe llevarse a cabo el diseño del esqueleto mineral.

**“ Es primordial que en la etapa de diseño los cálculos de dosificación de los materiales del esqueleto mineral se realicen en términos volumétrico ”**



**Figura 8. Análisis comparativo del diseño de mezclas bituminosas con polvo de caucho por vía seca en masa y en volumen**

### 2.3. Ligante bituminoso

En principio, cualquier tipo de ligante bituminoso, ya sea convencional o modificado, podría ser utilizado para la fabricación de mezclas bituminosas con polvo de caucho por vía seca, debiendo seleccionarse las características de éste en base a otros condicionantes como puedan ser el clima, las tensiones transmitidas por las cargas a soportar, etc. Sin embargo, los tipos de ligantes más comunes a la hora de fabricar estas mezclas suelen ser betunes convencionales tipo B50/70 o B35/50.

Si el volumen de partículas del esqueleto mineral de la mezcla con polvo de caucho por vía seca es equivalente al de una mezcla convencional, tampoco tendría por qué ser necesario incrementar el contenido de ligante con respecto a éste. A pesar de ello, es necesario estudiarlo, puesto que las partículas de polvo de caucho tienen mayor superficie específica que el volumen de la fracción arena a la que suelen sustituir y una menor adhesividad con el ligante asfáltico. Por este motivo, la experiencia sugiere dotaciones mínimas de ligante ligeramente superiores a las de las mezclas convencionales, que se encuentran en torno al 4.75% en masa sobre mezcla para mezclas continuas tipo AC y en torno al 5.25% para mezclas discontinuas. A pesar de ello, se trata de valores orientativos que van a estar condicionados por la naturaleza de los áridos y la superficie específica del esqueleto mineral.

### 2.4. Aditivos

Finalmente, es necesario destacar que, a la hora de diseñar mezclas bituminosas con polvo de caucho por vía seca y en función de la cantidad de éste, puede ser necesario utilizar aditivos que mejoren las propiedades de la mezcla. Como ya se ha mencionado anteriormente, la superficie específica del caucho es elevada y su afinidad química con el ligante bituminoso suele ser más baja que la de los áridos a los que sustituye. En base a estas consideraciones, se deberá tener en cuenta la posibilidad de utilizar aditivos activantes de adhesividad que garanticen una buena cohesión interna y una baja susceptibilidad al agua. Asimismo, la incorporación de elevados contenidos de caucho por vía seca puede disminuir la trabajabilidad de la mezcla, por lo que sería interesante barajar la posibilidad de utilizar aditivos que permitan mejorarla, pudiendo ser también utilizados para fabricar mezclas bituminosas semi-calientes. Estos aditivos pueden venir ya incorporados en el betún de refinería o pueden adicionarse en planta durante la fabricación de la mezcla (su dosificación dependerá del tipo de aditivo y fabricante, pero suele estar en torno al 0.1% - 0.4% sobre la masa del ligante).



## 2.5. Fabricación y compactación en el laboratorio

Aunque el procedimiento a seguir es similar al de una mezcla convencional, a la hora de abordar el proceso de fabricación en laboratorio de mezclas bituminosas con polvo de caucho por vía seca hay una serie de recomendaciones que deberían tenerse en cuenta.

La temperatura de fabricación de la mezcla es uno de los aspectos clave por sus repercusiones sobre el comportamiento mecánico del material resultante. Dada su menor trabajabilidad, tradicionalmente se han utilizado temperaturas de fabricación entre 5-10 °C superiores a las de una mezcla bituminosa convencional. Sin embargo, por motivos de carácter ambiental, se recomienda no incrementar la temperatura de fabricación y en caso de necesitar una mejora en la trabajabilidad de la mezcla, utilizar tecnologías como el empleo de aditivos, por ejemplo tensoactivos o ceras, o la espumación del betún.

Estas técnicas han demostrado hacer posible la fabricación de mezclas con polvo de caucho a bajas temperaturas sin que esto suponga una disminución en las prestaciones mecánicas de la mezcla bituminosa.

Por otra parte, se recomienda realizar un amasado conjunto de los áridos y del polvo de caucho de unos 5 segundos aproximadamente. Posteriormente, se incorporará el ligante bituminoso y se realizará una amasada de unos 30 segundos. Finalmente, se añadirá el filler procediendo a amasar durante otros 20 segundos adicionales (Figura 9). Estos tiempos mínimos podrían variar en función de las características de la amasadora de la que se disponga en laboratorio, pudiendo incrementarse el tiempo de homogeneización entre áridos y polvo de caucho hasta los 20 segundos, los de amasado con betún hasta los 120 segundos y los de amasado con filler hasta los 180 segundos.

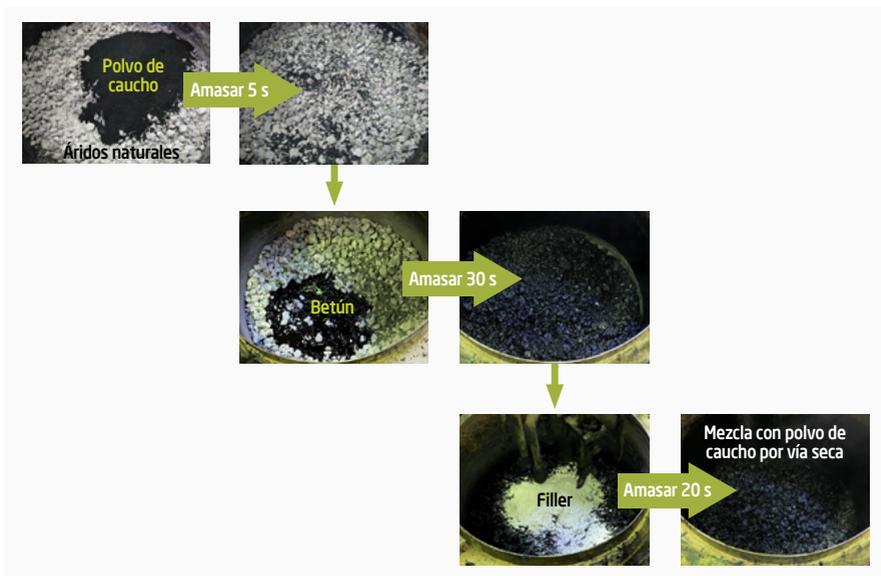


Figura 9. Secuencia en el proceso de amasado de los materiales

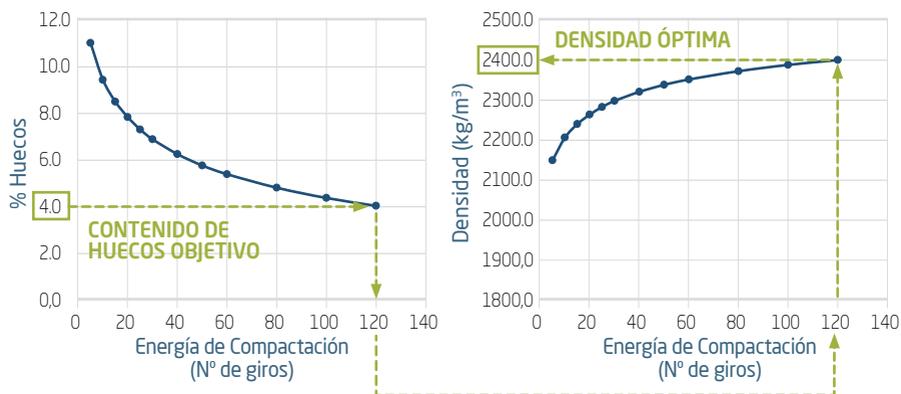
Tras la fabricación de la mezcla, se procede al estudio de compactación del material con el objetivo de definir su densidad óptima. Como se ha comentado, las mezclas bituminosas con polvo de caucho por vía seca suelen ser menos trabajables que las mezclas convencionales y la energía de compactación aplicada es menos eficiente debido a la elasticidad de sus partículas, especialmente si los contenidos de caucho adicionado son elevados y los huecos del esqueleto mineral son bajos. Por este motivo, este tipo de mezclas suelen requerir una mayor energía de compactación para alcanzar su densidad óptima, independientemente del tipo de compactador utilizado.

Ala hora de llevar a cabo el diseño de estos materiales en laboratorio, **se recomienda establecer unas características volumétricas objetivo**, como por ejemplo, un contenido de huecos de referencia y, en consecuencia, aplicar la energía necesaria para alcanzar dicho objetivo. Así, **no se debe aplicar una energía de compactación específica** como suele hacerse al diseñar mezclas bituminosas convencionales, por ejemplo 50 ó 75 golpes por cara con compactador de impactos (UNE-EN 12697-30), sino que se aplicará la energía de compactación necesaria hasta alcanzar el contenido de huecos objetivo. De esta forma, la densidad óptima de referencia en obra será la densidad alcanzada en laboratorio bajo estas premisas (ver Figura 10). En cuanto al equipo de compactación en laboratorio, puede utilizarse tanto el compactador de impactos (UNE-EN 12697-30) como el compactador giratorio (UNE-EN 12697-31).

## 2.6. Estudio del comportamiento mecánico de mezclas bituminosas con caucho

Una vez diseñado el esqueleto mineral, dosificada la cantidad de polvo de caucho, seleccionada la dotación y tipología de ligante, y tras haber definido la densidad óptima de la mezcla, se procederá a evaluar su comportamiento mecánico. Para ello, en primer lugar, será imprescindible garantizar que la mezcla cumple con las prescripciones técnicas establecidas en el pliego de la obra donde vaya a ser utilizada. Así, se comenzará estudiando su respuesta ante los ensayos de laboratorio más comunes requeridos en dichos pliegos:

- Contenido de huecos según UNE-EN 12697-8.
- Susceptibilidad al agua según UNE-EN 12697-12.
- Resistencia a las deformaciones permanentes según UNE-EN 12697-22.
- En el caso de mezclas de alto módulo, rigidez y resistencia a fatiga según UNE-EN 12697-25 anexo C y UNE-EN 12697-24 anexo D.
- En el caso de mezclas drenantes, resistencia a la pérdida de partículas según UNE-EN 12697-17.

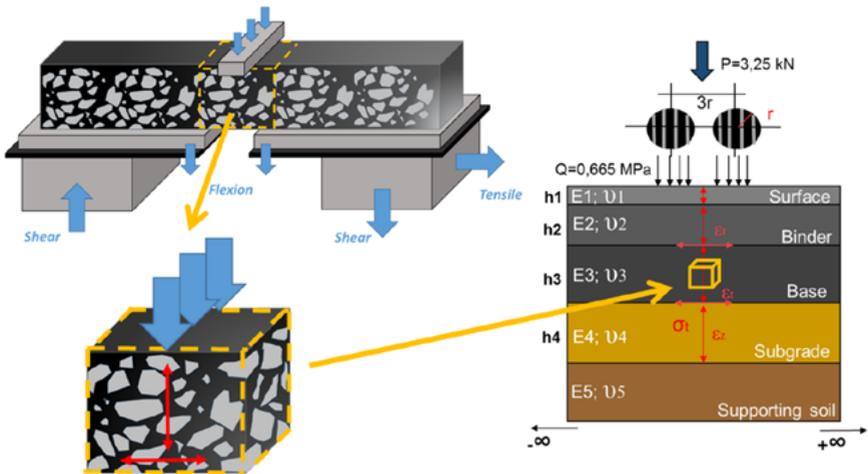


**Figura 10. Esquema de obtención de densidad óptima de la mezcla a partir de unas características volumétricas objetivo mediante compactador giratorio**

No obstante, la incorporación de polvo de caucho por vía seca a las mezclas bituminosas ofrece una serie de ventajas en su comportamiento mecánico a medio-largo plazo que deberían ser estudiadas para poder valorar mejor su elección frente a las mezclas tradicionales. Algunos de los ensayos más interesantes a los que someter este tipo de materiales pueden ser:

- Resistencia a deformaciones permanentes bajo condiciones de inmersión en agua según UNE-EN 12697-22.
- Resistencia a la fisuración por retracciones térmicas según UNE-EN 12697-46.
- Resistencia a la degradación ambiental (oxidación, temperatura y humedad) según UNE-EN 12697-45.
- Resistencia a la fisuración por fatiga (UGR-FACT).

Asimismo, a la hora de dimensionar los espesores de capa de estos materiales, se recomienda hacer extensivo el ensayo de rigidez según UNE-EN 12697-26 anexo C más allá de las mezclas de alto módulo, es decir, para cualquier tipo de mezcla, y utilizar el estudio de espesores equivalente del método UGR-FACT. Así, se estudiarán los materiales en términos estructurales, midiendo los desplazamientos en función de la intensidad de carga, temperatura ambiente y espesor de capa. Estos datos serán directamente aplicados para definir leyes de fatiga y leyes estructurales, relaciones entre espesores y deformaciones, que serán utilizadas para determinar el dimensionamiento óptimo de la capa de mezcla bituminosa con polvo de caucho por vía seca y su relación con el de una mezcla convencional (Figura 11).



**Figura 11. Detalle de los desplazamientos medidos con UGR-FACT y su aplicación al estudio estructural del firme**



# Fabricación y puesta en obra

## 3

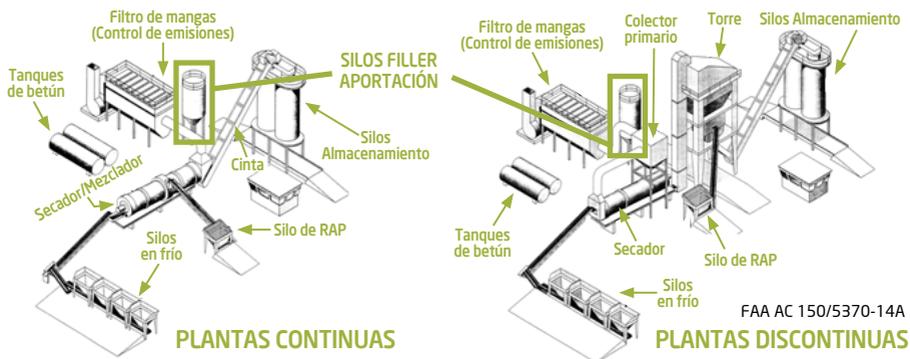
Actualmente la fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas con polvo de caucho por vía seca es una técnica contrastada que puede realizarse con éxito en cualquier tipo de planta asfáltica, sin que sea necesario realizar grandes modificaciones en la misma y con maquinaria de extendido y compactación convencional.

A continuación, se recogen los principales aspectos relacionados con la fabricación en planta y puesta en obra de este tipo de mezclas.

**“ La fabricación de mezclas por vía seca se puede realizar con éxito en cualquier tipo de planta asfáltica ”**

### 3.1. Recepción y almacenamiento del polvo de caucho en planta

Al igual que el resto de las mezclas bituminosas en caliente, las mezclas con caucho por vía seca pueden ser fabricadas en plantas asfálticas continuas o discontinuas. En ambos casos, la forma más recomendable sería almacenar y dosificar el polvo de caucho a través de los silos del polvo mineral de aportación (Figuras 12 y 13). Para ello, se recomienda que el polvo de caucho se suministre en camiones cisterna con compresor para bombear el material a lo largo de la tubería que asciende por el silo, tal y como se hace con los materiales comúnmente utilizados como filler de aportación (cemento, carbonato, etc.). La manguera del camión se acoplaría a la tubería del silo, permitiendo el llenado del silo con el polvo de caucho.



**Figura 12. Detalle de la ubicación de los silos del filler de aportación en plantas asfálticas continuas y discontinuas**

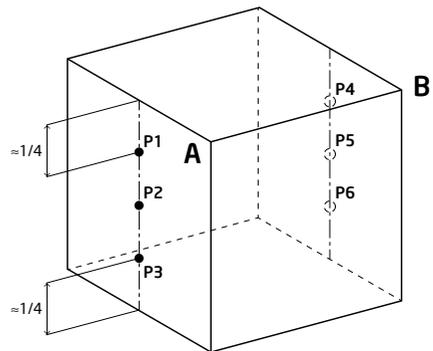


**Figura 13. Detalle del silo del filler de aportación de una planta asfáltica discontinua**

Es recomendable que a la llegada de cada camión de suministro de polvo de caucho a la planta se tomen muestras de la forma más homogénea posible para verificar sus principales propiedades (granulometría, densidad, contenido de impurezas, contenido de humedad, etc.). En el caso de no ser almacenado en los silos del filler de aportación, se recomienda que el material se almacene protegido de la lluvia y de cualquier tipo de contaminación no deseada (fluidos, materia orgánica, polvo, etc.), de manera que permanezca completamente seco y limpio hasta su entrada al mezclador.

Por lo general, el polvo de caucho se suministra en sacas. En este caso, se debe prestar especial atención a la obtención de una muestra representativa debido a la tendencia del material almacenado a segregarse con el paso del tiempo, sedimentando las partículas más finas en la parte inferior de la saca y aflorando la fibra textil que pueda contener en la parte superior. La especificación técnica CEN/TS 17188 describe un método para obtener una muestra de laboratorio de granulado o polvo de caucho procedente de NFVU cuando están almacenados en sacas. De la saca se extraen varios incrementos a diferentes niveles, con el fin de que esté representada la distribución media del tamaño de las partículas dentro de la saca. A partir de estos incrementos se obtiene una muestra representativa.

La Figura 14 presenta una de las opciones para la toma de muestras descrita en la norma.



**Figura 14. Localización de la posición de las tomas de incrementos de la muestra en una saca**

### 3.2. Dosificación del polvo de caucho

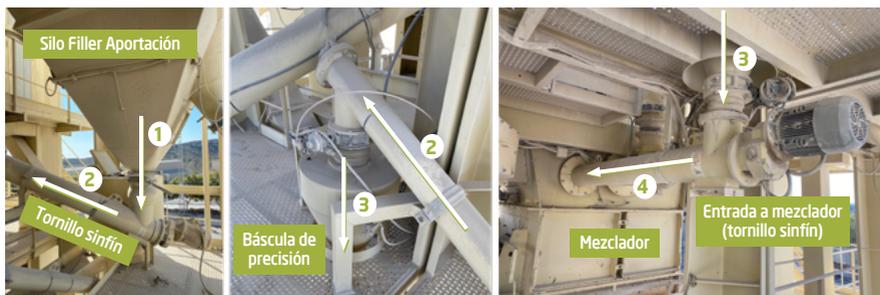
Para llevar a cabo la fabricación de este tipo de mezclas bituminosas, se recomienda utilizar un sistema de pesaje y dosificación independiente al del resto de componentes de la mezcla. Como se ha comentado en el apartado anterior, esto podría realizarse utilizando uno de los silos de almacenamiento de filler de aportación, en el que sería recomendable incorporar una báscula de precisión similar a la utilizada para el betún. Así, el caucho podría introducirse directamente al mezclador tal y como se hace con el filler de aportación.

Es recomendable que los silos del filler de aportación donde se almacene el polvo de caucho estén unidos a la báscula de pesaje mediante un sistema de tornillo sinfín, a través del cual el caucho pasará hasta llegar a una válvula de cierre que controlará su descarga en la báscula. La báscula estará formada por un conjunto de células de carga (para su pesaje), un motor vibrador (para evitar que el polvo de caucho se apelmace dentro de la báscula) y un cierre para controlar la descarga al mezclador de la planta a través de otro tornillo sinfín (Figura 15).

