

G

Uía para la fabricación
y puesta en obra de
mezclas bituminosas
con polvo de neumático

SIGNUS Ecovalor, S.L.

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

www.signus.es

Síguenos en:   

Autores

Juan Gallego Medina

Profesor Titular de la Universidad
Politécnica de Madrid

Leticia Saiz Rodríguez

Responsable de Desarrollo de Mercados
de Valorización y Nuevas Aplicaciones de
SIGNUS Ecovalor

SIGNUS

SISTEMA INTEGRADO DE GESTIÓN DE NEUMÁTICOS USADOS

RESEÑA

SIGNUS Ecovalor es una entidad sin ánimo de lucro creada como mecanismo para que todos aquellos fabricantes e importadores (productores) que lo deseen cumplan sus obligaciones legales en relación con los residuos que se generan con los neumáticos después de su uso.

Las misiones de SIGNUS son garantizar un adecuado tratamiento del neumático fuera de uso, desde que se genera, hasta que deja de ser un residuo para convertirse en materiales con valor, y maximizar este valor a través del desarrollo de nuevas aplicaciones y de nuevos mercados, uno de los más importantes el de las mezclas bituminosas.



Índice

0. AGRADECIMIENTOS	7
1. PRESENTACIÓN DE LA GUÍA	9
2. NORMATIVA ESPAÑOLA DE MEZCLAS BITUMINOSAS CON POLVO DE CAUCHO	13
3. EFECTOS DEL CAUCHO EN LAS MEZCLAS BITUMINOSAS	21
3.1 Efecto del caucho por vía húmeda como modificador de ligantes	21
3.2 Efectos del caucho por vía seca: árido elástico y modificador parcial del ligante	22
3.3 Características del caucho a emplear en las mezclas bituminosas	23
4. DISEÑO DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS CON CAUCHO	25
4.1 Ideas incorrectas sobre la dosificación de mezclas bituminosas con caucho	26
4.2 Granulometría de las mezclas con caucho y huecos en mezcla	27
4.3 Temperaturas de envuelta y compactación	29
4.4 Ensayos a realizar para la elaboración de la fórmula de trabajo	30
4.5 Normas de buena práctica en el laboratorio	32
4.6 Redacción de la fórmula de trabajo	34
5. FABRICACIÓN DE MEZCLAS BITUMINOSAS CON CAUCHO	37
5.1 Fabricación de mezclas bituminosas con betunes caucho producidos en terminal de betunes modificados	37
5.2 Fabricación de mezclas bituminosas con betunes caucho producidos in situ	40
5.3 Fabricación de mezclas bituminosas con caucho por vía seca	46
5.4 Otros aspectos de la operación en central con mezclas bituminosas con caucho	48
5.5. Marcado CE de mezclas bituminosas con polvo de caucho	50
6. EXTENDIDO Y COMPACTACIÓN EN EL PAVIMENTO	55
6.1 Transporte de la mezcla bituminosa	55
6.2 Preparación de la superficie	57
6.3 Descarga y extendido de la mezcla bituminosa	57
6.4 Compactación de la capa	58
6.5 Apertura al tráfico	59
7. CONTROL DE CALIDAD	61
7.1 Control de calidad del caucho	61
7.2 Control de calidad de los betunes con caucho	62
7.3 Control de calidad durante la fabricación de las mezclas bituminosas	65
ANEXO 1. Mezclas tipo con polvo de caucho	69



Agradecimientos



Dada la gran aceptación e impacto, no solo a nivel nacional sino a nivel internacional, que tuvo la *"Guía para la fabricación de betunes con polvo de neumático"* publicada en 2014, SIGNUS ha querido una vez más contar con la profesionalidad, el conocimiento y la experiencia en este tipo de mezclas bituminosas con polvo de neumático, del Laboratorio de Caminos de la Escuela de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid para realizar los trabajos experimentales y participar en la redacción del presente documento dentro del convenio de colaboración firmado entre SIGNUS y la Fundación Agustín de Betancourt.

Igualmente, SIGNUS agradece a todos aquellos profesionales del sector que, de una forma indirecta, han contribuido en el contenido de esta Guía aportando información basándose en su experiencia en este tipo de mezclas.

Por último, SIGNUS quiere agradecer a todas las personas que han mostrado interés y que de forma desinteresada han ayudado a difundir la anterior *"Guía para la fabricación de betunes con polvo de neumático"*, esperando que este nuevo documento resulte ser también una herramienta útil y provechosa para el mercado.



Presentación de la Guía



La utilización del polvo de caucho¹ en carreteras es una técnica regulada y se puede decir consolidada en nuestro país, pionero en la fabricación de este tipo de mezclas. En los últimos años se ha realizado un importante esfuerzo por parte de la Dirección General de Carreteras y el CEDEX en la regulación del uso de polvo de neumático en firmes de carreteras, además del esfuerzo de distintos organismos de investigación y de empresas del sector para alcanzar la viabilidad técnica de los betunes mejorados o modificados con polvo de caucho.

No obstante, el uso de este tipo de ligantes no se ha extendido en la medida que se preveía, y se sigue poniendo de manifiesto que el conocimiento que se tiene de estos materiales es aún insuficiente.

Para salvar esta barrera, en 2014 SIGNUS publicó la "Guía para la Fabricación de Betunes con polvo de neumático", que fue elaborada con la colaboración de Juan Gallego, profesor de la Escuela de Caminos Canales y Puertos de

la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), en la que se presentaban de una forma sencilla y directa los principales aspectos que debe conocer una empresa que decida fabricar este tipo de ligantes.