Debido a su reducido tamaño de partícula, y tal y como puede ocurrir con el cemento y otros materiales a granel, es posible que el caucho se apelmace en el interior del silo de almacenamiento y lo obstruya, provocando

problemas en la producción de la planta o en la fabricación de la mezcla. Como solución a este problema, pueden incorporarse vibradores en los silos o cañones neumáticos capaces de lanzar aire comprimido a gran velocidad con una presión de unos 2-6 kg/cm<sup>2</sup>, para romper el apelmazamiento y permitir el flujo libre del producto.

Otra opción sencilla y económica para evitar el apelmazamiento del polvo de caucho y garantizar una correcta dosificación al mezclador es instalar un silo homogeneizador donde se incorpore desde la saca o que se alimente directamente desde el silo principal de almacenamiento (este silo también deberá estar dotado de un sistema de aspas o vibradores para homogeneizar el producto y evitar que el caucho se apelmace, Figura 16). Posteriormente, el polvo de caucho se incorporará a la báscula de pesaje a través de un sistema de tornillo sinfín. La inclusión de este silo, además de ofrecer la posibilidad de dosificación de otro tipo de aditivos sólidos, permitirá seguir incorporando el polvo de caucho en aquellas plantas que solo tengan un silo de almacenamiento del filler de aportación cuando la mezcla a fabricar lo requiera. Para ello, el polvo de caucho se cargará directamente en el silo de homogeneización vertiéndolo de forma manual mientras que el pesaje seguirá haciéndose de forma precisa desde la báscula.

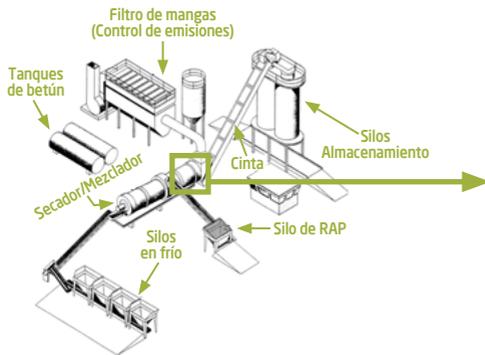


**Figura 15. Detalle del funcionamiento del sistema de dosificación del polvo de caucho a través del silo de almacenamiento del filler de aportación**

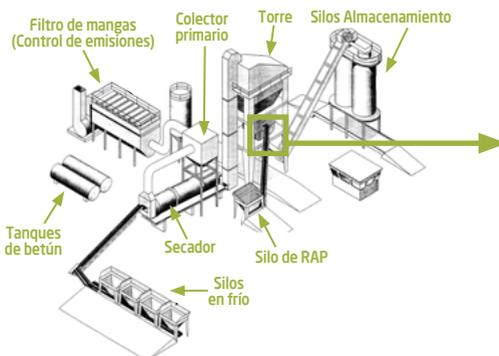


**Figura 16. Detalle de la conexión del silo de filler de aportación con el silo de homogeneización y del sistema de aspas de agitación de éste**

La entrada al mezclador en plantas continuas se realizará en la zona trasera del tambor secador-mezclador (Figura 17), mientras que en plantas discontinuas lo hará en la cámara de mezclado (Figura 18).



**Figura 17. Detalle de la zona de incorporación del polvo de caucho en plantas continuas**



**Figura 18. Detalle de la zona de incorporación del polvo de caucho en las plantas discontinuas**

Finalmente, el caucho también puede dosificarse de forma manual mediante bolsas que contengan la cantidad exacta por amasada desde las compuertas de la cámara de mezclado (Figura 19). Esta opción es menos recomendable ya que requiere la presencia de un operario realizando las labores de dosificación de forma manual y puede dar lugar a una dosificación menos precisa. Además, es necesario el pesaje previo y preparación del caucho, la subida de las bolsas a la torre de la planta, etc.



**Figura 19. Detalle de la dosificación de caucho de forma manual directo al mezclador a través de sacas**

### 3.3. Incorporación de otros aditivos

Aunque no son indispensables, en ocasiones es recomendable el uso de aditivos promotores de adhesividad, especialmente en aquellas mezclas más críticas como las mezclas con esqueleto mineral discontinuo o con áridos de naturaleza ácida menos afines al betún. También es recomendable el uso de mejoradores de la trabajabilidad de la mezcla o reductores de su temperatura de fabricación. Estos aditivos suelen ser líquidos y pueden ser incorporados en diferentes localizaciones de la planta: (i) en las líneas de bombeo del ligante a la salida o entrada del tanque; (ii) antes de la entrada a la báscula de pesaje del ligante (ver Figura 20); (iii) en el propio tanque del almacenamiento del ligante; o (iv) utilizando un mezclador en línea.

Estos aditivos son dosificados en frío, aunque cuando las temperaturas son bajas es recomendable que tengan cierta temperatura para garantizar su fluencia, ya que suelen ser dosificados por caudal, por lo que es recomendable que el tanque de almacenamiento esté calefactado.

En algunos casos, el polvo de caucho puede haber sido sometido a un pretratamiento incorporando en su composición este tipo de aditivos que mejoran la trabajabilidad de la mezcla.



**Figura 20. Detalle del sistema de almacenamiento y dosificación de aditivos líquidos en plantas asfálticas discontinuas incorporado a la línea de ligante previo a la entrada de la báscula de pesaje**

### 3.4. Secuencia de mezclado

Las recomendaciones que se dan a la hora de fabricar mezclas bituminosas con polvo de caucho por vía seca en planta son:

- i) Realizar un pre-amasado conjunto de los áridos y el caucho (en torno a 5 segundos, o un 10% más de tiempo al utilizado en un pre-amasado de mezclas convencionales).
- ii) Posteriormente, incorporar el ligante bituminoso y el filler y proceder a amasar durante unos 30 segundos (o un 15% más del tiempo utilizado en el amasado de una mezcla convencional).

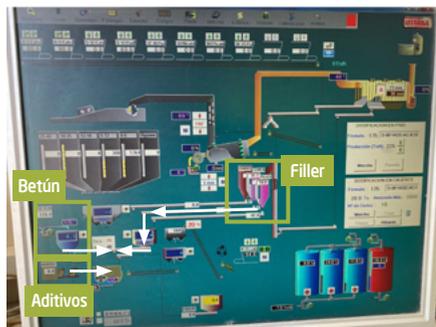
En relación con la temperatura, se recomienda utilizar temperaturas de fabricación de mezcla entre 5 y 10 °C superiores a las empleadas en una mezcla convencional. Para ello, se recomienda incrementar la temperatura de calentamiento de los áridos unos 10 °C y la del betún en unos 5 °C. No obstante, se recomienda que como alternativa a este incremento de temperatura se utilicen técnicas de fabricación de mezclas a baja temperatura, como ceras, tensoactivos o betún espumado.

### 3.5. Puesta en obra

Para garantizar una adecuada puesta en obra de las mezclas bituminosas con caucho por vía seca, es necesario prestar especial atención durante el transporte y extendido de las mezclas para que no pierdan excesiva temperatura, especialmente en climas fríos y cuando son extendidas en capas delgadas. Para ello, es necesario que las mezclas sean transportadas a la obra desde la planta directamente y sin retrasos, y que se garanticen unos trabajos continuos de extendido sin paradas, lo que supone un suministro constante de camiones en la obra. En general, las mezclas en caliente fabricadas con caucho por vía seca cuando son transportadas en grandes masas dentro de la bañera pueden mantener bien su temperatura hasta 2-3 horas, aunque su velocidad de enfriamiento dependerá de la temperatura de fabricación, de la temperatura ambiente y

de la capacidad de aislamiento de la bañera. No obstante, para evitar pérdidas de temperatura y proteger la mezcla de las inclemencias del tiempo (lluvia o viento), las bañeras deberán ir cubiertas con la lona, incluso en época estival.

Las mezclas bituminosas fabricadas con polvo de caucho por vía seca pueden ser puestas en obra con extendedoras y compactadores convencionales. No obstante, se recomienda utilizar extendedoras con tamperes de alta energía y presión uniforme (la regla aporta la primera compactación de la mezcla) y que se utilicen velocidades lo más constante posible para garantizar la homogeneidad del espesor de la capa.



**Figura 21. Detalle de la secuencia de amasado de mezclas con caucho por vía seca en plantas discontinuas**

Como en toda mezcla bituminosa, garantizar **una adecuada compactación** de las mezclas bituminosas fabricadas con caucho por vía seca **es clave** para evitar posteriores patologías como deformaciones permanentes, pérdidas de áridos, o fisuración por retracciones térmicas o fatiga. Al tratarse de mezclas menos trabajables, este tipo de materiales suelen ser más difíciles de compactar en obra y, por tanto, **es necesario emplear una mayor energía de compactación que con las mezclas tradicionales**, en torno a un 20-30% más de pasadas a igualdad de condiciones de compactación. La secuencia de compactación variará en función del tipo de mezcla. En cualquier caso, es necesario garantizar que la mezcla esté a una adecuada temperatura y que exista un buen riego de emulsión de adherencia entre capas para evitar movimientos durante la compactación. Asimismo, la velocidad de los compactadores debe adaptarse para garantizar tanto una buena producción acorde con el avance de la extendedora, como una circulación suave que evite la aparición de irregularidades y marcas. A continuación, se recogen algunas secuencias recomendadas en función del tipo de mezcla, aunque **cada caso de obra particular requerirá de un tramo de prueba para encontrar las condiciones de compactación óptimas**.



**Figura 22. Detalle de los posibles defectos producidos por el compactador de neumáticos**

### **3.5.1. Mezclas continuas tipo AC:**

- *Compactación Inicial:* es la que produce mayor densificación del material. Debe realizarse justo detrás de la extendedora a una temperatura de entre 125 y 150 °C, empleando una pasada (ida y vuelta) de rodillo vibratorio liso de entre 7.5 y 13 t.
- *Compactación Intermedia:* añade un 2-3% sobre la compactación conseguida en la etapa anterior y sirve para cerrar la mezcla. Para ello, se utilizan cuatro pasadas de compactador de neumático de entre 19 y 21 t. Al utilizar este compactador se corre el riesgo de que la mezcla se adhiera a las ruedas provocando defectos difíciles de solucionar. Por este motivo, la temperatura de entrada del compactador de neumático es clave, ya que por un lado ha de ser lo suficientemente alta como para garantizar la trabajabilidad de la mezcla (100-120 °C), pero por otro es recomendable que sea lo más baja posible para evitar que la mezcla se adhiera a las ruedas del compactador. Como solución alternativa, puede utilizarse algún líquido anti-adherente en el riego del compactador para evitar que la mezcla se pegue aun estando a temperaturas elevadas.
- *Compactación final:* se realiza para proporcionar una superficie suave y corregir posibles defectos del compactador neumático. Se suele hacer con dos pasadas de rodillo estático liso sin vibración a temperaturas más bajas, entre los 80 y 95 °C.

### **3.5.2. Mezclas con macrotextura abierta tipo BBTM, SMA o PA:**

En este tipo de mezclas únicamente se empleará un rodillo liso, de entre 7.5 y 13 t, que trabajará justo detrás de la extendedora aplicando una energía de compactación de dos pasadas (ida y vuelta) con vibración y, posteriormente, otras dos pasadas de terminación sin vibración cuando la mezcla se haya enfriado por debajo de los 120 °C.



# Bibliografía y normas de referencia

## 4

A continuación, se aporta la bibliografía y normativa técnica de referencia consultada en la elaboración del manual.

- Amirkhanian, S. (2013), "CRMB Pellets for Sustainable Road Infrastructure". NBM & CW; 3, Vol. 18 Issue 10.
- Auker, C. (2015), "Asphalt Rubber. The Arizona Experience". AZ Asphalt Rubber SOC.
- Bas Tutor, A. (2009), "Aplicación del granulado de caucho procedente de NFU en mezclas bituminosas. Claves para su desarrollo". I Jornada Europea sobre reciclado y valorización de neumáticos fuera de uso. Sevilla, mayo 2009.
- Bermejo-Muñoz, J. M., Gallego-Medina, J., & Saiz-Rodríguez, L. (2014), "Guía para la fabricación de betunes con polvo de neumático". SIGNUS ECOVALOR S.L., Madrid.
- CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) (2007), "Manual de Empleo de Caucho de NFU en Mezclas Bituminosas". Ministerio de Fomento y Ministerio de Medio Ambiente, mayo 2007.
- CEN/TS 16916 (2013), "Materiales obtenidos a partir de neumáticos al final de su vida útil – Determinación de los requerimientos específicos para el muestreo y la determinación del contenido de humedad mediante el método del secado en horno". Comité Europeo de Normalización (CEN).
- Centro de Investigación Elpidio Sánchez Marcos (CIESM) (2007), "Influencia del tamaño y contenido de triturado de NFUs en mezclas asfálticas fabricadas por vía seca". Informe de Ensayo nº 0707/152, diciembre 2007.
- Chehovits, J.G. (1989), "Design methods for hot-mixed asphalt-rubber concrete paving materials". Asphalt Rubber Producers Group National Seminar on Asphalt Rubber, Federal Highway, Administration, October 1989.

- Dantas, S., Farias, M., Pais, J., Pereira, P., & Sousa, J. (2005), "Influence of characteristics of crumb rubber and digestion time on the properties of asphalt rubber binders". *Road Materials and Pavement Design*, 10, 2-19.
- Dias, J., & Santos, L. (2008), "Characteristics of asphalt binders modified with the incorporation of recycled crumbled rubber". 3rd European Pavement and Asset Management Conference-EPA3, Coimbra, Portugal.
- European Tyre & Rubber Manufacturers Association (ETRMA). [www.etrma.org](http://www.etrma.org)
- Gallego, J., Marcobal, J. M., del Val, M. A. & Querol, N. (2009), "Análisis de la viabilidad técnica del reciclado en caliente de mezclas asfálticas con muy alto contenido de caucho de neumáticos fuera de uso". Proyecto Fénix.
- Gallego-Medina, J., & Saiz-Rodríguez, L. (2017), "Guía para la fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas con polvo de neumático". SIGNUS ECOVALOR S.L., Madrid.
- Gallego-Medina, J., Rodríguez-Ayoza, A. M., Saiz-Rodríguez, L. Pérez-Aparicio, R., Moreno-Navarro, F., & Rubio-Gámez, M.C. (2019), "Mezclas semicalientes con polvo de caucho procedente del neumático al final de su vida útil". SIGNUS ECOVALOR S.L., Madrid.
- García, C., Del Cerro, J., Hernández, M. J., & Hidalgo, A. (2008), "Investigación de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con PNFU para la reducción del ruido de rodadura". II Jornada Nacional de ASEFMA. Madrid, Spain.
- Hernández-Olivares, F., Witoszek-Schultz, B., Alonso-Fernández, M., & Benito-Moro, C. (2009), "Rubber-modified hot-mix asphalt pavement by dry process". *International Journal of Pavement Engineering*, 10(4), 277-288.
- Jiménez del Barco-Carrión, A., García-Travé, G., Moreno-Navarro, F., Martínez-Montes, G., & Rubio-Gámez, M. C. (2016), "Comparison of the effect of recycled crumb rubber and polymer concentration on the performance of binders for asphalt mixtures". *Materiales de Construcción*, 66(323), e090.
- León-Alonso, L. A., Saiz-Rodríguez, L., & Pérez-Aparicio, R. (2018), "20 años de mezclas asfálticas con polvo de neumático en las carreteras españolas". SIGNUS ECOVALOR S.L., Madrid.
- López, J., Grau, J. S. & Muñoz, E. (2009), "Relación de los Firmes Asfálticos Fabricados con Neumáticos Usados (PNFVU) y la Seguridad Vial. Firmes Ecoseguros". IV Jornada Nacional de ASEFMA. Madrid, Spain.
- McDonald, C. H. (1981), "Recollections of early asphalt-rubber history". In National Seminar on Asphalt-Rubber, October 1981.
- Moreno-Navarro, F., & Rubio-Gámez, M. C. (2012), "Influence of crumb rubber on the indirect tensile strength and stiffness modulus of hot bituminous mixes". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(6), 715-724.
- Moreno-Navarro, F., Rubio, M. C., & Martínez-Echevarría, M. J. (2011), "Analysis of digestion time and the crumb rubber percentage in dry-process crumb rubber modified hot bituminous mixes". *Construction and Building Materials*, 25(5), 2323-2334.

- Moreno-Navarro, F., Rubio, M. C., & Martínez-Echevarría, M. J. (2012), "The mechanical performance of dry-process crumb rubber modified hot bituminous mixes: The influence of digestion time and crumb rubber percentage". *Construction and Building Materials*, 26(1), 466-474.
- Moreno-Navarro, F., Rubio-Gómez, M. C., & Jiménez Del Barco-Carrión, A. (2016), "Tire crumb rubber effect on hot bituminous mixtures fatigue-cracking behaviour". *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(1), 65-72.
- Moreno-Navarro, F., Rubio-Gómez, M. C., & Jiménez Del Barco-Carrión, A. (2016), "Tire crumb rubber effect on hot bituminous mixtures fatigue-cracking behaviour". *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(1), 65-72.
- Moreno-Navarro, F., Sol, M., Martín, J., Pérez, M., & Rubio, M. C. (2013), "The effect of crumb rubber modifier on the resistance of asphalt mixes to plastic deformation". *Materials & Design*, 47, 274-280.
- Nota Técnica NT 02/2020 (2020), "Sustitución de un betún mejorado con caucho (BC) por la combinación de un betún de penetración y un aditivo de caucho en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente". Dirección General de Carreteras. Madrid 23/10/2020
- Pavements/Materials Conference (2012), Tempe, Arizona.
- Picado-Santos, L. G., Capitão, S. D., & Neves, J. M. (2020), "Crumb rubber asphalt mixtures: A literature review". *Construction and Building Materials*, 247, 118577 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118577>
- Presti, D. L. (2013), "Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review". *Construction and Building Materials*, 49, 863-881.
- Raad, L., Saboundjian, S., & Minassian, G. (2001), "Field aging effects on fatigue of asphalt concrete and asphalt-rubber concrete". *Transportation Research Record*, 1767(1), 126-134.
- Rahman, M. M., Airey, G. D., & Collop, A. C. (2005), "The mechanical properties of the dry process CRM asphalt mixtures following short-term and long-term ageing". Seventh International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Trondheim, Norway.
- Sacramento County- Department of Environmental Review and Assessment & Bollard & Brennan Inc. (1999), "Report on Status of Rubberized Asphalt Traffic Noise Reduction in Sacramento County". Sacramento County Public Work Agency, November 1999.
- Secretaría de Estado de Infraestructuras. Secretaría General de Infraestructuras, Dirección General de Carreteras (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)". Madrid, 11 de julio de 2007.
- Secretaría de Estado de Infraestructuras. Secretaría General de Infraestructuras, Dirección General de Carreteras (2009), "Orden Circular 21 bis/2009 sobre betunes mejorados y betunes modificados de alta viscosidad con caucho procedentes de neumáticos fuera de uso (NFU) y criterios a tener en cuenta para su fabricación in situ y almacenamiento en obra". Madrid, 23 de marzo de 2009.