No obstante, se precisa un esfuerzo adicional para mejorar el conocimiento y la confianza de las administraciones públicas y las empresas en este tipo de mezclas, siendo necesario explicar también de una forma clara y concisa cómo se dosifican, fabrican, colocan en obra y se controla la calidad de los distintos tipos de mezclas bituminosas cuando se incorpora polvo de neumático.

“ El conocimiento que se tiene de las mezclas con polvo de neumático es aún insuficiente”.

(1) A lo largo de la Guía se usa indistintamente la denominación polvo de neumático o polvo de caucho para hacer referencia al caucho obtenido del proceso de transformación del neumático al final de su vida útil (NFVU).



España se aproxima a una coyuntura en la que la reparación y rehabilitación de su extensa red viaria será inexcusable. Las mezclas bituminosas con ligantes-caucho por sus propiedades de flexibilidad, adhesividad y economía son idóneas para tareas de conservación. Por consiguiente es ahora el momento oportuno para publicar la “Guía para la fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas con polvo de neumático”, en la que se exponen de forma sencilla y directa las peculiaridades de este tipo de mezclas, tanto en su diseño y fabricación, como en su extendido y compactación en el pavimento, y finalmente en su preceptivo control de calidad.

En este caso, como continuidad a la anterior guía, se han definido una serie de mezclas bituminosas, que en su conjunto representan más del 90% de las que se ejecutan habitualmente en España, con la intención de fabricarlas a escala de laboratorio y verificar el cumplimiento de las especificaciones del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) del Ministerio de Fomento.

SIGNUS, entidad constituida con la finalidad primordial de garantizar la correcta gestión de los neumáticos al final de su vida útil (NFVU) recogidos en España, con este documento



pretende poner en el mercado una herramienta que dé respuesta a todas aquellas dudas sobre las mezclas bituminosas con polvo de caucho que hoy en día tienen los profesionales de distintos ámbitos y de esta forma conseguir que su utilización sea cada vez mayor dando cumplimiento a los requisitos adicionales establecidos a través del Plan Estratégico Marco de Residuos 2016-2022 del MAPAMA, y las políticas de fomento de la sostenibilidad de la actividad económica impulsado por el denominado paquete de Economía Circular de la Unión Europea.



Reinigung von Form und Walzsegment:
KEINE Lösemittel !



Cleaning of Mould and Sector:
No Solvents !



Normativa española sobre mezclas bituminosas con caucho

2

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. Aunque sin un carácter normativo, quizás el hito previo más importante fue el Manual de Empleo de Caucho de NFU en Mezclas Bituminosas (2007), redactado por el CEDEX por encargo del Ministerio de Medio Ambiente y del Ministerio de Fomento. En este documento se esbozaban ya los tres tipos de ligantes con caucho que se consideraron interesantes en el panorama español de las mezclas bituminosas.

Se definían allí, por orden creciente de modificación los betunes mejorados (BC), los modificados (PMBC) y los modificados de alta viscosidad (BMAVC), todos ellos con polvo de caucho procedente del NFU. Del mismo modo se daban recomendaciones sobre el empleo de los distintos ligantes con caucho en mezclas del tipo hormigón bituminoso (AC), dis-

continuas (BBTM A, BBTM B), drenantes (PA) y mezclas antirreflexión de fisuras.

El manual del Cedex prestó también atención a las mezclas fabricadas con caucho por vía seca, indicando la importancia del proceso de digestión para un buen comportamiento de la mezcla bituminosa.

Posteriormente las Órdenes Circulares 21/2007 y 21bis/2009 supusieron el primer documento normativo de obligado cumplimiento en las obras del Ministerio de Fomento. En estos documentos se hace referencia a las especificaciones técnicas de los ligantes con caucho (Tablas 1 y 2) y a su manejo en obra, pero también introducen indicaciones orientativas sobre el tipo de mezcla con caucho más adecuado de acuerdo al proyecto de que se trate y sus necesidades. Al hablar de la vía seca quizás lo más reseñable es que limita su empleo a carreteras con tráfico medios o bajos.



Características		Norma de referencia	Unidad	BC35/50	BC50/70
Betún original					
Penetración, 25°C		UNE EN 1426	0,1 mm	35-50	50-70
Punto de reblandecimiento anillo y bola		UNE EN 1427	°C	≥ 58	≥ 53
Punto de fragilidad Fraass		UNE EN 12593	°C	≤ -5	≤ -8
Fuerza ductilidad (5cm/min)	5°C	UNE EN 13589 UNE EN 13703	J/cm ²	≥ 0,5	
Recuperación elástica a 25°C		UNE EN 13398	%	≥ 10	
Estabilidad al almacenamiento (*)	Diferencia anillo y bola	UNE EN 13399	°C	≤ 10	
	Diferencia de penetración		0,1 mm	≤ 8	≤ 10
Solubilidad		UNE EN 12592	%	≥ 92	
Punto de Inflamación v/a		UNE EN ISO 2592	°C	≥ 235	
Residuo del ensayo de película fina y rotatoria: UNE EN 12607-1					
Variación de masa		UNE EN 12607-1	%	≤ 1,0	
Penetración retenida		UNE EN 1426	% p.o	≥ 65	≥ 60
Variación del Punto de Reblandecimiento		UNE EN 1427	°C	min -4 máx +8	min -5 máx +10

(*) Únicamente exigible a ligantes que no se fabriquen "in situ"

Tabla 1. Especificaciones de betunes mejorados con caucho (BC)