- Secretaria de Estado de Infraestructuras. Secretaría General de Infraestructuras, Dirección General de Carreteras (2014), "Orden FOM/2523/2014 sobre el pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3). Artículos: 542 - Mezclas Bituminosas en Caliente Tipo Hormigón Bituminoso y 543 - Mezclas Bituminosas para Capas de Rodadura. Mezclas Drenantes y Discontinuas". Madrid, 3 de enero de 2015.
- Shatnawi, S. (2001), "Performance of asphalt rubber mixes in California". International Journal of Pavement Engineering, 2(1), 1-16.
- Shen, J., Amirkhanian, S., Xiao, F., & Tang, B. (2009), "Influence of surface area and size of crumb rubber on high temperature properties of crumb rubber modified binders". Construction and Building Materials, 23(1), 304-310.
- Singleton, T. M., Airey, G. D., Collop, A. C., & Widyatmoko, I. (2000), "Residual bitumen characteristics following dry process rubber-bitumen interaction". Proceedings of Asphalt Rubber 2000 Conference, Vilamoura, Portugal (pp. 463-482).
- Sol-Sánchez, M., del Barco Carrión, A. J., Hidalgo-Arroyo, A., Moreno-Navarro, F., Saiz, L., & del Carmen Rubio-Gámez, M. (2020), "Viability of producing sustainable asphalt mixtures with crumb rubber bitumen at reduced temperatures". Construction and Building Materials, 265, 120154.
- Sousa, J. B., Vorobiev, A., Ishai, I., & Svehchinsky, G. (2012), "Elastomeric asphalt extender-A new frontier on asphalt rubber mixes". In 5th International Asphalt Rubber Conference, Munich, Germany.
- State of California Department of Transportation (2005), "Feasibility of Recycling Rubber Modified Paving Materials". Materials Engineering and Testing Services, February 2005.
- State of California Department of Transportation (2006), "Asphalt Rubber Usage Guide". Materials Engineering and Testing Services, September 2006.
- Tahmoressi, M. (2001), "Evaluation of asphalt rubber pavements in Texas". PaveTex Engineering and Testing, Inc. Report prepared for Rubber Pavements Association, January 2001.
- UNE-CEN/TS 17188 (2019), "Materiales obtenidos a partir de neumáticos fuera de uso (NFU). Método de muestreo para granulados y polvos almacenados en big-bags". Comité Europeo de Normalización (CEN). Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid.
- UNE-CEN/TS 17189. (2018), "Materiales obtenidos a partir de neumáticos al final de su vida útil. Determinación de la densidad real de los granulados. Método basado en la picnometría del agua". Comité Europeo de Normalización (CEN) (Ratificada por la Asociación Española de Normalización en mayo de 2020.)
- UNE-EN 12697-12. (2019), "Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 12: Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa". Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.
- UNE-EN 12697-17. (2018), "Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo. Parte 17: Pérdida de partículas de probetas de mezclas bituminosas drenantes". Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.

- UNE-EN 12697-22. (2008), "Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 22: Ensayo de rodadura". Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.
- UNE-EN 12697-24 anexo D. (2019), "Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo. Parte 24: Resistencia a la fatiga". Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.
- UNE-EN 12697-26 anexo C. (2019), "Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26: Rigidez". Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.
- UNE-EN 12697-30 (2019), "Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo. Parte 30: Preparación de probetas mediante compactador de impactos". Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid.
- UNE-EN 12697-31 (2020), "Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo. Parte 31: Preparación de la muestra mediante compactador giratorio". Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid.
- UNE-EN 12697-45. (2013), "Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 45: Ensayo de rigidez a tracción tras acondicionamiento en saturación (SATS)". Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.
- UNE-EN 12697-46. (2013), "Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 46: Fisuración y propiedades a baja temperatura mediante ensayos de tracción uniaxial". Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.
- UNE-EN 12697-8. (2020), "Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo. Parte 8: Determinación del contenido de huecos en las probetas bituminosas". Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.
- UNE-EN 14243-2. (2019), "Materiales producidos a partir de neumáticos al final de su vida útil. Parte 2: Granulado y polvo. Métodos para la determinación de sus dimensiones e impurezas, incluyendo contenido de acero libre y textil libre". Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.
- UNE-EN Borrador de norma (2021), "Métodos de ensayo para mezclas bituminosas: Resistencia estructural y a la fisuración por fatiga (Método UGR-FACT)". Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.
- Van Kirk, J., & Holleran, G. (2000), "Reduced thickness asphalt rubber concrete leads to cost effective pavement rehabilitation". 1st International conference world of pavements, Sydney, Australia.



# Diseño de esqueleto mineral de mezclas bituminosas con polvo de caucho por vía seca

ANEXO



A modo de ejemplo, el presente anexo detalla las etapas a seguir en el diseño del esqueleto mineral de una **mezcla de tipo continuo AC 16 y otra de tipo discontinuo SMA 11**, fabricadas con polvo de caucho por vía seca. En este sentido, es importante tener en cuenta que los citados ejemplos son expuestos como guía para que los usuarios de este manual puedan proceder de forma similar y que no son formulaciones directamente aplicables a cualquier mezcla AC 16 o SMA 11, puesto que cada fórmula de trabajo deberá ser estudiada de forma particular en base a los materiales constituyentes.

## A.1. Selección de materiales

### A.1.1. Áridos

Las fracciones granulométricas de los áridos a utilizar dependerán del tipo de esqueleto mineral a diseñar. En base a estas consideraciones, para los ejemplos propuestos en este anexo se utilizaron las fracciones 12/18 mm, 6/12 mm y 0/6 mm de árido calizo para la mezcla AC 16, y las fracciones 4/12 mm porfídica y 0/2 mm caliza para la mezcla SMA 11. En ambos casos, la fracción polvo mineral (filler) seleccionada fue caliza. Las granulometrías de cada una de estas fracciones aparecen recogidas en las Tablas A.1 y A.2.

Tamices (mm)	Material que pasa (%)			
	12/18 mm	6/12 mm	0/6 mm	Filler Calizo
22	100	100	100	100
16	66	100	100	100
8	1	51	100	100
4	0.4	10	85	100
2	0.4	6	52	100
0.5	0.4	4	20	100
0.25	0.4	4	14	100
0.063	0.1	3	0	74

Tabla A.1. Granulometría de los áridos empleada para la mezcla AC 16

Tamices (mm)	Material que pasa (%)		
	4/12 mm	0/2 mm	Filler Calizo
16	100	100	100
11.2	97	100	100
8	70	100	100
4	3	100	100
2	2	84	100
0.5	0.1	41	100
0.063	0.1	9	74

**Tabla A.2. Granulometría de los áridos empleada para la mezcla SMA 11**

Asimismo, las Tablas A.3 y A.4 muestran las principales características de los áridos utilizados en los ejemplos, los cuales han de cumplir con las pertinentes prescripciones técnicas de la mezcla que se desee fabricar.

Ensayo	12/18 Calizo	6/12 Calizo	0/6 Calizo
Forma de las Partículas, Índice de Lajas (%) (EN 933-3: 2012)	12	14	-
Caras de Fractura (%) (EN 933-5:1999/A1:2005)	96	97	-
Coefficiente de Pulimento Acelerado (EN 1097-8: 2010)	52	52	-
Resistencia a la Fragmentación, Desgaste de Los Ángeles (%) (EN 1097-2: 2010)	8	8	-
Limpieza (Contenido de Impurezas) (%) (EN 933-1: 2012)	0.5	0.3	-
Equivalentede Arena(%) (EN933-8:2012+A1:2015/1M:2016)	-	-	77
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> ) (EN 1097-6:2014)	2.87	2.86	2.95
Absorción (%) (EN 1097-6:2014)	1.25	1.25	0.88

**Tabla A.3. Características de los áridos a utilizar en la mezcla AC 16**

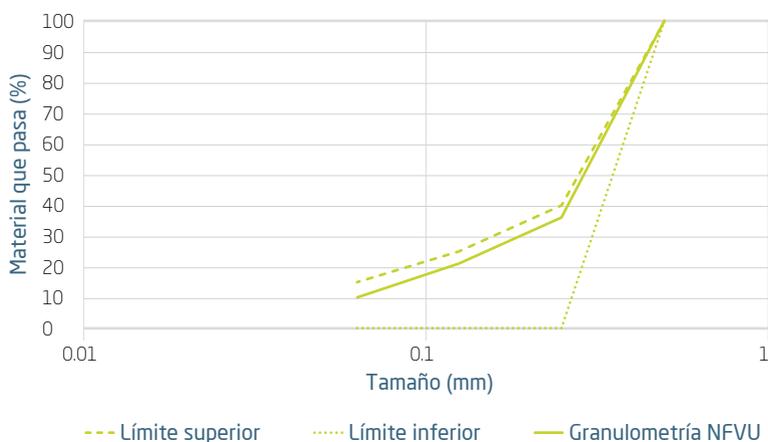
Ensayo	4/12 Pórfido	0/2 Calizo
Forma de las Partículas, Índice de Lajas (%) (EN 933-3: 2012)	8	-
Caras de Fractura (%) (EN 933-5:1999/A1:2005)	100	-
Coeficiente de Pulimento Acelerado (EN 1097-8: 2010)	56	-
Resistencia a la Fragmentación, Desgaste de Los Ángeles (%) (EN 1097-2: 2010)	11	-
Limpieza (Contenido de Impurezas) (%) (EN 933-1: 2012)	0.4	-
Equivalente de Arena (%) (EN 933-8:2012+A1:2015/1M:2016)	-	62
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> ) (EN 1097-6:2014)	3.26	2.96
Absorción (%) (EN 1097-6:2014)	0.20	0.70

**Tabla A.4. Características de los áridos a utilizar en la mezcla SMA 11**

### A.1.2. Polvo de caucho

El polvo de caucho utilizado tiene un tamaño máximo de 0.5 mm, aunque podrían estudiarse tamaños ligeramente superiores en función de las características del esqueleto mineral. Como especificaciones de referencia se pueden contemplar las recogidas en este manual (apartado 3.1).

Además, la granulometría del polvo de caucho deberá estar comprendida dentro de los husos recogidos en la Figura A.1, donde también aparece la distribución de tamaños del caucho utilizado en este ejemplo, el cual poseía una densidad de 1.03 g/cm<sup>3</sup>.



**Figura A.1. Distribución granulométrica del polvo de caucho**

## A.2. Diseño del esqueleto mineral

El correcto diseño del esqueleto mineral resulta fundamental a la hora de garantizar el éxito de las mezclas fabricadas con caucho por vía seca. Por este motivo, en esta sección se abordarán los aspectos principales a tener en cuenta cuando se combinan áridos naturales y polvo de caucho procedente de NFVU.

El diseño del esqueleto mineral de las mezclas debe llevarse a cabo en base a las granulometrías de cada una de las fracciones seleccionadas y a los husos prescritos en la normativa técnica de aplicación. La Figura A.2 muestra los husos granulométricos de las dos mezclas estudiadas a modo de ejemplo en este anexo (AC 16 y SMA 11) recogidos en la normativa PG-3. Analizando ambos esqueletos, se pueden observar diferencias significativas entre ellos como:

- Tamaño máximo de árido: es superior en la mezcla AC 16.
- Distribución de tamaños: es más heterogénea en la mezcla AC 16, con un contenido similar de cada tamaño de partícula.

- Contenido de grava: puede ser hasta un 30% mayor en la mezcla SMA 11.
- Contenido de arena: es mayor en el caso de la mezcla AC 16, especialmente en tamaños superiores a 0.5 mm.
- Contenido de polvo mineral: es más del doble en la mezcla SMA 11.

Como se puede observar, en función del tipo de mezcla a diseñar las características del esqueleto mineral pueden ser muy diferentes, lo que tendrá como consecuencia distintos rangos de contenidos de huecos en mezcla y ligante. En el caso de los ejemplos analizados se han seleccionado dos mezclas con las mismas prescripciones para el contenido de huecos en mezcla (entre 4% y 6% según los artículos 542 y 544 del PG-3), pero diferentes contenidos mínimos de ligante (4.5% para el caso de las mezclas AC 16 y 5.8% para el caso de las mezclas SMA 11). Así, dos mezclas con un mismo contenido de huecos objetivo, tienen una diferencia del 1.3% en el contenido mínimo de betún (casi el 25% en términos relativos). Este hecho se debe a que la distribución y tamaño de huecos no es la misma en ambos esqueletos, ya que el tamaño y superficie específica de sus partículas minerales es diferente.

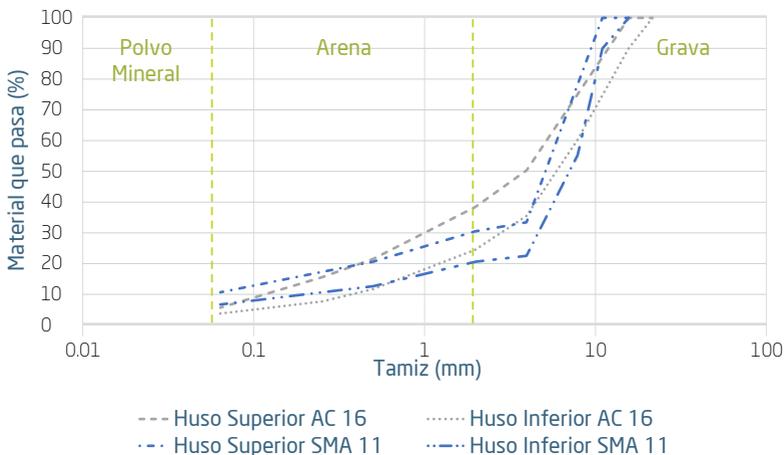


Figura A.2. Husos granulométricos de las mezclas AC 16 y SMA 11 según PG-3

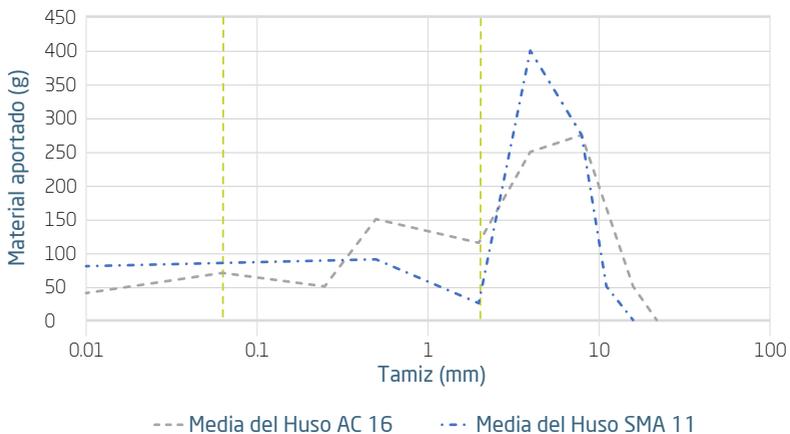
Para que un esqueleto mineral presente un bajo contenido de huecos, las partículas minerales han de encajar entre sí como un puzzle, de forma que los huecos generados por las partículas de mayor tamaño sean ocupados por las de un tamaño inferior que entren en dichos huecos sin distorsionar el contacto entre los áridos de mayor tamaño. Este tipo de esqueletos minerales poseen una granulometría continua (con un coeficiente de uniformidad elevado) y dejan poco espacio para albergar el ligante bituminoso. Por ello, resulta difícil dosificar mezclas tipo AC con contenidos de ligante elevados.

Por el contrario, si un esqueleto mineral presenta una distribución de tamaños homogénea, es decir, formada principalmente por partículas de un mismo tamaño (coeficientes de uniformidad bajos), el esqueleto resultante presentará un elevado contenido de huecos siendo capaz de albergar mayores cantidades de ligante siempre y cuando se incorporen partículas/aditivos de elevada superficie específica capaces de retener dicho ligante y así evitar que migre y se produzcan exudaciones. Estas partículas o aditivos deberán tener elevada superficie específica y un tamaño que no interfiera en el esqueleto mineral. Principalmente se utiliza arena inferior a 0.5 mm y filler, o estabilizadores como las fibras. Así, en función de la cantidad de ligante y

partículas finas/aditivos, los huecos podrán quedarse libres, dando lugar a una mezcla con un elevado contenido de huecos, como en las mezclas PA o BBTM B donde el contenido de betún aportado y de partículas finas/aditivos estabilizadores es bajo. O por el contrario, pueden rellenarse dando lugar a una mezcla más cerrada, como en las mezclas SMA donde el contenido de betún aportado y de partículas finas o aditivos tipo fibras es elevado.

En base a estas consideraciones, se analizará la cantidad de partículas de cada tamaño que se incorporarían en 1 kg de mezcla tipo AC 16 o SMA 11 con un esqueleto mineral que estuviera encajado en el centro de sus respectivos husos (Figura A.3).

En el caso de la mezcla AC 16 se puede observar cómo algo más de la mitad de su esqueleto mineral (unos 525 g) estaría formado por partículas de tamaño en torno a 4-16 mm, cuyos huecos estarían ocupados por partículas de tamaño arena (de un tamaño dominante entre 0.5 y 2 mm, que supondrían en torno a una cuarta parte, 265 g, del total de las partículas del esqueleto), y a su vez los huecos dejados por éstas últimas estarían ocupados por partículas finas de tamaño dominante entre 0.063 y 0.25 mm (que supondrían en torno a una octava parte, 120 g, del total de las partículas del esqueleto mineral).

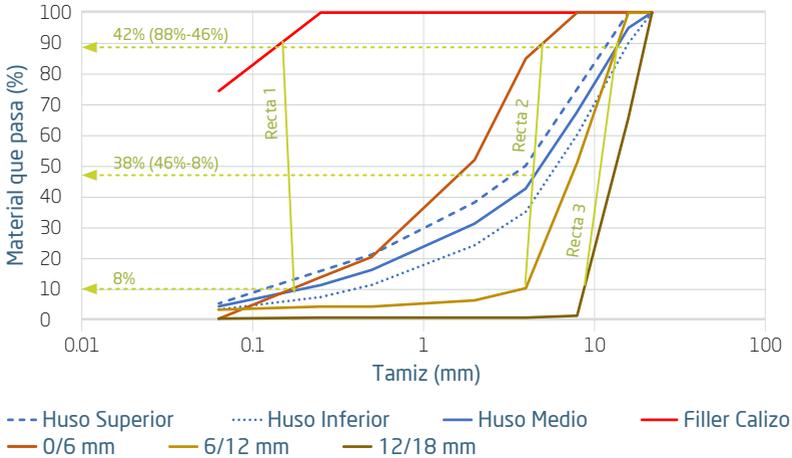


**Figura A.3. Material medio aportado de cada tamaño de partícula en los husos granulométricos de las mezclas AC 16 y SMA 11**

En la mezcla SMA 11 la cantidad de partículas en torno a 4-8 mm sería muy superior (unos 675 g, casi un 70% del total del esqueleto), por lo que la cantidad de huecos asociados a dichos tamaños de partícula serían superiores a los de la mezcla AC 16. No obstante, la cantidad de partículas tamaño arena entre 0.5 y 2 mm sería considerablemente menor a las de la mezcla continua (en torno a 115 g), y por tanto, los huecos generados por los tamaños 4-8 mm quedarían menos rellenos por partículas minerales, dejando más espacio para albergar partículas finas que en el caso de la mezcla AC 16. Por este motivo, la incorporación de partículas de elevada superficie específica como el polvo de caucho en esqueletos minerales tipo AC 16 sería más complicado (siendo necesario reducir parte de las existentes en su esqueleto para generar espacios) que en el caso de mezclas tipo SMA 11 (donde parte de los espacios generados están aún sin ocupar). Además, para poder mantener un contenido de huecos en mezcla similar al de la AC 16 (entre 4 y 6%), en la mezcla SMA 11 hay que recurrir a contenidos de betún más elevados (tal y como ponen de manifiesto los contenidos mínimos de betún para ambas mezclas en el PG-3) y, por ende, hay que incorporar una mayor cantidad de partículas de elevada superficie específica (por debajo de 0.25 mm) para poder retener dichas cantidades de betún.