Características		Norma de referencia	Unidad	BMAVC-1	BMAVC-2	BMAVC-3
Betún original						
Penetración, 25°C		UNE EN 1426	0,1 mm	15-30	35-50	55-70
Punto de Reblandecimiento		UNE EN 1427	°C	≥ 75	≥ 70	≥ 70
Punto de Fragilidad Fraass		UNE EN 12593	°C	≤ -4	≤ -8	≤ -15
Fuerza Ductilidad (5cm/min)	5°C	UNE EN 13589 UNE EN 13703	J/cm ²	-	≥ 2	≥ 3
	10°C			≥ 2	-	-
Consistencia (Flotador a 60°C)		NLT 183	s	≥ 3000		
Viscosidad dinámica	135°C	UNE EN 13302	mPa·s		≤ 7500	≤ 5000
	170°C			≥ 2000	≥ 1200	≥ 800
Recuperación elástica		UNE EN 13398	%	≥ 10	≥ 20	≥ 30
Estabilidad al almacenamiento (*)	Diferencia de anillo y bola	UNE EN 13399	°C	≤ 5		
	Diferencia de penetración		0,1 mm	≤ 20		
Punto de inflamación v/a		UNE EN ISO 2592	°C	≥ 235		
Residuo del ensayo de película fina y rotatoria UNE EN 12607-1						
Variación de masa		UNE EN 12607-1	%	≤ 0,8	≤ 0,8	≤ 1,0
Penetración retenida		UNE EN 1426	% p.o	≥ 60		
Variación del Punto de Reblandecimiento		UNE EN 1427	°C	min -4 máx +10		min -5 máx +12

(*) Únicamente exigible a ligantes que no se fabriquen "in situ"

Tabla 2. Especificaciones de betunes modificados de alta viscosidad con caucho (BMAVC)

Desde entonces se han realizado una serie de proyectos incorporando mezclas con caucho de neumáticos por vía húmeda y seca, experiencia que ha ido recogándose en la redacción actual del PG-3, publicada en la Orden FOM/2523/2014, de 12 de diciembre. Ya en su preámbulo se cuenta, en-

tre las razones que motivan la actualización normativa, la de "La incentiviación del aprovechamiento de los materiales reciclados de los firmes y la inclusión de betunes con adición de polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso, por cuestiones de sostenibilidad ambiental".

Entre los contenidos más destacables del documento en lo referido a los materiales bituminosos con caucho, en el artículo 212 que se refiere a las especificaciones de los betunes modificados con polímeros (PMB), establece que *“Cuando el polímero utilizado mayoritariamente en la fabricación del betún modificado sea polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso, tras la denominación se añadirá una letra C mayúscula”*, es decir, deben

cumplir las mismas especificaciones técnicas que los betunes modificados con polímeros, pero el empleo de caucho en la modificación del ligante debe indicarse con la letra C al final (Tabla 3). Asimismo en el cuadro de especificaciones técnicas se aclara que las características de estabilidad al almacenamiento no se exigen a los betunes modificados in situ, un caso frecuente cuando se trata de modificaciones que incluyen caucho.

Denominación UNE EN 14023			PMB 10/40 -70C	PMB 25/55 -65 C	PMB 45/80 -60 C	PMB 45/80 -65C	PMB 45/80 -75 C	PMB 75/130 -60
Denominación anterior (*)			BMC-1	BMC-2	BMC-3b	BMC-3c		BMC-4
Características	UNE EN	Unidad	Ensayos sobre el betún original					
Penetración a 25°	1426	0,1 mm	10-40	25-55	45-80	45-80	45-80	75-130
Punto de reblandecimiento	1427	°C	≥ 70	≥ 65	≥ 60	≥ 65	≥ 75	≥ 60
Cohesión. Fuerza-ductilidad	13589 13703	J/cm ²	≥ 2 a 15°C	≥ 2 a 10°C	≥ 2 a 5°C	≥ 3 a 5°C	≥ 3 a 5°C	≥ 1 a 5°C
Punto de fragilidad Fraass	12593	°C	≤ -5	≤ -7	≤ -12	≤ -15	≤ -15	≤ -15
Recuperación elástica a 25°C	13398	%	TBR	≥ 50	≥ 50	≥ 70	≥ 80	≥ 60
Estabilidad al almacenamiento (**)	Diferencia de punto de reblandecimiento	13399 1427	°C	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5
	Diferencia de penetración	13399 1426	0,1 mm	≤ 9	≤ 9	≤ 9	≤ 9	≤ 13
Punto de inflamación	ISO 2592	°C	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 220
Durabilidad - Resistencia al envejecimiento EN 12607-1								
Cambio de masa	12607-1	%	≤ 0,8	≤ 0,8	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0
Penetración retenida	1426	%	≥ 60	≥ 60	≥ 60	≥ 60	≥ 60	≥ 60
Incremento del punto de reblandecimiento	1427	°C	≤ 8	≤ 8	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Disminución del punto de reblandecimiento	1427	°C	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5

(*) Esta denominación se incluye únicamente a título informativo con objeto de facilitar la adaptación a las nuevas nomenclaturas europeas.

(**) Únicamente exigible a ligantes que no se fabriquen "in situ"

TBR: Se informará del valor

Tabla 3. Requisitos de los betunes modificados con caucho

Sin duda los artículos más importantes del PG-3, por lo que se refiere a la presente Guía, son los artículos 542 y 543, referidos respectivamente a mezclas tipo hormigón bituminoso AC (Tablas 4 y 5) y a mezclas discontinuas (BBTM A y BBTM B) y drenantes PA (Tabla 6). En la selección del ligante a emplear se indica que cuando incluya caucho deberá cumplir la regla-

mentación específica vigente de la Dirección General de Carreteras relativa a betunes con incorporación de caucho, en clara referencia a las OC 21/2007 y 21bis/2009, así como al artículo 212 que ya hemos mencionado más arriba, relativo a betunes modificados con polímeros o caucho y polímeros.