Partiendo de las granulometrías para las fracciones de áridos estudiadas en el ejemplo propuesto (Tablas A.1 y A.2), se realizará su encaje granulométrico en los respectivos husos (AC 16 y SMA 11). Existen varias formas de llevar a cabo el encaje de un esqueleto mineral. Si el técnico encargado de realizarlo es experimentado, podrá hacerlo por tanteo de las proporciones de las distintas fracciones. No obstante, para aquellos técnicos que no tengan experiencia, se recomienda utilizar el método gráfico, y si se desea, ajustar posteriormente el resultado con pequeños ajustes por tanteo.

Una de las formas más sencillas de diseñar el esqueleto mineral de una mezcla es representar cada una de las curvas asociadas a las fracciones granulométricas que se tienen, así como la curva objetivo que se desea conseguir (por ejemplo, el centro del huso de la mezcla objetivo, en este caso una mezcla AC 16, tal y como aparece en la Figura A.4 como Huso Medio). Posteriormente, mediante una recta (Recta 1) se une el punto de corte del 90% de material que pasa de la fracción de menor tamaño (en este caso Filler Calizo), con el 10% de material que pasa de la fracción que le sigue en tamaño (fracción 0/6 mm). El punto donde corte con la



**Figura A.4. Ejemplo de ajuste gráfico del esqueleto mineral de una mezcla AC 16**

curva objetivo (Huso Medio), será la cantidad de material a aportar en el esqueleto de la fracción de menor tamaño. En este caso, la cantidad a aportar de Filler Calizo debería ser 8%. El proceso se repetirá para las siguientes fracciones consecutivas, de tal manera que se unirá mediante una recta (Recta 2) el 90% de material que pasa de la fracción 0/6 mm con el 10% de la fracción 6/12 mm, y el 90% de material que pasa de la fracción 6/12 mm con el 10% de la fracción 12/18 mm (Recta 3). La cantidad de material a aportar de la fracción 0/6 mm será la marcada por el punto de corte de la Recta 2 con la curva objetivo (Huso Medio) menos la cantidad

previamente definida para la fracción anterior (en el ejemplo, la cantidad de material 0/6 mm sería  $46\% - 8\% = 38\%$ ). Asimismo, la cantidad de material a aportar de la fracción 6/12 mm será la marcada por el punto de corte de la Recta 3 con la curva objetivo menos la cantidad previamente definida para las fracciones anteriores (en este caso, la cantidad de material 6/12 mm sería  $88\% - 46\% = 42\%$ ). Finalmente, el material a aportar de la fracción de mayor tamaño (12/18 mm) será el resultante de restar a 100 el punto de corte de la última recta de ajuste (es decir, en este caso sería  $100 - 88\% = 12\%$ ).



A partir de estos porcentajes y de las granulometrías de cada fracción se determina la granulometría combinada mediante la suma ponderada de cada fracción y tamiz con los porcentajes elegidos, Tabla A.5, que conformará el esqueleto mineral de la mezcla. Como puede observarse en la Figura A.5, esta metodología

hace que la granulometría combinada obtenida se ajuste en gran medida a la curva de referencia (en este caso el centro del huso de las mezclas AC 16). Así, solo quedaría hacer algún pequeño ajuste por tanteo para terminar de cuadrarla, como se explica a continuación.

Tamices (mm)	12/18 mm	6/12 mm	0/6 mm	Filler Calizo	Granulometría Combinada
22	100	100	100	100	<b>100.0</b>
16	65.6	100	100	100	<b>95.9</b>
8	1	51	100	100	<b>67.5</b>
4	0.4	10	85	100	<b>44.5</b>
2	0.4	6	51.9	100	<b>30.3</b>
0.5	0.4	4	20.2	100	<b>17.4</b>
0.25	0.4	4	13.6	100	<b>14.9</b>
0.063	0.1	3	0	74	<b>7.2</b>
Dosificación en Peso	12.00%	42.00%	38.00%	8.00%	

Tabla A.5. Granulometría combinada de la mezcla AC 16

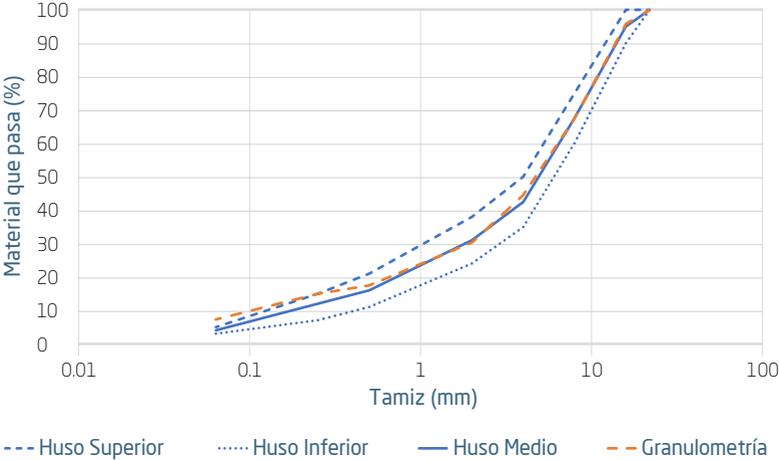


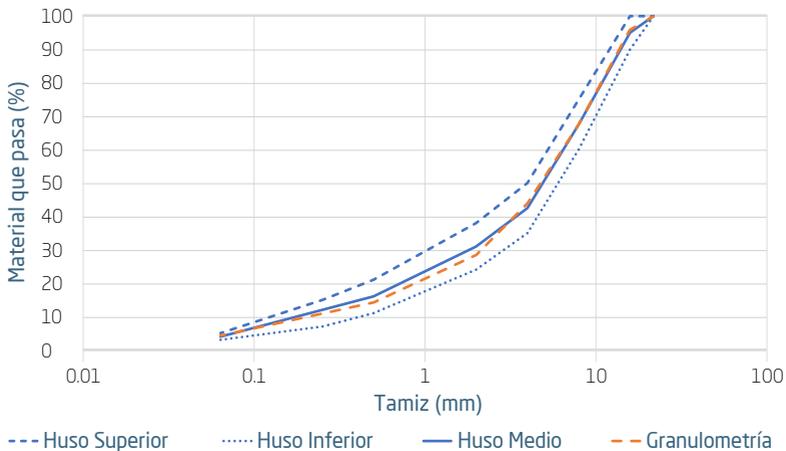
Figura A.5. Representación gráfica de la granulometría combinada de la mezcla AC 16

El tanteo a realizar para mejorar el ajuste de la granulometría a la curva objetivo deberá ir encaminado a reducir la cantidad de partículas finas del esqueleto mineral (inferiores al tamaño 0.5 mm). Para ello, se reducirá el contenido de Filler de la mezcla a la mitad (pasando del 8% al 4%) y se compensará con fracción

arena (pasando del 38% al 42%, Tabla A.6). Como se puede observar en la Figura A.6, este segundo ajuste conseguido tras el tanteo es lo suficientemente similar a la curva objetivo como para darlo por válido.

Tamices (mm)	12/18 mm	6/12 mm	0/6 mm	Filler Calizo	Granulometría Combinada Ajustada
22	100	100	100	100	<b>100.0</b>
16	65.6	100	100	100	<b>95.9</b>
8	1	51	100	100	<b>67.5</b>
4	0.4	10	85	100	<b>43.9</b>
2	0.4	6	51.9	100	<b>28.4</b>
0.5	0.4	4	20.2	100	<b>14.2</b>
0.25	0.4	4	13.6	100	<b>11.4</b>
0.063	0.1	3	0	74	<b>4.2</b>
Dosificación en Peso	12.00%	42.00%	42.00%	4.00%	

**Tabla A.6. Granulometría combinada ajustada de la mezcla AC 16**



**Figura A.6. Representación gráfica de la granulometría combinada ajustada de la mezcla AC 16**

Si procediéramos de la misma forma en el caso de la mezcla SMA 11 del ejemplo obtendríamos que la cantidad de filler a aportar en la mezcla sería del 8%, la cantidad arena 0/2 mm del 20% y la cantidad de grava 4/12 mm del 72% (Figura A.7). A partir de dichos porcentajes y de las granulometrías de cada fracción se obtiene la granulometría combinada que conformará el esqueleto mineral de la mezcla (Tabla A.7). Como puede observarse en la Figura A.8, la granulometría combinada obtenida se ajusta bastante bien en la parte fina de la curva de referencia (el centro del huso de las mezclas SMA 11), pero difiere algo más

en la fracción grava (del tamiz 2 mm hacia arriba). No obstante, dada la granulometría de la fracción 4/12 mm (con poco contenido de grueso por encima de la fracción 8 mm), la curva obtenida sería difícilmente mejorable por tanteo, y por tanto habría que buscar otra alternativa como por ejemplo sustituir la fracción 4/12 mm por la fracción 6/12 mm utilizada en el ejemplo de la mezcla AC 16. La Figura A.9 muestra un ajuste con un 75% de la citada fracción 6/12 mm, el 19% de arena 0/2 mm y el 6% de filler. En la Tabla A.8 se muestra el resultado final de la granulometría del esqueleto mineral para la mezcla SMA 11.

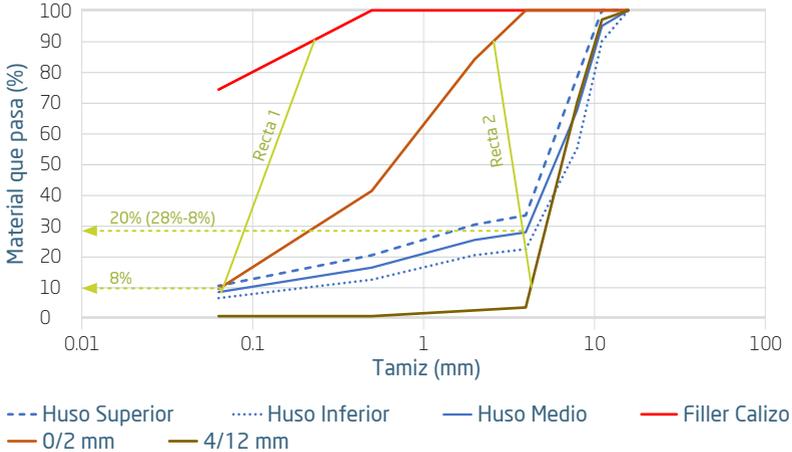
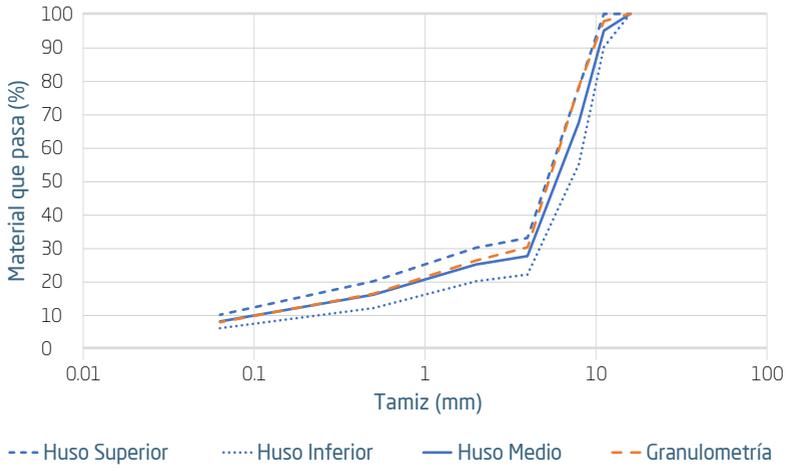


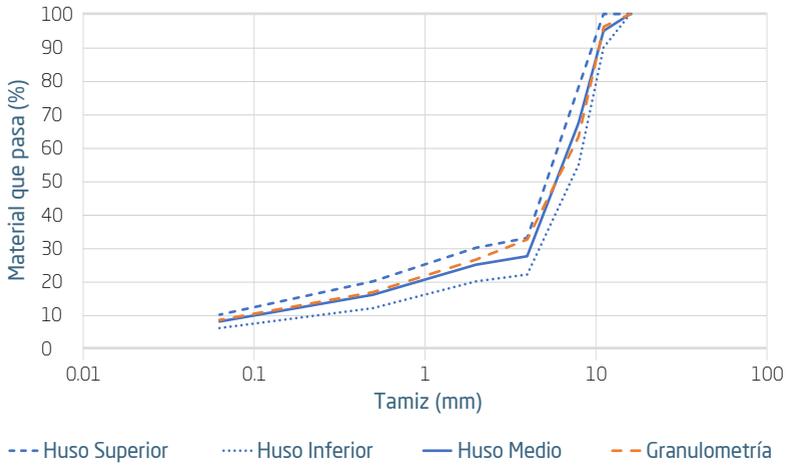
Figura A.7. Ejemplo de ajuste gráfico del esqueleto mineral de una mezcla SMA 11

Tamices (mm)	4/12 mm	0/2 mm	Filler Calizo	Granulometría Combinada
16	100	100	100	<b>100.0</b>
11.2	97	100	100	<b>97.8</b>
8	70	100	100	<b>78.4</b>
4	3	100	100	<b>30.2</b>
2	2	84	100	<b>26.2</b>
0.5	0.1	41	100	<b>16.3</b>
0.063	0.1	9	74	<b>7.8</b>
Dosificación en Peso	72.00%	20.00%	8.00%	

Tabla A.7. Granulometría combinada de la mezcla SMA 11



**Figura A.8. Representación gráfica de la granulometría combinada de la mezcla SMA 11**



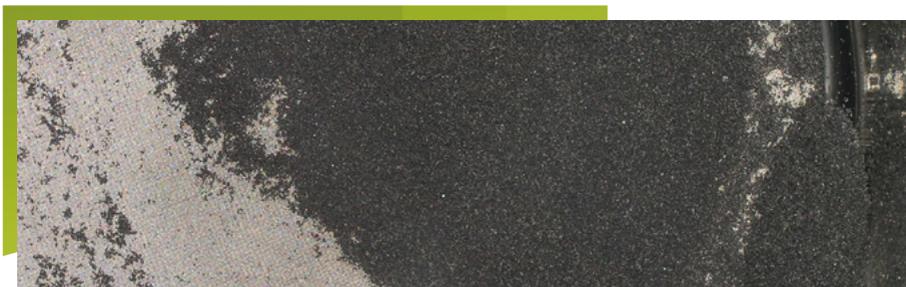
**Figura A.9. Representación gráfica de la granulometría combinada de la mezcla SMA 11 realizada con la fracción 6/12 mm (Tabla A.1)**

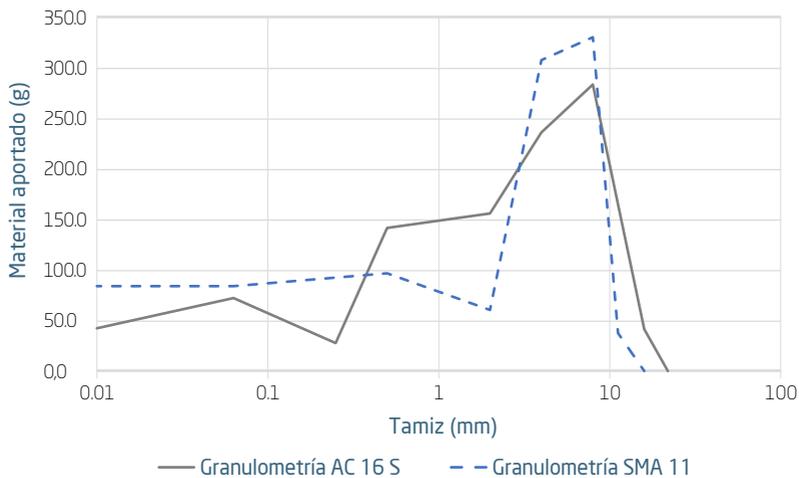
Tamices (mm)	6/12 mm	0/2 mm	Filler Calizo	Granulometría Combinada
16	100	100	100	<b>100.0</b>
11.2	95	100	100	<b>96.3</b>
8	51	100	100	<b>63.3</b>
4	10	100	100	<b>32.5</b>
2	6	84	100	<b>26.5</b>
0.5	4	41	100	<b>16.8</b>
0.063	3	9	74	<b>8.4</b>
Dosificación en Peso	75.00%	19.00%	6.00%	

**Tabla A.8. Granulometría combinada ajustada de la mezcla SMA 11**

Si analizamos la cantidad de material aportado de cada tamaño por los esqueletos diseñados para 1 kg de áridos, observaremos que a pesar de poseer un contenido de huecos objetivo similar (4-6% en mezcla), la mezcla AC 16 tiene un mayor aporte de material de tamaño entre 0.5 y 8 mm, mientras que la mezcla SMA 11 tiene un mayor aporte entre 4 y 11 mm. Además, la mezcla SMA 11 tiene un aporte mayor de partículas de superficie específica elevada (tamaño inferior a 0.5 mm) en comparación con el esqueleto de la AC 16. En base a estas consideraciones y a la vista de los contenidos mínimos de betún utilizados en estos tipos de mezclas, puede entenderse que la cantidad de partículas inferiores a 0.5 mm utilizadas en la SMA 11 generan suficiente superficie específica como para retener contenidos de ligante más elevados. No obstante, la superficie específica generada por estas partículas no viene determinada por la cantidad en peso de éstas sino por su volumen.

El volumen de partículas aportadas por el esqueleto mineral dependerá directamente de la densidad de éstas. Así, para una misma cantidad en masa de partículas de un tamaño determinado, los áridos que posean una densidad más elevada aportarán un volumen inferior de partículas, mientras que los áridos de baja densidad aportarán una mayor cantidad de volumen y, por tanto, una mayor superficie específica. Este hecho puede tener un elevado impacto cuando se diseñan esqueletos minerales con diversidad de densidades en los áridos utilizados puesto que puede existir una descompensación de volúmenes de los tamaños de áridos que revierta en problemas posteriores en la mezcla (falta de betún, dificultad de compactación, baja cohesión, etc.). Este es el caso de las mezclas con polvo de caucho por vía seca, donde los áridos minerales suelen tener densidades en torno a 2.65 t/m<sup>3</sup>, mientras que el polvo de caucho tiene densidades en torno a 1.1 t/m<sup>3</sup>.