ZONA TÉRMICA ESTIVAL	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO					
	T00	T0	T1	T2 y T31	T32 y ARCENES	T4
CÁLIDA	35/50 BC35/50 PMB 25/55-65 PMB 45/80-65 PMB 25/55-65 C PMB 45/80-65 C		35/50 BC35/50 PMB 25/55-65 PMB 45/80-60 PMB 45/80-65 PMB 25/55-65 C PMB 45/80-60 C PMB 45/80-65 C	35/50 50/70 BC35/50 BC50/70 PMB 45/80-60 PMB 45/80-60 C	50/70 BC50/70	
MEDIA	35/50 BC35/50 PMB 45/80-60 PMB 45/80-65 PMB 45/80-60 C PMB 45/80-65 C		35/50 50/70 BC35/50 BC50/70 PMB 45/80-60 PMB 45/80-60 C	50/70 BC50/70 PMB 45/80-60 PMB 45/80-60 C	50/70 70/100 BC50/70	50/70 70/100 BC50/70
TEMPLADA	50/70 BC50/70 PMB 45/80-60 PMB 45/80-65 PMB 45/80-60 C PMB 45/80-65 C		50/70 70/100 BC50/70 PMB 45/80-60 PMB 45/80-60 C			

Tabla 4. Tipo de ligante hidrocarbonado a emplear en capa de rodadura y siguiente (Artículo 542) del PG-3

ZONA TÉRMICA ESTIVAL	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO			
	T00	T0	T1	T2 y T3
CÁLIDA		35/50 BC35/50 PMB 25/55-65 PMB 25/55-65 C	35/50 50/70 BC35/50 BC35/70	50/70 BC50/70
MEDIA				50/70 70/100 BC50/70
TEMPLADA		50/70 70/100 BC50/70		70/100

Tabla 5. Tipo de ligante hidrocarbonado a emplear en capa base, bajo otras dos (Artículo 542 del PG-3)

TIPO DE MEZCLA	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO				
	T00 y T0	T1	T2(*) y T31	T32 y ARCENES	T4
DISCONTINUA	PMB 45/80-65 PMB 45/80-65 C	PMB 45/80-65 PMB 45/80-60 PMB 45/80-65 C PMB 45/80-60 C	PMB 45/80-60 PMB 45/80-60 C 50/70 BC50/70	50/70 70/100 BC50/70	
DRENANTE	PMB 45/80-65 PMB 45/80-65 C	PMB 45/80-65 PMB 45/80-60 PMB 45/80-65 C PMB 45/80-60 C	PMB 45/80-60 PMB 45/80-60 C 50/70 BC50/70	50/70 70/100 BC50/70	

Tabla 6. Tipo de ligante hidrocarbonado a emplear Artículo 543 del PG-3

(*) Para tráfico T2 se emplearán betunes modificados en autovías o cuando la IMD sea superior a 5 000 vehículos por día y carril.

Y más allá del cumplimiento de estas especificaciones técnicas, el artículo 542 y el 543 del PG-3 animan al empleo de caucho: "Según lo dispuesto en el apartado 8 del Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015 aprobado por Acuerdo de Consejo de Ministros de 26 de diciembre de 2008, se fomentará el uso de polvo de caucho procedente de la trituración

de neumáticos fuera de uso, siempre que sea técnica y económicamente posible."

En definitiva, puede decirse que la normativa actual española recomienda el empleo de los betunes con caucho en todas las aplicaciones en que se emplean sus betunes homólogos sin caucho. Los betunes mejorados se equiparan



a los betunes puros, los betunes modificados con caucho y polímeros a los betunes con polímeros (PMB) y los betunes de alta viscosidad con caucho, que no tiene homólogo en la normativa, se recomiendan en proyectos que requieran altas prestaciones.

Por lo que respecta a la vía seca en la normativa española queda reducida a mezclas bituminosas para carreteras con tráficos medios o bajos, hasta que se disponga de más información.

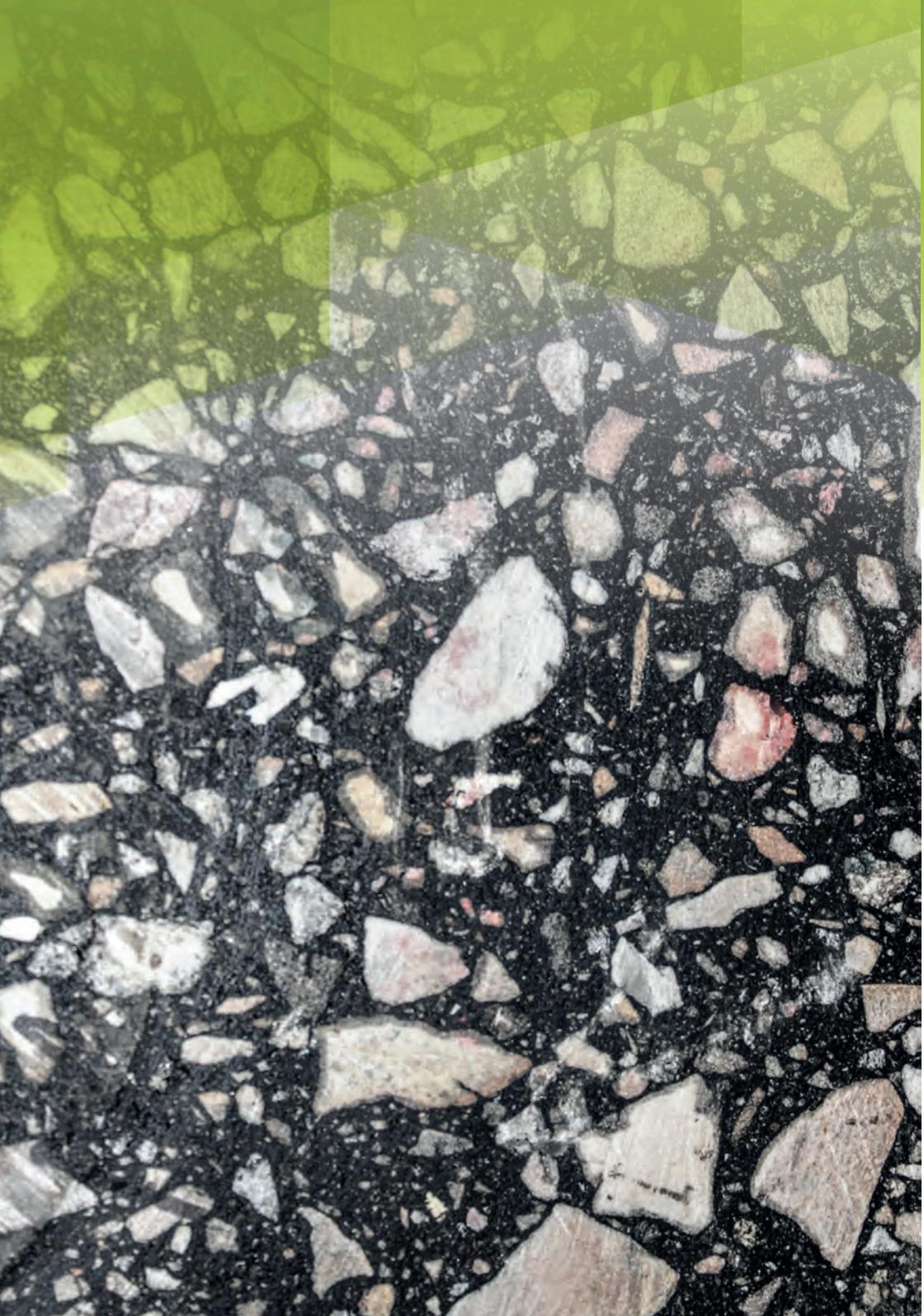
Mención especial debe hacerse aquí un tipo de mezcla bituminosa que si bien no está recogida en la normativa actual, está comenzando a utilizarse frecuentemente en capas de rodadura. Se trata de las *mezclas tipo Stone Matrix Asphalt* (en adelante SMA), que como se ha demostrado ya en varios proyectos, y ahora en esta Guía, pueden incorporar caucho tanto por vía húmeda como por vía seca, con excelentes resultados. El documento español del que disponemos por el momento, más cercano a una especificación de mezclas SMA, es una

propuesta normativa que elaboró el Cedex en el año 2013 sobre mezclas bituminosas en caliente tipo SMA, y que ha servido de referencia en esta Guía para diseñar este tipo de mezclas incorporando caucho.

Por último, las mezclas antifisuras fabricadas con ligante BMAVC, que de acuerdo con la OC 21/2007 son idóneas para operaciones de rehabilitación en las que se precise resistencia a la reflexión de fisuras, no tienen una granulometría especificada en la normativa española, por lo que se han diseñado de acuerdo a la experiencia española de los últimos años.

Tomando como referencia el marco normativo descrito anteriormente, la presente Guía recoge una serie de puntos relativos al diseño, la fabricación, la puesta en obra y el control de calidad de las mezclas bituminosas con polvo de neumático que ayudarán a dar cumplimiento a dicha normativa, tanto por vía húmeda como por vía seca, y a la que está por venir para especificar las mezclas SMA.





Efectos del caucho en las mezclas bituminosas

3

Está generalmente aceptado que el caucho actúa como modificador de la reología de los ligantes asfálticos, de un modo similar, en muchos aspectos, al que lo hacen los polímeros.

En los dos procedimientos conocidos de incorporación del caucho en la mezcla bituminosa, tiene lugar la digestión de las partículas de caucho, según la Figura 1, pero en la vía húmeda el proceso se completa en mayor medida que en la vía seca.

En los siguientes apartados se matizan las diferencias entre los efectos del caucho por vía húmeda y por vía seca.

3.1 Efecto del caucho por vía húmeda como modificador de ligantes

La vía húmeda consiste en el proceso de mezclado enérgico de betún y caucho a una temperatura entre 185 y 195°C, durante un período de tiempo que garantice la digestión (aproximadamente 60 minutos). Los factores más importantes que gobiernan este proceso son la temperatura, la energía y el tiempo de mezclado, el contenido de aromáticos en el betún, el tamaño de partícula del caucho y su contenido en caucho natural.

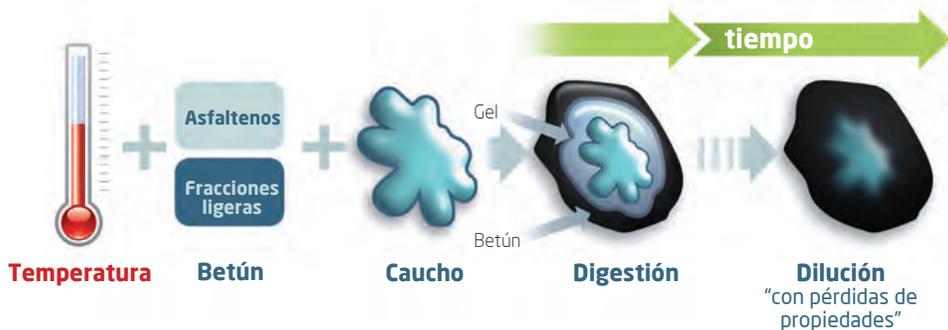


Figura 1. Evolución de la interacción betún-caucho

Este procedimiento de incorporar caucho en el betún mejora notablemente su reología, disminuyendo su susceptibilidad a la temperatura e incrementando su elasticidad.