**Figura A.10. Material aportado de cada tamaño de partícula para las granulometrías combinadas ajustadas de las mezclas AC 16 y SMA 11**

Continuando con los ejemplos anteriores, si se fabricaran las mezclas AC 16 y SMA 11 con un 1.0% de polvo de caucho por vía seca, y se procediera a diseñar su esqueleto en peso, lo lógico sería sustituirlo por el 1.0% de la fracción arena ya que es la fracción más parecida al tamaño del polvo de caucho. Las Tablas A.9 y A.10 muestran cómo

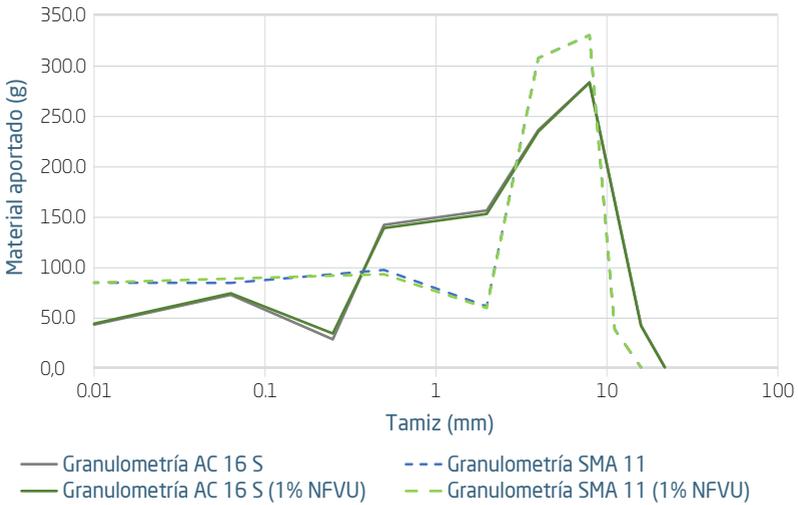
quedarían los encajes de ambas mezclas. Además, dado que en los encajes en peso no se tiene en cuenta la diferencia de densidad de los materiales que componen el esqueleto mineral, las curvas de material aportado para cada tamaño a penas se verían afectadas con respecto a las curvas originales (Figura A.11).

Tamices (mm)	12/18 mm	6/12 mm	0/6 mm	Polvo de Caucho	Filler Calizo	Granulometría Combinada
22	100	100	100	100	100	<b>100.0</b>
16	65.6	100	100	100	100	<b>95.9</b>
8	1	51	100	100	100	<b>67.5</b>
4	0.4	10	85	100	100	<b>44.1</b>
2	0.4	6	51.9	100	100	<b>28.8</b>
0.5	0.4	4	20.2	100	100	<b>15.0</b>
0.25	0.4	4	13.6	100	100	<b>12.3</b>
0.063	0.1	3	0	10	74	<b>5.2</b>
Dosificación en Peso	12.00%	42.00%	41.00%	1.00%	4.00%	

**Tabla A.9. Granulometría combinada de la mezcla AC 16 con polvo de caucho**

Tamices (mm)	6/12 mm	0/2 mm	Polvo de caucho	Filler Calizo	Granulometría Combinada
16	100	100	100	100	<b>100.0</b>
11.2	95	100	100	100	<b>96.3</b>
8	51	100	100	100	<b>63.3</b>
4	10	100	100	100	<b>32.5</b>
2	6	84	100	100	<b>26.6</b>
0.5	4	41	100	100	<b>17.4</b>
0.063	3	9	10	74	<b>8.4</b>
Dosificación en Peso	75.00%	18.00%	1.00%	6.00%	

**Tabla A.10. Granulometría combinada de la mezcla SMA 11 con polvo de caucho**

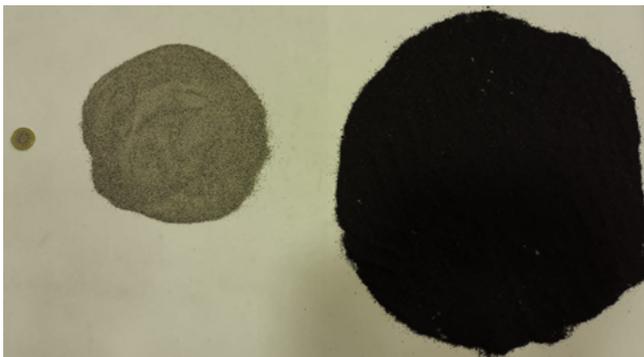


**Figura A.11. Comparativa del material aportado de cada tamaño de partícula para las granulometrías combinadas ajustadas de las mezclas AC 16 y SMA 11 con y sin polvo de caucho**



No obstante, como ya se ha comentado anteriormente es importante tener presente que debido a la diferencia entre la densidad de la arena ( $2.68 \text{ g/cm}^3$ ) y el polvo de caucho ( $1.1 \text{ g/cm}^3$ ), a igualdad de peso entre ambos, el caucho aporta una mayor cantidad de partículas que rivalizan por un espacio en el esqueleto mineral, además de una mayor cantidad de superficie específica a recubrir por el betún. Por este motivo, al sustituir el 1.0% en peso de la arena por el 1.0% en peso del polvo de caucho, estamos alterando el equilibrio del esqueleto mineral, puesto que incrementamos la cantidad de partículas que incorporamos al esqueleto mineral. Esto puede suponer un problema para

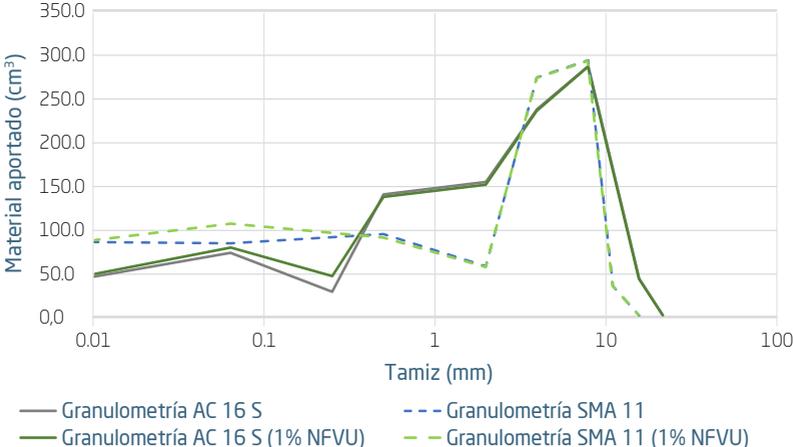
su compactación o su cohesión en caso de que no haya huecos suficientes para albergarlas o suficiente contenido de betún para cubrir el incremento de superficie específica. Este hecho queda de manifiesto en la Figura A.12, donde se muestra la superficie ocupada por 100 g de cada uno de estos materiales. En ella se observa, que el círculo generado por 100 g de arena de tamaño máximo 0.5 mm tiene un diámetro de unos 18 cm y un área estimada de unos  $255 \text{ cm}^2$ , mientras que el círculo generado por 100 g de polvo de caucho de tamaño máximo 0.5 mm tiene un diámetro de unos 31 cm y un área estimada de unos  $755 \text{ cm}^2$  (casi tres veces el área de la arena).



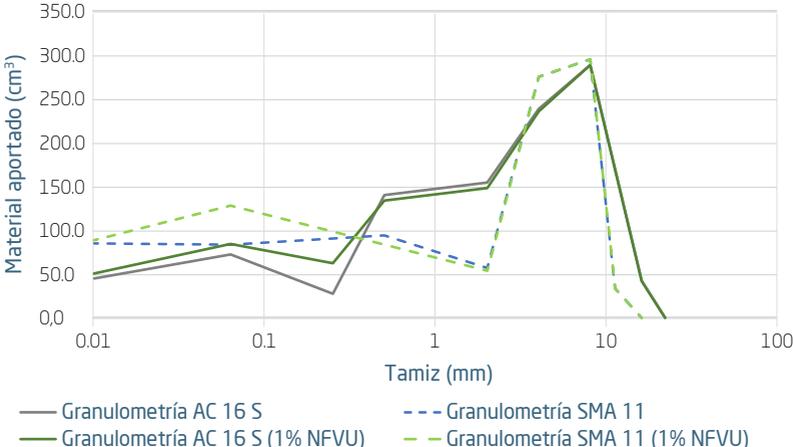
**Figura A.12. Comparativa de la superficie ocupada por 100 g de arena (izquierda) y 100 g de polvo de caucho (derecha)**

Por este motivo, al analizar el volumen de material aportado en cada tamaño de árido observamos que al sustituir el 1% o 2% del peso de la arena por polvo de caucho tiene lugar un incremento considerable del volumen de partículas de tamaño 0-0.5 mm (Figuras A.13 y A.14). Para el caso de los ejemplos analizados, sustituir el 1% o 2% en peso del esqueleto se corresponderían con cambiar 10 o 20 g de arena por 10 o 20 g de caucho. Esto hecho en términos de volumen se

traduciría en cambiar unos 3.7 cm<sup>3</sup> de arena por 9.1 cm<sup>3</sup> de caucho, o en cambiar unos 7.5 cm<sup>3</sup> de arena por 18.2 cm<sup>3</sup> de caucho. Este incremento de partículas (de casi 2.5 veces) concentradas en un mismo tamaño genera un impacto considerable en los esqueletos diseñados y especialmente en el de la mezcla AC 16, puesto que no dispone de los huecos suficientes para albergar tal cantidad de partículas de dicho tamaño, ni el incremento en el volumen de betún para garantizar su envuelta.



**Figura A.13. Comparativa del volumen de material aportado de cada tamaño de partícula para las granulometrías combinadas ajustadas de las mezclas AC 16 y SMA 11 convencionales y con 1% en masa de polvo de caucho**



**Figura A.14. Comparativa del volumen de material aportado de cada tamaño de partícula para las granulometrías combinadas ajustadas de las mezclas AC 16 y SMA 11 convencionales y con 2% en masa de polvo de caucho**



Por estos motivos, para realizar un adecuado diseño del esqueleto mineral de mezclas con polvo de caucho por vía seca, **éste debe llevarse a cabo en volumen** (en lugar de en peso). Como durante la fabricación de la mezcla los materiales no se pueden dosificar en volumen, en primer lugar se fijará la masa del esqueleto mineral a diseñar y se partirá de una dosificación en peso de la mezcla sin caucho que cumpla con la granulometría que deseamos realizar.

Posteriormente, se determinarán las cantidades en peso de cada tamaño de material y fracción granulométrica, es decir, el material retenido en cada tamiz, y finalmente, estas cantidades se dividirán entre las densidades de los áridos utilizados (obteniendo así el volumen de partículas de cada tamaño). El sumatorio del volumen de todos los tamices de la granulometría combinada, nos dará de forma estimada el volumen de partículas minerales utilizado en la mezcla (volumen total). Las Tablas A.11 y A.12 muestran este proceso para los ejemplos vistos en este anexo (SMA 11 y AC 16). Se ha partido de las granulometrías en masa anteriormente calculadas para cada mezcla (Tabla A.6 para la mezcla AC 16 y Tabla A.8 para la mezcla SMA 11) considerando una masa total de esqueleto mineral de 1000 g.

Cantidad de áridos (g)	1000					
Densidades (g/cm <sup>3</sup> )	2.87	2.86	2.95	1.03	2.71	1.65
<b>Tamices (mm)</b>	<b>12/18 mm</b>	<b>6/12 mm</b>	<b>0/6 mm</b>	<b>Polvo de Caucho</b>	<b>Filler Calizo</b>	<b>Granulometría Combinada</b>
22	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	<b>100.0</b>
16	65.6	100.0	100.0	100.0	100.0	<b>95.9</b>
8	1.0	51.0	100.0	100.0	100.0	<b>67.5</b>
4	0.4	10.0	85.0	100.0	100.0	<b>43.9</b>
2	0.4	6.0	51.9	100.0	100.0	<b>28.4</b>
0.5	0.4	4.0	20.2	100.0	100.0	<b>14.2</b>
0.25	0.4	4.0	13.6	36.0	100.0	<b>11.4</b>
0.063	0.1	3.0	0.0	10.0	74.0	<b>4.2</b>
Dosificación en Peso	12.00%	42.00%	42.00%	0.00%	4.00%	<b>0.4</b>

#### Material que pasa por tamiz (g)

Tamices (mm)	12/18 mm	6/12 mm	0/6 mm	Polvo de Caucho	Filler Calizo	Granulometría Combinada
22	120.0	420.0	420.0	0.0	40.0	<b>1000.0</b>
16	78.7	420.0	420.0	0.0	40.0	<b>958.7</b>
8	1.2	214.2	420.0	0.0	40.0	<b>675.4</b>
4	0.5	42.0	357.0	0.0	40.0	<b>439.5</b>
2	0.5	25.2	218.0	0.0	40.0	<b>283.7</b>
0.5	0.5	16.8	84.8	0.0	40.0	<b>142.1</b>
0.25	0.5	16.8	57.1	0.0	40.0	<b>114.4</b>
0.063	0.1	12.6	0.0	0.0	29.6	<b>42.3</b>

#### Material retenido por tamiz (g)

Tamices (mm)	12/18 mm	6/12 mm	0/6 mm	Polvo de Caucho	Filler Calizo	Granulometría Combinada
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>0.0</b>
16	41.3	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>41.3</b>
8	77.5	205.8	0.0	0.0	0.0	<b>283.3</b>
4	0.7	172.2	63.0	0.0	0.0	<b>235.9</b>
2	0.0	16.8	139.0	0.0	0.0	<b>155.8</b>
0.5	0.0	8.4	133.1	0.0	0.0	<b>141.5</b>
0.25	0.0	0.0	27.7	0.0	0.0	<b>27.7</b>
0.063	0.4	4.2	57.1	0.0	10.4	<b>72.1</b>
Fondo	0.1	12.6	0.0	0.0	29.6	<b>42.3</b>
Masa total (g)	120	420	420	0	40	<b>1000</b>

#### Material retenido en volumen por tamiz (cm<sup>3</sup>)

Tamices (mm)	12/18 mm	6/12 mm	0/6 mm	Polvo de Caucho	Filler Calizo	Granulometría Combinada
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>0.0</b>
16	14.4	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>14.4</b>
8	27.0	72.0	0.0	0.0	0.0	<b>99.0</b>
4	0.3	60.2	21.4	0.0	0.0	<b>81.8</b>
2	0.0	5.9	47.1	0.0	0.0	<b>53.0</b>
0.5	0.0	2.9	45.1	0.0	0.0	<b>48.1</b>
0.25	0.0	0.0	9.4	0.0	0.0	<b>9.4</b>
0.063	0.1	1.5	19.4	0.0	3.8	<b>24.8</b>
Fondo	0.0	4.4	0.0	0.0	10.9	<b>15.4</b>
<b>Volumen total (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>41.8</b>	<b>146.9</b>	<b>142.4</b>	<b>0.0</b>	<b>14.8</b>	<b>345.8</b>

**Tabla A.11. Cálculo del volumen del esqueleto mineral de la mezcla AC 16 sin polvo de caucho**

Cantidad de áridos (g)	1000				
Densidades (g/cm <sup>3</sup> )	3.259	2.955	1.03	2.71	
<b>Tamices (mm)</b>	<b>6/12 mm</b>	<b>0/2 mm</b>	<b>Polvo de Caucho</b>	<b>Filler Calizo</b>	<b>Granulometría Combinada</b>
16	100.0	100.0	100.0	100.0	<b>100.0</b>
11.2	95.0	100.0	100.0	100.0	<b>96.3</b>
8	51.0	100.0	100.0	100.0	<b>63.3</b>
4	10.0	100.0	100.0	100.0	<b>32.5</b>
2	6.0	84.0	100.0	100.0	<b>26.5</b>
0.5	4.0	41.0	100.0	100.0	<b>16.8</b>
0.063	3.0	9.0	10.0	74.0	<b>8.4</b>
Dosificación en Peso	75.00%	19.00%	0.00%	6.00%	

#### Material que pasa por tamiz (g)

Tamices (mm)	6/12 mm	0/2 mm	Polvo de Caucho	Filler Calizo	Granulometría Combinada
16	750.0	190.0	0.0	60.0	<b>1000.0</b>
11.2	712.5	190.0	0.0	60.0	<b>962.5</b>
8	382.5	190.0	0.0	60.0	<b>632.5</b>
4	75.0	190.0	0.0	60.0	<b>325.0</b>
2	45.0	159.6	0.0	60.0	<b>264.6</b>
0.5	30.0	77.9	0.0	60.0	<b>167.9</b>
0.063	22.5	17.1	0.0	44.4	<b>84.0</b>

#### Material retenido por tamiz (g)

Tamices (mm)	6/12 mm	0/2 mm	Polvo de Caucho	Filler Calizo	Granulometría Combinada
16	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>0.0</b>
11.2	37.5	0.0	0.0	0.0	<b>37.5</b>
8	330.0	0.0	0.0	0.0	<b>330.0</b>
4	307.5	0.0	0.0	0.0	<b>307.5</b>
2	30.0	30.4	0.0	0.0	<b>60.4</b>
0.5	15.0	81.7	0.0	0.0	<b>96.7</b>
0.063	7.5	60.8	0.0	15.6	<b>83.9</b>
Fondo	22.5	17.1	0.0	44.4	<b>84.0</b>
Masa total (g)	750.0	190.0	0.0	60.0	<b>1000</b>

#### Material retenido en volumen por tamiz (cm<sup>3</sup>)

Tamices (mm)	6/12 mm	0/2 mm	Polvo de Caucho	Filler Calizo	Granulometría Combinada
16	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>0.0</b>
11.2	11.5	0.0	0.0	0.0	<b>11.5</b>
8	101.3	0.0	0.0	0.0	<b>101.3</b>
4	94.4	0.0	0.0	0.0	<b>94.4</b>
2	9.2	10.3	0.0	0.0	<b>19.5</b>
0.5	4.6	27.6	0.0	0.0	<b>32.3</b>
0.063	2.3	20.6	0.0	5.8	<b>28.6</b>
Fondo	6.9	5.8	0.0	16.4	<b>29.1</b>
<b>Volumen Total (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>230.1</b>	<b>64.3</b>	<b>0.0</b>	<b>22.1</b>	<b>316.6</b>

**Tabla A.12. Cálculo del volumen del esqueleto mineral de la mezcla SMA 11 sin polvo de caucho**

Una vez definido el volumen de partículas de cada tamaño y el total de la mezcla para un esqueleto mineral de referencia que cumple con los husos buscados, se procede a sustituir un porcentaje del material de tamaño similar, es decir, arena por polvo de caucho. Para ello, se repite el proceso anteriormente descrito, pero en este caso se disminuirá en un 1.0% la cantidad

de arena del esqueleto y se reemplazará por un 1.0% de caucho. En las Tablas A.13 y A.14 se puede observar cómo se incrementa el volumen del esqueleto mineral original por el hecho de incorporar el polvo de caucho, aumento que viene dado por un mayor volumen de partículas de tamaño inferior a 0.5 mm (tamaño del polvo de caucho).