La Guía para la fabricación de betunes con polvo de neumático publicada por Signus en 2014, muestra los diferentes grados de modificación que se consiguen, de acuerdo con la normativa española de ligantes bituminosos. El caucho puede emplearse como único modificador o combinado con polímeros para aminorar la necesidad de estos últimos, mucho más costosos.

Una vez que se ha modificado el betún con caucho por vía húmeda se emplea en la fabricación de mezclas bituminosas cuyas características también mejoran debido al empleo del ligante previamente modificado.

3.2 Efectos del caucho por vía seca: árido elástico y modificador parcial del ligante

La vía seca consiste en la incorporación de caucho a la mezcla bituminosa durante su fabricación, como si se tratase de una fracción de árido fino.

Hasta hace algunos años la separación entre vía húmeda y vía seca se consideraba nítida. El primer procedimiento utilizaba el caucho como un modificador del ligante, mientras en el segundo intervenía como un árido elástico. Sin embargo, los trabajos de laboratorio llevados a cabo han puesto de manifiesto que, si se dispone de tiempo de digestión, el caucho añadido por vía seca a las mezclas asfálticas pierde parte de su comportamiento elástico y puede actuar parcialmente como un modificador del ligante.

En efecto, durante las operaciones de transporte y extensión de la mezcla asfáltica, el caucho está en contacto con el betún asfáltico a una temperatura de unos 150-160°C y,

simultáneamente a su pérdida de características elásticas, se produce una modificación parcial del betún asfáltico utilizado en la fabricación de la mezcla.

Se muestra a continuación un ejemplo del comportamiento que tiene el caucho por vía seca en función del tiempo de digestión, medido a través de su influencia en la compactación de la mezcla. Se trataba de una mezcla bituminosa con un 1,5% de caucho. Los tiempos de digestión ensayados fueron 60, 120, y 240 minutos, durante los cuáles la mezcla sin compactar se mantenía en estufa a 150°C².

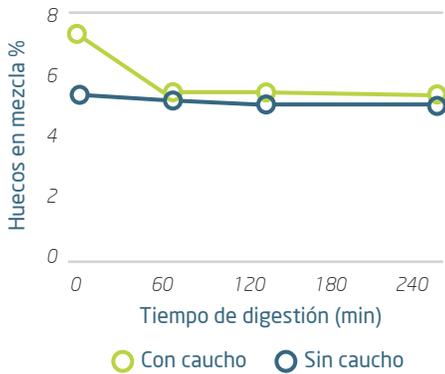


Figura 2. Evolución de la compactabilidad con el tiempo de digestión en mezclas por vía seca.

El contenido de huecos en mezcla disminuye con el tiempo de digestión. Si el tiempo de digestión se prolonga más allá de una hora no se consiguen mejoras adicionales en la compactación.

Estos resultados parecen indicar que durante la primera hora de digestión las partículas de caucho pierden parte de las propiedades elásticas que entorpecen la compactación. Los huecos de la mezcla de referencia apenas dependen de la permanencia en estufa, lo que pone de manifiesto que la importante variación de huecos registrada en la mezcla

(2) "Mezclas bituminosas modificadas por adición de polvo de neumáticos". J. Gallego. CEDEX (2001). ISBN: 84-7790-363-8

con caucho durante la primera hora no puede deberse más que a la pérdida de elasticidad de las partículas de caucho que inicialmente dificultan la compactación.

El siguiente ejemplo procedente de la misma referencia, concerniente a betunes recuperados mediante disolventes de mezclas con caucho por vía seca, también indica que hay una modificación parcial del ligante. En la siguiente gráfica se evidencia cómo al transcurrir el tiempo de digestión se produce un incremento del punto de reblandecimiento con una pendiente que es mayor en el ligante de la mezcla con caucho que en el de la mezcla sin caucho, utilizada como referencia y mantenida igualmente en estufa:

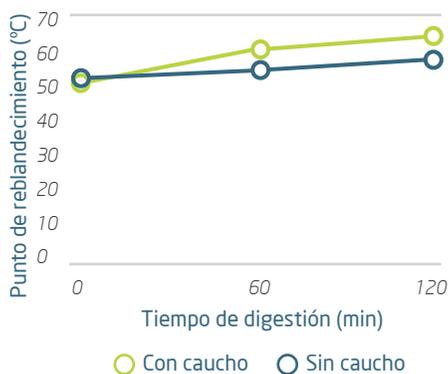


Figura 3. Evolución de la temperatura de reblandecimiento del betún con el tiempo de digestión por vía seca

No obstante, esta modificación no llega a los niveles que se consiguen en la vía húmeda puesto que la interacción betún-caucho no cuenta con la alta energía de agitación que se emplea en la vía húmeda, e incluso los áridos con su absorción compiten por el betún con las partículas de caucho.

3.3 Características del caucho a emplear en las mezclas bituminosas

En cuanto a las características del caucho a emplear, el factor que más influye es la granulometría del polvo de neumático. En general, granulometrías más gruesas ralentizan la interacción betún-caucho y acentúan los problemas de sedimentación y los de compactación. Son aconsejables granulometrías continuas, con tamaños máximos de 0,8 mm para la vía húmeda y tamaños máximos de 0,5 mm para la vía seca.

La composición química del caucho también tiene influencia en las características finales. El parámetro de control debe ser el porcentaje de fracción elastomérica, así como el contenido de caucho natural en la misma. Son preferibles, para ambos parámetros, valores altos.

Por último, debe considerarse el método de molienda del caucho: a temperatura ambiente o criogénico. En general, es aconsejable el molido a temperatura ambiente, ya que ofrece más superficie específica, y además, es el más habitual en el mercado.