Cantidad de áridos (g)	1000					
Densidades (g/cm <sup>3</sup> )	2.87	2.86	2.95	1.03	2.71	
<b>Tamices (mm)</b>	<b>12/18 mm</b>	<b>6/12 mm</b>	<b>0/6 mm</b>	<b>Polvo de Caucho</b>	<b>Filler Calizo</b>	<b>Granulometría Combinada</b>
22	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	<b>100.0</b>
16	65.6	100.0	100.0	100.0	100.0	<b>95.9</b>
8	1.0	51.0	100.0	100.0	100.0	<b>67.5</b>
4	0.4	10.0	85.0	100.0	100.0	<b>44.1</b>
2	0.4	6.0	51.9	100.0	100.0	<b>28.8</b>
0.5	0.4	4.0	20.2	100.0	100.0	<b>15.0</b>
0.25	0.4	4.0	13.6	36.0	100.0	<b>11.7</b>
0.063	0.1	3.0	0.0	10.0	74.0	<b>4.3</b>
Dosificación en Peso	12.00%	42.00%	41.00%	1.00%	4.00%	

#### Material que pasa por tamiz (g)

Tamices (mm)	12/18 mm	6/12 mm	0/6 mm	Polvo de Caucho	Filler Calizo	Granulometría Combinada
22	120.0	420.0	410.0	10.0	40.0	<b>1000.0</b>
16	78.7	420.0	410.0	10.0	40.0	<b>958.7</b>
8	1.2	214.2	410.0	10.0	40.0	<b>675.4</b>
4	0.5	42.0	348.5	10.0	40.0	<b>441.0</b>
2	0.5	25.2	212.8	10.0	40.0	<b>288.5</b>
0.5	0.5	16.8	82.8	10.0	40.0	<b>150.1</b>
0.25	0.5	16.8	55.8	3.6	40.0	<b>116.6</b>
0.063	0.1	12.6	0.0	1.0	29.6	<b>43.3</b>

#### Material retenido por tamiz (g)

Tamices (mm)	12/18 mm	6/12 mm	0/6 mm	Polvo de Caucho	Filler Calizo	Granulometría Combinada
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>0.0</b>
16	41.3	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>41.3</b>
8	77.5	205.8	0.0	0.0	0.0	<b>283.3</b>
4	0.7	172.2	61.5	0.0	0.0	<b>234.4</b>
2	0.0	16.8	135.7	0.0	0.0	<b>152.5</b>
0.5	0.0	8.4	130.0	0.0	0.0	<b>138.4</b>
0.25	0.0	0.0	27.1	6.4	0.0	<b>33.5</b>
0.063	0.4	4.2	55.8	2.6	10.4	<b>73.3</b>
Fondo	0.1	12.6	0.0	1.0	29.6	<b>43.3</b>
Masa total (g)	120	420	410	10	40	<b>1000</b>

#### Material retenido en volumen por tamiz (cm<sup>3</sup>)

Tamices (mm)	12/18 mm	6/12 mm	0/6 mm	Polvo de Caucho	Filler Calizo	Granulometría Combinada
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>0.0</b>
16	14.4	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>14.4</b>
8	27.0	72.0	0.0	0.0	0.0	<b>99.0</b>
4	0.3	60.2	20.8	0.0	0.0	<b>81.3</b>
2	0.0	5.9	46.0	0.0	0.0	<b>51.9</b>
0.5	0.0	2.9	44.1	0.0	0.0	<b>47.0</b>
0.25	0.0	0.0	9.2	6.2	0.0	<b>15.4</b>
0.063	0.1	1.5	18.9	2.5	3.8	<b>26.9</b>
Fondo	0.0	4.4	0.0	1.0	10.9	<b>16.3</b>
<b>Volumen total (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>41.8</b>	<b>146.9</b>	<b>139.0</b>	<b>9.7</b>	<b>14.8</b>	<b>352.1</b>

**Tabla A.13. Cálculo del volumen del esqueleto mineral de la mezcla AC 16 con 1% en masa de polvo de caucho**

Cantidad de áridos (g)	1000				
Densidades (g/cm <sup>3</sup> )	3.259	2.955	1.03	2.71	
<b>Tamices (mm)</b>	<b>6/12 mm</b>	<b>0/2 mm</b>	<b>Polvo de Caucho</b>	<b>Filler Calizo</b>	<b>Granulometría Combinada</b>
16	100.0	100.0	100.0	100.0	<b>100.0</b>
11.2	95.0	100.0	100.0	100.0	<b>96.3</b>
8	51.0	100.0	100.0	100.0	<b>63.3</b>
4	10.0	100.0	100.0	100.0	<b>32.5</b>
2	6.0	84.0	100.0	100.0	<b>26.6</b>
0.5	4.0	41.0	100.0	100.0	<b>17.4</b>
0.063	3.0	9.0	10.0	74.0	<b>8.4</b>
Dosificación en Peso	75.00%	18.00%	1.00%	6.00%	

<b>Material que pasa por tamiz (g)</b>					
<b>Tamices (mm)</b>	<b>6/12 mm</b>	<b>0/2 mm</b>	<b>Polvo de Caucho</b>	<b>Filler Calizo</b>	<b>Granulometría Combinada</b>
16	750.0	180.0	10.0	60.0	<b>1000.0</b>
11.2	712.5	180.0	10.0	60.0	<b>962.5</b>
8	382.5	180.0	10.0	60.0	<b>632.5</b>
4	75.0	180.0	10.0	60.0	<b>325.0</b>
2	45.0	151.2	10.0	60.0	<b>266.2</b>
0.5	30.0	73.8	10.0	60.0	<b>173.8</b>
0.063	22.5	16.2	1.0	44.4	<b>84.1</b>

<b>Material retenido por tamiz (g)</b>					
<b>Tamices (mm)</b>	<b>6/12 mm</b>	<b>0/2 mm</b>	<b>Polvo de Caucho</b>	<b>Filler Calizo</b>	<b>Granulometría Combinada</b>
16	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>0.0</b>
11.2	37.5	0.0	0.0	0.0	<b>37.5</b>
8	330.0	0.0	0.0	0.0	<b>330.0</b>
4	307.5	0.0	0.0	0.0	<b>307.5</b>
2	30.0	28.8	0.0	0.0	<b>58.8</b>
0.5	15.0	77.4	0.0	0.0	<b>92.4</b>
0.063	7.5	57.6	9.0	15.6	<b>89.7</b>
Fondo	22.5	16.2	1.0	44.4	<b>84.1</b>
Masa total (g)	750.0	180.0	10.0	60.0	<b>1000</b>

<b>Material retenido en volumen por tamiz (cm<sup>3</sup>)</b>					
<b>Tamices (mm)</b>	<b>6/12 mm</b>	<b>0/2 mm</b>	<b>Polvo de Caucho</b>	<b>Filler Calizo</b>	<b>Granulometría Combinada</b>
16	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>0.0</b>
11.2	11.5	0.0	0.0	0.0	<b>11.5</b>
8	101.3	0.0	0.0	0.0	<b>101.3</b>
4	94.4	0.0	0.0	0.0	<b>94.4</b>
2	9.2	9.7	0.0	0.0	<b>19.0</b>
0.5	4.6	26.2	0.0	0.0	<b>30.8</b>
0.063	2.3	19.5	8.7	5.8	<b>36.3</b>
Fondo	6.9	5.5	1.0	16.4	<b>29.7</b>
<b>Volumen Total (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>230.1</b>	<b>60.9</b>	<b>9.7</b>	<b>22.1</b>	<b>322.9</b>

**Tabla A.14. Cálculo del volumen del esqueleto mineral de la mezcla SMA 11 con 1% en masa de polvo de caucho**

Así, si se quiere obtener un esqueleto análogo al original, pero con caucho, se debe ajustar para que el volumen de partículas de cada tamaño sea similar al esqueleto de referencia. En este sentido, para obtener un esqueleto similar en términos de volumen al de la mezcla

AC 16 de referencia habría que reducir un 1.0% en masa de arena 0/6 mm e incorporar un 0.2% de polvo de caucho (Tabla A.15). Por su parte, en el caso de la SMA 11 sería necesario disminuir el contenido de arena 0/2 mm y sustituirlo por un 0.4% de polvo de caucho (Tabla A.16).

<b>Cantidad de áridos (g)</b>	1000					
<b>Densidades (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.87	2.86	2.95	1.03	2.71	
<b>Tamices (mm)</b>	<b>12/18 mm</b>	<b>6/12 mm</b>	<b>0/6 mm</b>	<b>Polvo de Caucho</b>	<b>Filler Calizo</b>	<b>Granulometría Combinada</b>
22	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	<b>99.2</b>
16	65.6	100.0	100.0	100.0	100.0	<b>95.1</b>
8	1.0	51.0	100.0	100.0	100.0	<b>66.7</b>
4	0.4	10.0	85.0	100.0	100.0	<b>43.3</b>
2	0.4	6.0	51.9	100.0	100.0	<b>28.0</b>
0.5	0.4	4.0	20.2	100.0	100.0	<b>14.2</b>
0.25	0.4	4.0	13.6	36.0	100.0	<b>11.4</b>
0.063	0.1	3.0	0.0	10.0	74.0	<b>4.3</b>
Dosificación en Peso	12.00%	42.00%	41.00%	0.20%	4.00%	
<b>Material que pasa por tamiz (g)</b>						
<b>Tamices (mm)</b>	<b>12/18 mm</b>	<b>6/12 mm</b>	<b>0/6 mm</b>	<b>Polvo de Caucho</b>	<b>Filler Calizo</b>	<b>Granulometría Combinada</b>
22	120.0	420.0	410.0	2.0	40.0	<b>992.0</b>
16	78.7	420.0	410.0	2.0	40.0	<b>950.7</b>
8	1.2	214.2	410.0	2.0	40.0	<b>667.4</b>
4	0.5	42.0	348.5	2.0	40.0	<b>433.0</b>
2	0.5	25.2	212.8	2.0	40.0	<b>280.5</b>
0.5	0.5	16.8	82.8	2.0	40.0	<b>142.1</b>
0.25	0.5	16.8	55.8	0.7	40.0	<b>113.8</b>
0.063	0.1	12.6	0.0	0.2	29.6	<b>42.5</b>
<b>Material retenido por tamiz (g)</b>						
<b>Tamices (mm)</b>	<b>12/18 mm</b>	<b>6/12 mm</b>	<b>0/6 mm</b>	<b>Polvo de Caucho</b>	<b>Filler Calizo</b>	<b>Granulometría Combinada</b>
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>0.0</b>
16	41.3	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>41.3</b>
8	77.5	205.8	0.0	0.0	0.0	<b>283.3</b>
4	0.7	172.2	61.5	0.0	0.0	<b>234.4</b>
2	0.0	16.8	135.7	0.0	0.0	<b>152.5</b>
0.5	0.0	8.4	130.0	0.0	0.0	<b>138.4</b>
0.25	0.0	0.0	27.1	1.3	0.0	<b>28.3</b>
0.063	0.4	4.2	55.8	0.5	10.4	<b>71.2</b>
Fondo	0.1	12.6	0.0	0.2	29.6	<b>42.5</b>
Masa total (g)	120	420	410	2	40	<b>992</b>
<b>Material retenido en volumen por tamiz (cm<sup>3</sup>)</b>						
<b>Tamices (mm)</b>	<b>12/18 mm</b>	<b>6/12 mm</b>	<b>0/6 mm</b>	<b>Polvo de Caucho</b>	<b>Filler Calizo</b>	<b>Granulometría Combinada</b>
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>0.0</b>
16	14.4	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>14.4</b>
8	27.0	72.0	0.0	0.0	0.0	<b>99.0</b>
4	0.3	60.2	20.8	0.0	0.0	<b>81.3</b>
2	0.0	5.9	46.0	0.0	0.0	<b>51.9</b>
0.5	0.0	2.9	44.1	0.0	0.0	<b>47.0</b>
0.25	0.0	0.0	9.2	1.2	0.0	<b>10.4</b>
0.063	0.1	1.5	18.9	0.5	3.8	<b>24.8</b>
Fondo	0.0	4.4	0.0	0.2	10.9	<b>15.6</b>
<b>Volumen Total (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>41.8</b>	<b>146.9</b>	<b>139.0</b>	<b>1.9</b>	<b>14.8</b>	<b>344.3</b>

**Tabla A.15. Cálculo del volumen del esqueleto mineral de la mezcla AC 16 con 0.2% en masa de polvo de caucho**

Cantidad de áridos (g)	1000				
Densidades (g/cm <sup>3</sup> )	3.259	2.955	1.03	2.71	
<b>Tamices (mm)</b>	<b>6/12 mm</b>	<b>0/2 mm</b>	<b>Polvo de Caucho</b>	<b>Filler Calizo</b>	<b>Granulometría Combinada</b>
16	100.0	100.0	100.0	100.0	<b>99.4</b>
11.2	95.0	100.0	100.0	100.0	<b>95.7</b>
8	51.0	100.0	100.0	100.0	<b>62.7</b>
4	10.0	100.0	100.0	100.0	<b>31.9</b>
2	6.0	84.0	100.0	100.0	<b>26.0</b>
0.5	4.0	41.0	100.0	100.0	<b>16.8</b>
0.063	3.0	9.0	10.0	74.0	<b>8.4</b>
Dosificación en Peso	75.00%	18.00%	0.40%	6.00%	

#### Material que pasa por tamiz (g)

Tamices (mm)	6/12 mm	0/2 mm	Polvo de Caucho	Filler Calizo	Granulometría Combinada
16	750.0	180.0	4.0	60.0	<b>994.0</b>
11.2	712.5	180.0	4.0	60.0	<b>956.5</b>
8	382.5	180.0	4.0	60.0	<b>626.5</b>
4	75.0	180.0	4.0	60.0	<b>319.0</b>
2	45.0	151.2	4.0	60.0	<b>260.2</b>
0.5	30.0	73.8	4.0	60.0	<b>167.8</b>
0.063	22.5	16.2	0.4	44.4	<b>83.5</b>

#### Material retenido por tamiz (g)

Tamices (mm)	6/12 mm	0/2 mm	Polvo de Caucho	Filler Calizo	Granulometría Combinada
16	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>0.0</b>
11.2	37.5	0.0	0.0	0.0	<b>37.5</b>
8	330.0	0.0	0.0	0.0	<b>330.0</b>
4	307.5	0.0	0.0	0.0	<b>307.5</b>
2	30.0	28.8	0.0	0.0	<b>58.8</b>
0.5	15.0	77.4	0.0	0.0	<b>92.4</b>
0.063	7.5	57.6	3.6	15.6	<b>84.3</b>
Fondo	22.5	16.2	0.4	44.4	<b>83.5</b>
Masa total (g)	750.0	180.0	4.0	60.0	<b>994</b>

#### Material retenido en volumen por tamiz (cm<sup>3</sup>)

Tamices (mm)	6/12 mm	0/2 mm	Polvo de Caucho	Filler Calizo	Granulometría Combinada
16	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>0.0</b>
11.2	11.5	0.0	0.0	0.0	<b>11.5</b>
8	101.3	0.0	0.0	0.0	<b>101.3</b>
4	94.4	0.0	0.0	0.0	<b>94.4</b>
2	9.2	9.7	0.0	0.0	<b>19.0</b>
0.5	4.6	26.2	0.0	0.0	<b>30.8</b>
0.063	2.3	19.5	3.5	5.8	<b>31.0</b>
Fondo	6.9	5.5	0.4	16.4	<b>29.2</b>
<b>Volumen Total (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>230.1</b>	<b>60.9</b>	<b>3.9</b>	<b>22.1</b>	<b>317.1</b>

**Tabla A.16. Cálculo del volumen del esqueleto mineral de la mezcla SMA 11 con 0.4% en masa de polvo de caucho**

Si se deseara incrementar el contenido de polvo de caucho incorporado a la mezcla, deberían guardarse estas proporciones de tal manera que para incorporar un 0.4% de caucho en la mezcla AC 16 habría que

bajar el contenido de arena 0/6 mm en un 1.5% (Tabla A.17), mientras que para incorporar un 0.8% de polvo de caucho en la mezcla SMA 11 también habría que bajar un 2% la arena 0/2 mm (Tabla A.18).

Cantidad de áridos (g)	1000					
Densidades (g/cm <sup>3</sup> )	2.87	2.86	2.95	1.03	2.71	
Tamices (mm)	12/18 mm	6/12 mm	0/6 mm	Polvo de Caucho	Filler Calizo	Granulometría Combinada
22	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	98.9
16	65.6	100.0	100.0	100.0	100.0	94.8
8	1.0	51.0	100.0	100.0	100.0	66.4
4	0.4	10.0	85.0	100.0	100.0	43.1
2	0.4	6.0	51.9	100.0	100.0	28.0
0.5	0.4	4.0	20.2	100.0	100.0	14.3
0.25	0.4	4.0	13.6	36.0	100.0	11.4
0.063	0.1	3.0	0.0	10.0	74.0	4.3
Dosificación en Peso	12.00%	42.00%	40.50%	0.40%	4.00%	
Material que pasa por tamiz (g)						
Tamices (mm)	12/18 mm	6/12 mm	0/6 mm	Polvo de Caucho	Filler Calizo	Granulometría Combinada
22	120.0	420.0	405.0	4.0	40.0	989.0
16	78.7	420.0	405.0	4.0	40.0	947.7
8	1.2	214.2	405.0	4.0	40.0	664.4
4	0.5	42.0	344.3	4.0	40.0	430.7
2	0.5	25.2	210.2	4.0	40.0	279.9
0.5	0.5	16.8	81.8	4.0	40.0	143.1
0.25	0.5	16.8	55.1	1.4	40.0	113.8
0.063	0.1	12.6	0.0	0.4	29.6	42.7
Material retenido por tamiz (g)						
Tamices (mm)	12/18 mm	6/12 mm	0/6 mm	Polvo de Caucho	Filler Calizo	Granulometría Combinada
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	41.3	0.0	0.0	0.0	0.0	41.3
8	77.5	205.8	0.0	0.0	0.0	283.3
4	0.7	172.2	60.8	0.0	0.0	233.7
2	0.0	16.8	134.1	0.0	0.0	150.9
0.5	0.0	8.4	128.4	0.0	0.0	136.8
0.25	0.0	0.0	26.7	2.6	0.0	29.3
0.063	0.4	4.2	55.1	1.0	10.4	71.1
Fondo	0.1	12.6	0.0	0.4	29.6	42.7
Masa total (g)	120	420	405	4	40	989
Material retenido en volumen por tamiz (cm <sup>3</sup> )						
Tamices (mm)	12/18 mm	6/12 mm	0/6 mm	Polvo de Caucho	Filler Calizo	Granulometría Combinada
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	14.4	0.0	0.0	0.0	0.0	14.4
8	27.0	72.0	0.0	0.0	0.0	99.0
4	0.3	60.2	20.6	0.0	0.0	81.1
2	0.0	5.9	45.4	0.0	0.0	51.3
0.5	0.0	2.9	43.5	0.0	0.0	46.5
0.25	0.0	0.0	9.1	2.5	0.0	11.5
0.063	0.1	1.5	18.7	1.0	3.8	25.1
Fondo	0.0	4.4	0.0	0.4	10.9	15.8
Volumen Total (cm <sup>3</sup> )	41.8	146.9	137.3	3.9	14.8	344.6

**Tabla A.17. Cálculo del volumen del esqueleto mineral de la mezcla AC 16 con 0.4% en masa de polvo de caucho**

Cantidad de áridos (g)	1000				
Densidades (g/cm <sup>3</sup> )	3.259	2.955	1.03	2.71	
<b>Tamices (mm)</b>	<b>6/12 mm</b>	<b>0/2 mm</b>	<b>Polvo de Caucho</b>	<b>Filler Calizo</b>	<b>Granulometría Combinada</b>
16	100.0	100.0	100.0	100.0	98.8
11.2	95.0	100.0	100.0	100.0	95.1
8	51.0	100.0	100.0	100.0	62.1
4	10.0	100.0	100.0	100.0	31.3
2	6.0	84.0	100.0	100.0	25.6
0.5	4.0	41.0	100.0	100.0	16.8
0.063	3.0	9.0	10.0	74.0	8.3
Dosificación en Peso	75.00%	17.00%	0.80%	6.00%	