Diseño de las mezclas bituminosas con caucho

4

Los componentes habituales de las mezclas bituminosas son los áridos, el polvo mineral y un ligante hidrocarbonado. Las distintas combinaciones de estos componentes hacen que exista una infinidad de tipos de mezclas bituminosas, óptimas en cada caso para unas determinadas aplicaciones.

El proceso de diseño comienza con la elección del tipo de mezcla bituminosa a utilizar, los áridos de naturaleza más adecuada, el tipo de polvo mineral a aportar, la granulometría del conjunto de partículas minerales y el tipo de ligante. Una vez tomadas estas decisiones se comienza el proceso de dosificación en laboratorio, dónde se irán fabricando y ensayando ligeras variaciones de la composición elegida, hasta determinar la composición óptima.

El resultado final es una fórmula de trabajo que contiene tanto la proporción óptima de cada componente como datos relevantes sobre la temperatura de fabricación y compactación, y que irá acompañada de las características de la mezcla bituminosa: densidad, huecos en la mezcla, resistencia a la acción del agua y a la deformación plástica, u otras que resulten de interés por el tipo de mezcla de que se trate.

Probablemente las mezclas bituminosas destinadas a capas de rodadura constituyen los materiales con mayores prestaciones. Deben estar en contacto directo con las cargas del tráfico y están particularmente expuestas a los agentes meteorológicos: lluvia, cambios de temperatura, etc. Por ello los materiales que se emplean, áridos y ligantes, ofrecen mayores prestaciones de las que habitualmente se exigen en capas inferiores. Nos estamos refiriendo a mezclas bituminosas porosas (PA), de granulometría discontinua (BBTM), mezclas especiales antirreflexión de fisuras y mezclas tipo Stone Matrix Asphalt (SMA). En todos los casos el árido deberá resistir el pulimento por el tráfico y la mezcla bituminosa el ataque del agua, las roderas y si es posible la reflexión de fisuras. En el caso de mezclas abiertas (PA y BBTM B) también se les confía el rápido drenaje del agua de lluvia hacia las cunetas con la mínima afectación al tráfico.

Al resto de capas, con una misión principalmente estructural, de transmisión y reparto de cargas a la explanada, se les pedirá resistencia a las roderas y robustez estructural, aunque en general la práctica habitual es utilizar áridos y ligantes con menores prestaciones, puesto

que las tensiones llegan a ellas más atenuadas y los agentes meteorológicos les afectan con menos intensidad. Generalmente se trata de mezclas bituminosas de granulometría continua, del tipo Asphalt Concrete (AC).

Como se ha visto en el Capítulo 3 el caucho de neumáticos puede incorporarse en las mezclas bituminosas por vía seca o húmeda. Tanto en las mezclas bituminosas para capas de rodadura como en las mezclas bituminosas para capas inferiores, las propiedades que aporta el caucho a las mezclas bituminosas son positivas desde el punto de vista técnico y ayudan a cumplir la especialización que cada capa tiene confiada. Para ello el diseño de la mezcla debe atender algunas peculiaridades de las mezclas bituminosas con caucho, que por lo demás no implican mayor complicación que cuando no se introduce caucho.

Este capítulo, dedicado a los procesos de diseño de las mezclas bituminosas con caucho, se centrará en las peculiaridades que requieren atención durante el proceso de diseño y dosificación, de modo que se obtenga el máximo beneficio con empleo de caucho.

4.1 Ideas incorrectas sobre la dosificación de mezclas bituminosas con caucho

Antes de dar las directrices correctas sobre el diseño de mezclas bituminosas es conveniente desmentir algunas ideas que no son correctas, al menos tomadas con generalidad:

- No es correcto aplicar fórmulas de trabajo preexistentes a mezclas bituminosas que ahora vayan a incorporar caucho. Por ejemplo, si una planta fabrica habitualmente una mezcla bituminosa tipo AC 16 surf 50/70 S y comienza a fabricar mezcla AC 16 surf BC 50/70 S debe realizar en laboratorio un diseño completo, o al menos una comprobación con todos los ensayos que se exigen a las mezclas AC, para confirmar que las propiedades de la nueva

mezcla siguen cumpliendo especificaciones, y evaluar en qué manera ha afectado el cambio de ligante. En algunos casos podría ser necesario retocar la fórmula de trabajo que se venía utilizando sin caucho. Este ejemplo es aplicable a todos los tipos de mezclas con caucho.

- Si bien es cierto que la introducción de caucho incrementa, casi siempre ligeramente, el contenido de huecos en mezcla respecto a los que tendría la mezcla análoga sin caucho, estos aumentos suelen ser moderados, de varias décimas, por lo que en muchos casos no se precisan retoques en la fórmula o si se precisan son mínimos. Cuando la presencia de caucho, en los contenidos que se recomiendan en esta Guía, suponga un incremento fuerte de huecos en mezcla se deberán revisar las temperaturas de fabricación y la correcta digestión del caucho, sobre todo en la vía seca. Sólo en contadas ocasiones se precisan retoques granulométricos ad hoc, a la vista de los resultados de laboratorio.
- Debe decirse que las mezclas con caucho pueden funcionar correctamente con el mismo contenido de ligante que las mezclas análogas, desde luego cuando se trabaja por vía húmeda; por vía seca sí suelen añadirse dos décimas de ligante, para contribuir a obtener el mismo porcentaje de huecos en mezcla que si no se emplea caucho. Pero por motivos de comportamiento mecánico, si la digestión ha sido completada, no suele ser necesario incrementar el contenido de ligante. No obstante, la magnífica resistencia a las deformaciones plásticas que ofrecen las mezclas bituminosas con caucho permiten incrementar el contenido de ligante para obtener una durabilidad incrementada.

En todo caso será el proceso de dosificación en laboratorio el que ponga de manifiesto las propiedades de la mezcla y la fórmula de trabajo más adecuada.



4.2 Granulometría de las mezclas con caucho y huecos en mezcla

Los ligantes con caucho conservan una proporción de partículas de caucho sin integrarse totalmente en el betún, que quedan en suspensión y mantienen cierta elasticidad. En la vía seca este fenómeno es más acentuado.

La presencia de estas partículas puede afectar a la estructura final del esqueleto mineral ya que por un lado se está añadiendo un nuevo sólido (las partículas de caucho que quedan sin integrarse en el betún) y por otro estas partículas presentan cierta elasticidad, lo que hace que durante la compactación supongan un obstáculo para la óptima y durable acomodación de las partículas minerales. En efecto, se ha comprobado que estas partículas de caucho "descomprimen" la mezcla bituminosa al cesar la compactación si la temperatura de la mezcla permite aún cierta movilidad a las partículas minerales.

Sin embargo, la granulometría de una mezcla bituminosa no ha de sufrir, en principio, cambios importantes debidos a la presencia de caucho siempre que la granulometría del caucho y su contenido en la mezcla sean los que se reco-

miendan en esta Guía y que el proceso de digestión se haya completado, aspecto éste que reclama especial atención en la vía seca.

La granulometría será por tanto la que corresponda al tipo de mezcla de que se trate: AC, BBTM, SMA o antifisuras. Durante la dosificación en laboratorio se medirá el porcentaje de huecos en mezcla que deberá ajustarse a lo prescrito con carácter general para el tipo de mezcla bituminosa de que se trate. Si se observa que el porcentaje de huecos en mezcla es más elevado de lo deseado, se podrá como en el caso general, incrementar el porcentaje de finos o el ligante, pero no sin antes analizar la posibilidad de actuar sobre los siguientes parámetros relacionados con el caucho:

VÍA HÚMEDA:

- Revisar el contenido de partículas de caucho en el betún, y su viscosidad.
- Incrementar 5-10°C la temperatura de fabricación de la mezcla bituminosa, para mejorar la trabajabilidad de la mezcla.

VÍA SECA:

- Reducir la granulometría del caucho. Cuanto menor es el tamaño máximo del caucho menores serán los problemas de compactación originados por el caucho.
- Reducir el contenido de caucho en la mezcla. A menor contenido de partículas de caucho menores serán los problemas de compactación.
- Comprobar que la mezcla ha tenido tiempo suficiente para la digestión del caucho.
- Elevar 5-10°C la temperatura de fabricación de la mezcla bituminosa, para facilitar tanto la digestión del caucho como la trabajabilidad de la mezcla.

Para minimizar los problemas de compactabilidad de las mezclas bituminosas con caucho se aconseja emplear caucho de granulometría 0-0,5 mm en el caso de la vía seca, y 0-0,8 mm en la vía húmeda. No obstante, aún por vía húmeda si el mezclador dispone de una limitada energía convendría utilizar caucho de granulometría 0-0,5 mm.

En el Anexo I de esta Guía se presentan a modo de ejemplo formulaciones de los tipos de mezclas bituminosas con caucho más frecuentes. En todos ellos se ha utilizado la misma granulometría con caucho y sin caucho, y para el mismo contenido de ligante se observa en la Tabla 7 que la presencia de caucho supone pequeñas variaciones en el contenido de huecos en mezcla, que no han hecho necesario retocar la granulometría:

Tipo de mezcla	Tipo Ligante	Ligante s/a (%)	Contenido de huecos en mezcla (%)		
			Sin caucho	Vía húmeda	Vía seca
BBTM 11 A	PMB 45/80-60, PMB 45/80-60C	5,5	4,3	4,8	4,40
BBTM 11 B	PMB 45/80-65, PMB 45/80-65C	5,0	16,3	16,6	-
PA 11	PMB 45/80-65, PMB 45/80-65C	4,5	24,2	23,3	-
SMA 11	PMB 45/80-65+fibra, PMB 45/80-65C	6,2	4,5	4,8	4,8
ANTIFISURAS	BMAVC-1	9,0	-	4,4	-
AC 16 surf S	50/70, BC 50/70	5,0	4,5	4,5	-
AC 22 bin S	50/70, BC 50/70	4,5	4,9	5,4	5,5
AC 32 base S	35/50, BC 35/50	4,5	6,4	6,7	-

Tabla 7. Contenido de huecos en mezcla (%). Anexo I

No obstante, y a criterio del proyectista, podría haberse incrementado ligeramente el contenido de ligante, ya que la adición de caucho, como se ve en el Anexo I, estabiliza la mezcla frente a las deformaciones plásticas, lo que en general da un pequeño margen para incrementar el contenido de ligante.

4.3 Temperaturas de envuelta y compactación

En las mezclas bituminosas la temperatura de fabricación juega un papel decisivo en el proceso de envuelta de los áridos por el ligante mediante el que se crea alrededor de éstos una película con propiedades aglomerantes. Es importante que todo el árido quede cubierto por el ligante para conseguir resistencia mecánica y resistencia a la acción del agua. Las temperaturas más altas favorecen este proceso.

En el caso de las mezclas con caucho la temperatura de fabricación tiene una importancia aún más destacada si cabe, ya que:

- En las mezclas por vía húmeda, los ligantes con caucho tienen más viscosidad que sus homólogos sin caucho, por lo que suelen precisar temperaturas más altas para una

correcta envuelta de los áridos. Esto es más cierto cuanto mayor es el contenido de caucho en el ligante.

- En las mezclas por vía seca, que precisan por tanto digerir el caucho, la temperatura mantenida durante un período que suele rondar la hora es fundamental para que la digestión progrese. Sin temperatura no puede avanzar la digestión.

Por ambos motivos las mezclas bituminosas con caucho pueden precisar temperaturas más altas.