#### Material que pasa por tamiz (g)

Tamices (mm)	6/12 mm	0/2 mm	Polvo de Caucho	Filler Calizo	Granulometría Combinada
16	750.0	170.0	8.0	60.0	988.0
11.2	712.5	170.0	8.0	60.0	950.5
8	382.5	170.0	8.0	60.0	620.5
4	75.0	170.0	8.0	60.0	313.0
2	45.0	142.8	8.0	60.0	255.8
0.5	30.0	69.7	8.0	60.0	167.7
0.063	22.5	15.3	0.8	44.4	83.0

#### Material retenido por tamiz (g)

Tamices (mm)	6/12 mm	0/2 mm	Polvo de Caucho	Filler Calizo	Granulometría Combinada
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11.2	37.5	0.0	0.0	0.0	37.5
8	330.0	0.0	0.0	0.0	330.0
4	307.5	0.0	0.0	0.0	307.5
2	30.0	27.2	0.0	0.0	57.2
0.5	15.0	73.1	0.0	0.0	88.1
0.063	7.5	54.4	7.2	15.6	84.7
Fondo	22.5	15.3	0.8	44.4	83.0
Masa total (g)	750.0	170.0	8.0	60.0	988

#### Material retenido en volumen por tamiz (cm<sup>3</sup>)

Tamices (mm)	6/12 mm	0/2 mm	Polvo de Caucho	Filler Calizo	Granulometría Combinada
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11.2	11.5	0.0	0.0	0.0	11.5
8	101.3	0.0	0.0	0.0	101.3
4	94.4	0.0	0.0	0.0	94.4
2	9.2	9.2	0.0	0.0	18.4
0.5	4.6	24.7	0.0	0.0	29.3
0.063	2.3	18.4	7.0	5.8	33.5
Fondo	6.9	5.2	0.8	16.4	29.2
<b>Volumen Total (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>230.1</b>	<b>57.5</b>	<b>7.8</b>	<b>22.1</b>	<b>317.6</b>

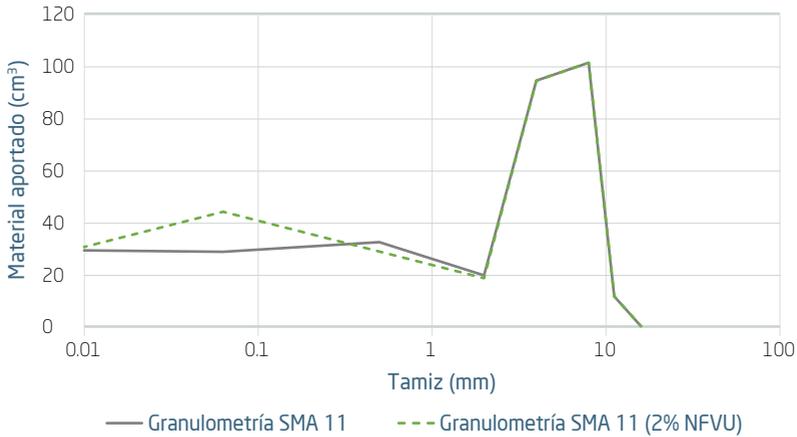
**Tabla A.18. Cálculo del volumen del esqueleto mineral de la mezcla SMA 11 con 0.8% en masa de polvo de caucho**

No obstante, este procedimiento tiene un límite, puesto que al disminuir el contenido de arena y al incrementar el de caucho estamos alterando el esqueleto mineral de la mezcla, y por tanto sus propiedades volumétricas y trabajabilidad. Al sustituir volumen de arena por volumen de polvo de caucho estamos incorporando mucha más superficie específica al esqueleto ya que el caucho tiene un tamaño de partícula menor. Además, tiene

menos afinidad química con el ligante y esto puede provocar un detrimento en la cohesión de la mezcla y una mayor susceptibilidad a la acción del agua. Por ejemplo, si quisiéramos incorporar un 2% de caucho en la mezcla SMA 11 estudiada, observaríamos cómo a pesar de conservar volúmenes de partículas, la cantidad de arena “gruesa” se vería disminuida con respecto a las partículas de menor tamaño y mayor superficie específica (Tabla A.19 y Figura A.15).

<b>Cantidad de áridos (g)</b>	1000				
<b>Densidades (g/cm<sup>3</sup>)</b>	3.259	2.955	1.03	2.71	
<b>Tamices (mm)</b>	<b>6/12 mm</b>	<b>0/2 mm</b>	<b>Polvo de Caucho</b>	<b>Filler Calizo</b>	<b>Granulometría Combinada</b>
16	100.0	100.0	100.0	100.0	<b>96.0</b>
11.2	95.0	100.0	100.0	100.0	<b>92.3</b>
8	51.0	100.0	100.0	100.0	<b>59.3</b>
4	10.0	100.0	100.0	100.0	<b>28.5</b>
2	6.0	84.0	100.0	100.0	<b>23.4</b>
0.5	4.0	41.0	100.0	100.0	<b>16.3</b>
0.063	3.0	9.0	10.0	74.0	<b>8.1</b>
Dosificación en Peso	75.00%	13.00%	2.00%	6.00%	
<b>Material que pasa por tamiz (g)</b>					
<b>Tamices (mm)</b>	<b>6/12 mm</b>	<b>0/2 mm</b>	<b>Polvo de Caucho</b>	<b>Filler Calizo</b>	<b>Granulometría Combinada</b>
16	750.0	130.0	20.0	60.0	<b>960.0</b>
11.2	712.5	130.0	20.0	60.0	<b>922.5</b>
8	382.5	130.0	20.0	60.0	<b>592.5</b>
4	75.0	130.0	20.0	60.0	<b>285.0</b>
2	45.0	109.2	20.0	60.0	<b>234.2</b>
0.5	30.0	53.3	20.0	60.0	<b>163.3</b>
0.063	22.5	11.7	2.0	44.4	<b>80.6</b>
<b>Material retenido por tamiz (g)</b>					
<b>Tamices (mm)</b>	<b>6/12 mm</b>	<b>0/2 mm</b>	<b>Polvo de Caucho</b>	<b>Filler Calizo</b>	<b>Granulometría Combinada</b>
16	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>0.0</b>
11.2	37.5	0.0	0.0	0.0	<b>37.5</b>
8	330.0	0.0	0.0	0.0	<b>330.0</b>
4	307.5	0.0	0.0	0.0	<b>307.5</b>
2	30.0	20.8	0.0	0.0	<b>50.8</b>
0.5	15.0	55.9	0.0	0.0	<b>70.9</b>
0.063	7.5	41.6	18.0	15.6	<b>82.7</b>
Fondo	22.5	11.7	2.0	44.4	<b>80.6</b>
Masa total (g)	750.0	130.0	20.0	60.0	<b>960</b>
<b>Material retenido en volumen por tamiz (cm<sup>3</sup>)</b>					
<b>Tamices (mm)</b>	<b>6/12 mm</b>	<b>0/2 mm</b>	<b>Polvo de Caucho</b>	<b>Filler Calizo</b>	<b>Granulometría Combinada</b>
16	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>0.0</b>
11.2	11.5	0.0	0.0	0.0	<b>11.5</b>
8	101.3	0.0	0.0	0.0	<b>101.3</b>
4	94.4	0.0	0.0	0.0	<b>94.4</b>
2	9.2	7.0	0.0	0.0	<b>16.2</b>
0.5	4.6	18.9	0.0	0.0	<b>23.5</b>
0.063	2.3	14.1	17.5	5.8	<b>39.6</b>
Fondo	6.9	4.0	1.9	16.4	<b>29.2</b>
<b>Volumen Total (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>230.1</b>	<b>44.0</b>	<b>19.4</b>	<b>22.1</b>	<b>315.7</b>

**Tabla A.19. Cálculo del volumen del esqueleto mineral de la mezcla SMA 11 con 2.0% en masa de polvo de caucho**



**Figura A.15. Comparación volumen aportado de partículas para una mezcla SMA 11 convencional y con 2% en masa de polvo de caucho**

Por este motivo, la forma más práctica de incorporar elevadas cantidades de caucho en una mezcla por vía seca manteniendo equivalencias volumétricas es diseñar un esqueleto mineral con un bajo contenido de arena (la curva del esqueleto mineral debe tender a coincidir con el huso inferior). De esta forma, si se quiere incrementar el contenido de polvo de caucho de la mezcla AC 16 del ejemplo, en primer lugar sería necesario diseñar una mezcla en la zona baja del huso (Tabla A.20; Figura A.16) y posteriormente, llevar a cabo la sustitución del volumen de arena por el volumen de polvo de caucho (Tabla A.21). De esta manera, partiendo de una mezcla AC 16 podríamos obtener otra

con un volumen de partículas equivalente pero un contenido de polvo de caucho superior. En este caso, manteniendo los volúmenes de partículas de cada tamaño, se puede sustituir la misma cantidad de arena 0/6 mm que en el ejemplo anterior (1%) por el doble de polvo de caucho (0.4%). El hecho de utilizar esqueletos en la zona baja de los husos permite además tener margen para, a pesar de no cumplir con la equivalencia de volúmenes, incrementar el contenido de polvo de caucho manteniendo una granulometría dentro de la tipología de mezcla estudiada (aunque en ese caso la mezcla demandaría una mayor cantidad de betún debido al incremento de la superficie específica).



Cantidad de áridos (g)	1000					
Densidades (g/cm <sup>3</sup> )	2.87	2.86	2.95	1.03	2.71	
<b>Tamices (mm)</b>	<b>12/18 mm</b>	<b>6/12 mm</b>	<b>0/6 mm</b>	<b>Polvo de Caucho</b>	<b>Filler Calizo</b>	<b>Granulometría Combinada</b>
22	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	<b>100.0</b>
16	65.6	100.0	100.0	100.0	100.0	<b>94.5</b>
8	1.0	51.0	100.0	100.0	100.0	<b>61.6</b>
4	0.4	10.0	85.0	100.0	100.0	<b>37.4</b>
2	0.4	6.0	51.9	100.0	100.0	<b>24.0</b>
0.5	0.4	4.0	20.2	100.0	100.0	<b>12.0</b>
0.25	0.4	4.0	13.6	36.0	100.0	<b>9.7</b>
0.063	0.1	3.0	0.0	10.0	74.0	<b>3.6</b>
Dosificación en Peso	16.00%	46.00%	35.00%	0.00%	3.00%	

#### Material que pasa por tamiz (g)

Tamices (mm)	12/18 mm	6/12 mm	0/6 mm	Polvo de Caucho	Filler Calizo	Granulometría Combinada
22	160.0	460.0	350.0	0.0	30.0	<b>1000.0</b>
16	105.0	460.0	350.0	0.0	30.0	<b>945.0</b>
8	1.6	234.6	350.0	0.0	30.0	<b>616.2</b>
4	0.6	46.0	297.5	0.0	30.0	<b>374.1</b>
2	0.6	27.6	181.7	0.0	30.0	<b>239.9</b>
0.5	0.6	18.4	70.7	0.0	30.0	<b>119.7</b>
0.25	0.6	18.4	47.6	0.0	30.0	<b>96.6</b>
0.063	0.2	13.8	0.0	0.0	22.2	<b>36.2</b>

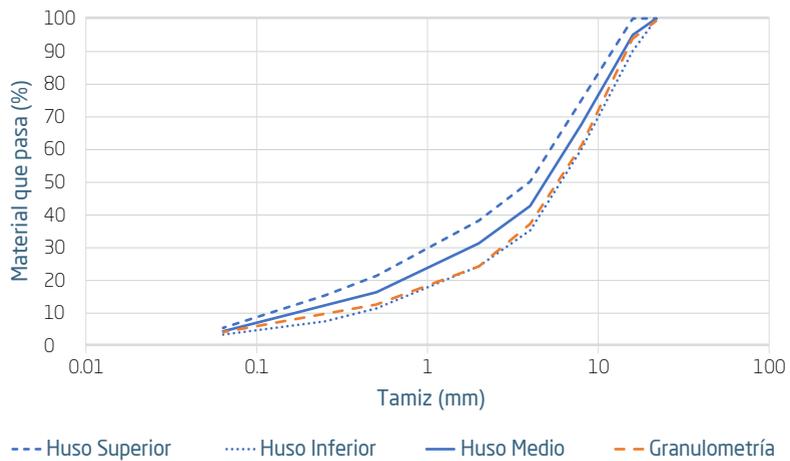
#### Material retenido por tamiz (g)

Tamices (mm)	12/18 mm	6/12 mm	0/6 mm	Polvo de Caucho	Filler Calizo	Granulometría Combinada
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>0.0</b>
16	55.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>55.0</b>
8	103.4	225.4	0.0	0.0	0.0	<b>328.8</b>
4	1.0	188.6	52.5	0.0	0.0	<b>242.1</b>
2	0.0	18.4	115.9	0.0	0.0	<b>134.3</b>
0.5	0.0	9.2	111.0	0.0	0.0	<b>120.2</b>
0.25	0.0	0.0	23.1	0.0	0.0	<b>23.1</b>
0.063	0.5	4.6	47.6	0.0	7.8	<b>60.5</b>
Fondo	0.2	13.8	0.0	0.0	22.2	<b>36.2</b>
Masa total (g)	160	460	350	0	30	<b>1000</b>

#### Material retenido en volumen por tamiz (cm<sup>3</sup>)

Tamices (mm)	12/18 mm	6/12 mm	0/6 mm	Polvo de Caucho	Filler Calizo	Granulometría Combinada
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>0.0</b>
16	19.2	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>19.2</b>
8	36.0	78.8	0.0	0.0	0.0	<b>114.8</b>
4	0.3	65.9	17.8	0.0	0.0	<b>84.1</b>
2	0.0	6.4	39.3	0.0	0.0	<b>45.7</b>
0.5	0.0	3.2	37.6	0.0	0.0	<b>40.8</b>
0.25	0.0	0.0	7.8	0.0	0.0	<b>7.8</b>
0.063	0.2	1.6	16.1	0.0	2.9	<b>20.8</b>
Fondo	0.1	4.8	0.0	0.0	8.2	<b>13.1</b>
<b>Volumen Total (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>55.7</b>	<b>160.8</b>	<b>118.6</b>	<b>0.0</b>	<b>11.1</b>	<b>346.3</b>

**Tabla A.20. Cálculo del volumen del esqueleto mineral de la mezcla AC 16 sin polvo de caucho encajada en la zona inferior del huso**



**Figura A.16. Curva granulométrica del encaje de la mezcla AC 16 en la zona inferior del huso**



Cantidad de áridos (g)	1000					
Densidades (g/cm <sup>3</sup> )	2.87	2.86	2.95	1.03	2.71	
<b>Tamices (mm)</b>	<b>12/18 mm</b>	<b>6/12 mm</b>	<b>0/6 mm</b>	<b>Polvo de Caucho</b>	<b>Filler Calizo</b>	<b>Granulometría Combinada</b>
22	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	<b>99.4</b>
16	65.6	100.0	100.0	100.0	100.0	<b>93.9</b>
8	1.0	51.0	100.0	100.0	100.0	<b>61.0</b>
4	0.4	10.0	85.0	100.0	100.0	<b>37.0</b>
2	0.4	6.0	51.9	100.0	100.0	<b>23.9</b>
0.5	0.4	4.0	20.2	100.0	100.0	<b>12.2</b>
0.25	0.4	4.0	13.6	36.0	100.0	<b>9.7</b>
0.063	0.1	3.0	0.0	10.0	74.0	<b>3.7</b>
Dosificación en Peso	16.00%	46.00%	34.00%	0.40%	3.00%	

<b>Material que pasa por tamiz (g)</b>						
<b>Tamices (mm)</b>	<b>12/18 mm</b>	<b>6/12 mm</b>	<b>0/6 mm</b>	<b>Polvo de Caucho</b>	<b>Filler Calizo</b>	<b>Granulometría Combinada</b>
22	160.0	460.0	340.0	4.0	30.0	<b>994.0</b>
16	105.0	460.0	340.0	4.0	30.0	<b>939.0</b>
8	1.6	234.6	340.0	4.0	30.0	<b>610.2</b>
4	0.6	46.0	289.0	4.0	30.0	<b>369.6</b>
2	0.6	27.6	176.5	4.0	30.0	<b>238.7</b>
0.5	0.6	18.4	68.7	4.0	30.0	<b>121.7</b>
0.25	0.6	18.4	46.2	1.4	30.0	<b>96.7</b>
0.063	0.2	13.8	0.0	0.4	22.2	<b>36.6</b>

<b>Material retenido por tamiz (g)</b>						
<b>Tamices (mm)</b>	<b>12/18 mm</b>	<b>6/12 mm</b>	<b>0/6 mm</b>	<b>Polvo de Caucho</b>	<b>Filler Calizo</b>	<b>Granulometría Combinada</b>
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>0.0</b>
16	55.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>55.0</b>
8	103.4	225.4	0.0	0.0	0.0	<b>328.8</b>
4	1.0	188.6	51.0	0.0	0.0	<b>240.6</b>
2	0.0	18.4	112.5	0.0	0.0	<b>130.9</b>
0.5	0.0	9.2	107.8	0.0	0.0	<b>117.0</b>
0.25	0.0	0.0	22.4	2.6	0.0	<b>25.0</b>
0.063	0.5	4.6	46.2	1.0	7.8	<b>60.2</b>
0.01	0.2	13.8	0.0	0.4	22.2	<b>36.6</b>
Masa total (g)	160	460	340	4	30	<b>994</b>

<b>Material retenido en volumen por tamiz (cm<sup>3</sup>)</b>						
<b>Tamices (mm)</b>	<b>12/18 mm</b>	<b>6/12 mm</b>	<b>0/6 mm</b>	<b>Polvo de Caucho</b>	<b>Filler Calizo</b>	<b>Granulometría Combinada</b>
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>0.0</b>
16	19.2	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>19.2</b>
8	36.0	78.8	0.0	0.0	0.0	<b>114.8</b>
4	0.3	65.9	17.3	0.0	0.0	<b>83.6</b>
2	0.0	6.4	38.1	0.0	0.0	<b>44.6</b>
0.5	0.0	3.2	36.5	0.0	0.0	<b>39.8</b>
0.25	0.0	0.0	7.6	2.5	0.0	<b>10.1</b>
0.063	0.2	1.6	15.7	1.0	2.9	<b>21.3</b>
0.01	0.1	4.8	0.0	0.4	8.2	<b>13.5</b>
<b>Volumen Total (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>55.7</b>	<b>160.8</b>	<b>115.3</b>	<b>3.9</b>	<b>11.1</b>	<b>346.8</b>

**Tabla A.21. Cálculo del volumen del esqueleto mineral de la mezcla AC 16 con 0.4% en masa de polvo de caucho encajado en la zona inferior del huso**





# Seguimiento de pavimentos asfálticos construidos con polvo de caucho por vía seca

## ANEXO B

A lo largo de las últimas décadas, se ha demostrado que siguiendo una serie de directrices, como las detalladas en el presente documento, es posible construir firmes asfálticos con mezclas bituminosas con polvo de caucho por vía seca con buenas prestaciones mecánicas y durabilidad, incluso bajo condiciones de tráfico elevadas y condiciones ambientales extremas. Prueba de ello son los más de 5.000.000 m<sup>2</sup> ejecutados en la zona del levante español desde el año 1995 hasta la actualidad, entre los que destacan carreteras locales, autonómicas nacionales, autovías, autopistas, puertos y aeropuertos con todo tipo de tráfico desde T00 a T4. Algunos de estos tramos tienen casi 20 años en servicio y en la actualidad aún presentan adecuadas prestaciones mecánicas. Este anexo recoge el estado actual de algunas de estas experiencias:

- Carretera CV-870 (La Murada, Alicante)
- Carretera CV-846 (Aspe, Alicante)
- Carretera N-301 (Molina de Segura, Murcia)

Como se verá a continuación, las experiencias citadas son un claro ejemplo de que las mezclas bituminosas fabricadas con polvo de neumático por vía seca son una alternativa para construir carreteras más sostenibles y duraderas.

### **B.1. Carretera CV-870 (La Murada, Alicante)**

Se trata de una carretera convencional rehabilitada en 2006 en un tramo de 1 km utilizando 3 cm de una mezcla tipo SMA 11 antifisuras (que se fabricó con un esqueleto mineral tipo M10 pero con un contenido de betún más elevado y sin fibras) con un 6.5% de ligante tipo B50/70 y un 1.5% de polvo de caucho sobre el peso de mezcla. El contenido de huecos en mezcla era del 5.3%).

Esta carretera fue seleccionada para formar parte de este anexo debido a:

- El intenso tráfico de vehículos pesados que presenta cada día: se mueve en tráficos T1 y T2 debido a los numerosos camiones que la utilizan para transportar los áridos y cemento de las canteras y cementeras cercanas a las que da servicio.
- Sus condiciones de circulación lenta y canalizada: atraviesan la localidad de La Murada con límite de velocidad urbano, por un boulevard de un carril por sentido.

Tras casi 17 años de vida de servicio, en la actualidad la mezcla presenta un excelente aspecto, con total ausencia de roderas y aparentemente sin patologías asociadas al envejecimiento o fatiga de la capa de rodadura, como puedan ser fisuras o zonas con desprendimiento de áridos. De hecho, exceptuando en las zonas de rodadas (donde la mezcla si se ha cerrado con el paso de los años), la superficie del pavimento sigue presentando la macro-textura característica de este tipo de mezclas. La Figura B.1 muestra en detalle la mezcla antifisuras utilizada durante la rehabilitación de la carretera CV-870 y las Figuras B.2-B.4 el estado actual de la misma en el año 2021.



**Figura B.1. Rehabilitación del pavimento CV-870 en el año 2006**



**Figura B.2. Estado actual del pavimento CV-870 en el año 2021 en la zona no urbana antes de entrar La Murada**



**Figura B.3. Estado actual del pavimento CV-870 en el año 2021 a su paso por la zona urbana del boulevard de La Murada**





**Figura B.4. Detalle del estado actual del pavimento CV-870 en el año 2021 en la zona no urbana**



**Figura B.5. Detalle del estado actual del pavimento CV-870 en el año 2021 en la zona urbana**

## B.2. Carretera CV-846 (Aspe, Alicante)

Al igual que en el caso anterior, la vía CV-846 es una carretera convencional rehabilitada en 2006 en un tramo de 1 km utilizando 3 cm de una mezcla tipo SMA 11 antifisuras (como en el caso anterior con esqueleto de M10 y sin fibras) con un 6.5% de ligante tipo B50/70 y un 1.5% de polvo de caucho sobre la masa de mezcla. En este caso, esta carretera se eligió como referencia debido a:

- El tráfico soportado: circulación intensa de camiones que van desde las zonas de canteras del interior en dirección al puerto de Alicante, manteniendo categorías T1 y T2 según el año.
- Geometría del trazado: carretera con una elevada pendiente descendiente donde el tráfico pesado alcanza velocidad y da un giro cerrado (en el que los esfuerzos tangenciales producidos en la capa de rodadura son muy elevados y podrían producirse desprendimientos de áridos), para posteriormente encarar una pendiente ascendente.

Tras más de 14 años de vida de servicio, la mezcla sigue presentando una macro-textura característica de este tipo de mezclas, salvo en algunos tramos de la rodada donde se ve un poco más cerrada. Asimismo, cabe destacar la ausencia de patologías (roderas, fisuras, desprendimiento de áridos, etc.) y que el color de la mezcla sigue permaneciendo oscuro, más intenso incluso que el del tramo contiguo en la zona de pendiente ascendente que se rehabilitó en 2010, lo que demuestra una menor afección al envejecimiento de la mezcla con polvo de caucho por vía seca. Las Figuras B.6-10 muestran en detalle el estado actual de la CV-846.



**Figura B.6. Esquema del tramo de la carretera CV-846 rehabilitado con mezcla fabricada con polvo de caucho por vía seca**



**Figura B.7. Detalle del tipo de tráfico pesado que circula por la carretera y del aspecto de la mezcla fabricada por vía seca tras 14 años de vida de servicio**



**Figura B.8. Imagen de la zona de giro de la CV-846**



**Figura B.9. Detalle del aspecto de la mezcla fabricada con polvo de caucho por vía seca en la zona de giro**

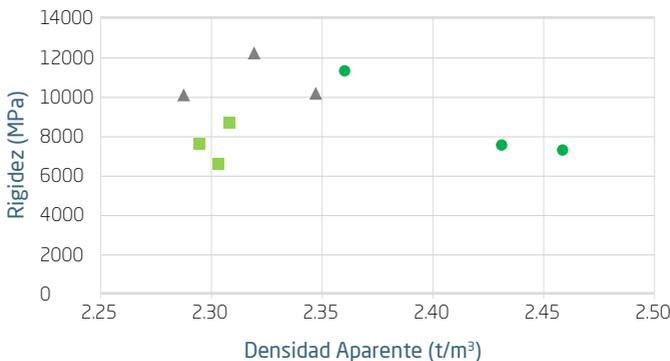


**Figura B.10. Zona de pendiente ascendente en carretera CV-846 y zona limítrofe entre los tramos rehabilitados en 2006 (izquierda, con mezcla fabricada con polvo de caucho por vía seca) y en 2010 (derecha, con mezcla convencional)**

En el año 2007 la empresa Los Serranos (del grupo Eiffage) llevó a cabo en este tramo de carretera un proyecto de investigación con el objetivo de evaluar la sonoridad de las mezclas con polvo de caucho por vía seca. El proyecto permitió observar que la mezcla con polvo de caucho era capaz de reducir el ruido generado por el tráfico rodado en unos 5 dB con respecto a las mezclas convencionales.

Además, en el año 2020 se sacaron testigos tanto de la capa de rodadura de la mezcla SMA fabricada con polvo de neumático por vía seca (14 años después de su ejecución), como de la capa de mezcla convencional AC 16 utilizada en el tramo contiguo (pasados 10 años de vida de servicio). Estos testigos fueron enviados al Laboratorio de Ingeniería de la Construcción de la Universidad de Granada (LabiC.UGR) para su estudio, sobre los que se realizaron los ensayos de densidad (UNE EN 12697-6), rigidez (UNE EN 12697-26, anexo C) y UGR-FACT. Adicionalmente, se procedió a extraer el betún de los mismos y se realizó un estudio avanzado de reología sobre los betunes tras su vida de servicio (se llevaron a cabo ensayos de barrido de frecuencia a distintas temperaturas y ensayos de deformación repetida, Multiple Stress Creep and Recovery Test).

Los testigos se extrajeron tanto de la zona de rodada como del eje de la calzada, donde la acción del tráfico ha tenido una menor afección a lo largo de los años. Los resultados obtenidos demuestran que la zona de la rodada de la capa de 3 cm de SMA 11 Antifisuras ha sufrido una ligera densificación a lo largo de su vida de servicio. Esto concuerda con el aspecto más cerrado de la capa en dicha zona y que como se observa, ha generado un ligero aumento en el módulo de la mezcla (Figura B.11). Asimismo, se puede destacar que tras 14 años de vida de servicio, la mezcla SMA 11 antifisuras con polvo de caucho por vía seca ha sufrido un incremento de rigidez de en torno al 45% (el módulo de diseño proporcionado por Los Serranos es en torno a los 4500 MPa, y actualmente posee un módulo en torno a 8200 MPa). Por su parte, los testigos extraídos de la capa de 4 cm de mezcla convencional AC 16 muestran unos módulos en torno a los 11000 MPa. Dado que el módulo de este tipo de mezclas suele estar en torno a los 6000 MPa, se puede estimar que el incremento de rigidez sufrido tras 10 años de servicio (4 menos que la mezcla con polvo de caucho por vía seca) es del mismo orden que el de la mezcla SMA. Este hecho, unido al aspecto de ambas mezclas donde la mezcla fabricada con polvo de caucho por vía seca mantiene un color más negro que la mezcla convencional, Figura B.12, permite concluir que el envejecimiento en la mezcla con polvo de caucho por vía seca bajo las mismas condiciones de servicio es menor.



● SMA Polvo Caucho vía seca (Rodada)    ■ SMA Polvo Caucho vía seca (Eje)    ▲ AC 16 Convencional

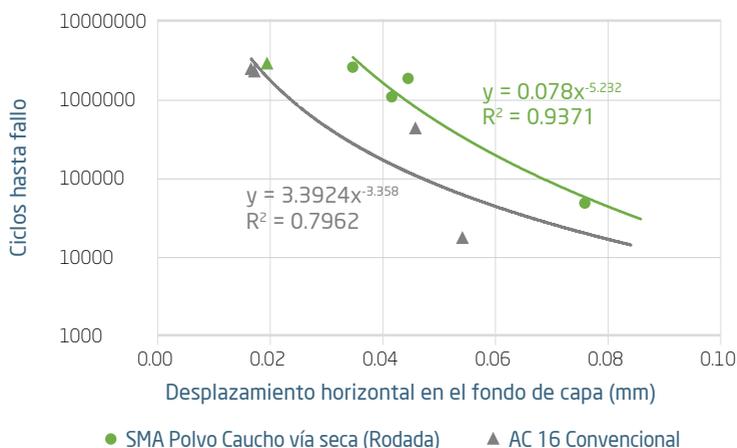
**Figura B.11. Resultados de densidad y rigidez de los testigos extraídos en la CV-846**



**Figura B.12. Detalle del aspecto de la mezcla fabricada con polvo de caucho por vía seca puesta en servicio en 2006 (izquierda) y de la mezcla convencional puesta en servicio en 2010 (derecha)**

Los resultados de resistencia a fisuración por fatiga de los testigos extraídos de la carretera con el ensayo UGR-FACT también demuestran una mayor resistencia en el caso de la mezcla SMA antifisuras fabricada con polvo de caucho por vía seca (a pesar de tener 4 años más de vida de servicio).

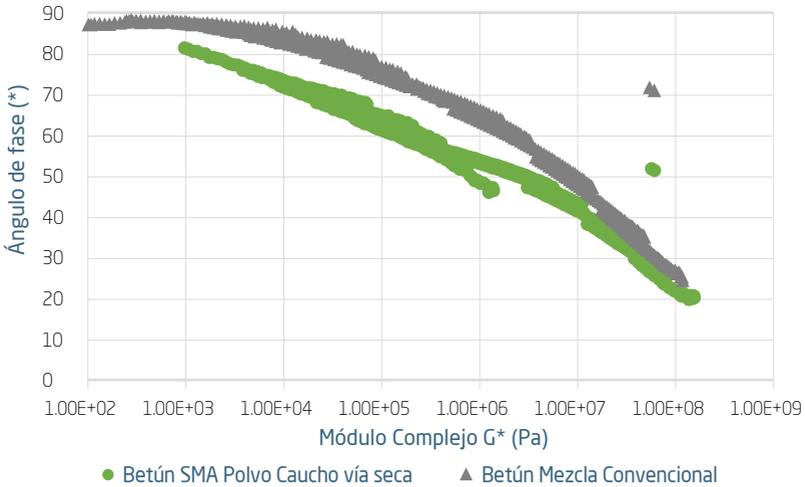
La Figura B.13 muestra cómo para un mismo nivel de deformación horizontal en el fondo de capa, los testigos de la mezcla SMA antifisuras son capaces de soportar una mayor cantidad de ciclos de carga hasta su fallo a fisuración por fatiga que la mezcla convencional (en torno a un 80% más de vida de fatiga).



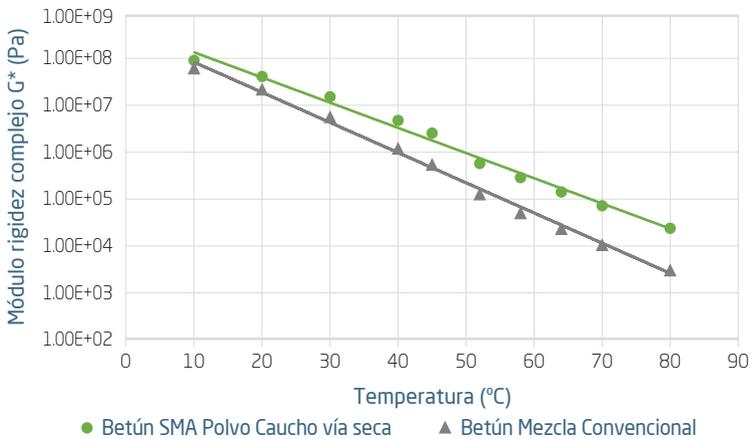
**Figura B.13. Resultados obtenidos en el ensayo UGR-FACT sobre los testigos extraídos de la carretera CV-846**

Finalmente, los resultados de reología (Figuras B.14-B.17) muestran como el betún extraído de la mezcla modificada con caucho por vía seca es un ligante con una menor susceptibilidad a la temperatura (lo que indica la acción del polvo de caucho sobre el betún 50/70) y una mayor elasticidad (mayor módulo complejo y menor ángulo de fase) que el ligante extraído de la mezcla convencional. Asimismo, se observa, que conforme descende

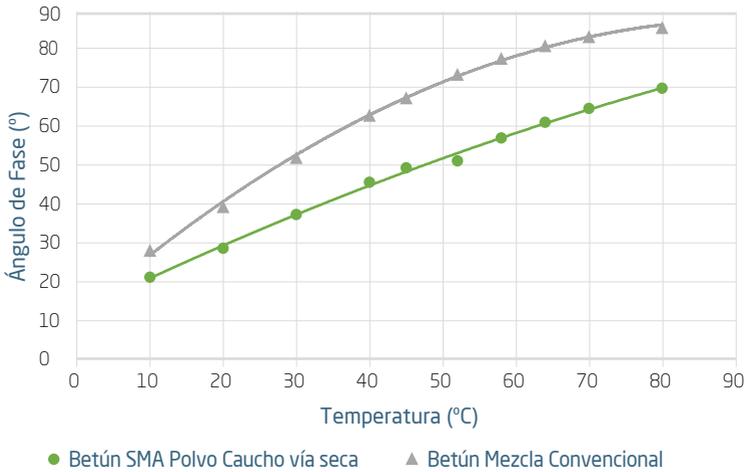
la temperatura de ensayo, el betún extraído de la mezcla convencional tiende a rigidizarse más, lo que tendrá como consecuencia una respuesta mecánica más frágil. Este hecho concuerda con los resultados obtenidos en los ensayos de Creep and Recovery test a diferentes temperaturas, en los que se observa claramente cómo la recuperación elástica es muy superior en el caso de la mezcla modificada con polvo de caucho por vía seca (Figura B.17).



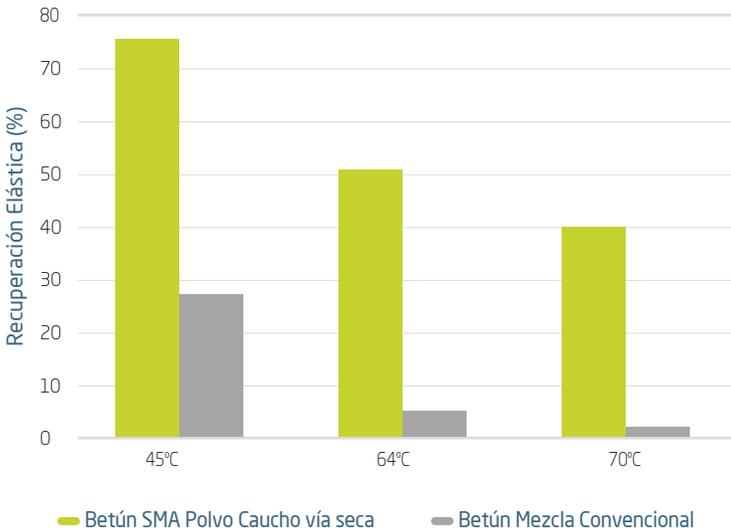
**Figura B.14. Diagramas de Black de los betunes extraídos de los testigos de la carretera CV-846**



**Figura B.15. Curvas isócronas de módulo complejo a 5 Hz de los betunes extraídos de los testigos de la carretera CV-846**



**B.16. Curvas isócronas de ángulo de fase a 5 Hz de los betunes extraídos de los testigos de la carretera CV-846**



**B.17. Resultados de recuperación elástica obtenidos en ensayo MSCR de los betunes extraídos de los testigos de la carretera CV-846**

### **B.3. Carretera N-301 (Molina de Segura, Murcia)**

La carretera N-301 es una vía con dos carriles por sentido que da servicio a una de las zonas de mayor concentración industrial de Murcia, conectándola con la autovía A-30 dirección Madrid. Es una carretera con un nivel de tráfico T1, que además se caracteriza por la presencia de zonas de frenada y aceleración, provocadas por las entradas y salidas a los polígonos industriales y las rotondas. Esta carretera fue rehabilitada en el año 2010 con un

tramo de 2 km de una mezcla de capa de rodadura de 3 cm tipo BBTM 11B, fabricada con un 5.2% de betún tipo B50/70 y un contenido de polvo de caucho del 0.6% adicionado por vía seca, sobre la masa de mezcla. Tras más de una década en servicio, la capa de rodadura muestra buen aspecto en todos los términos, buena macrotextura y ausencia de roderas, de síntomas de fisuración por fatiga, de desprendimiento de áridos o de envejecimiento. Las siguientes imágenes muestran en detalle el estado actual de la capa de rodadura después de 11 años de vida de servicio.



**Figura B. 18. Estado actual del tramo de carretera N-301 (BBTM 11B con polvo de caucho por vía seca)**



**Figura B. 19. Detalle del estado actual de la mezcla con caucho por vía seca utilizada en la carretera N-301 (I)**



**Figura B.20. Detalle del estado actual de la mezcla con caucho por vía seca utilizada en la carretera N-301 (II)**



**Figura B.21. Detalle del estado actual de la mezcla con caucho por vía seca utilizada en la carretera N-301 (III)**





# SIGNUS

*SISTEMA COLECTIVO DE GESTIÓN DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO*

**SIGNUS Ecovalor, S.L.**

C/ Caleruega, 102, 5<sup>a</sup>  
28033 Madrid  
T: +34 91 768 07 66  
info@signus.es

**www.signus.es**

Síguenos en:

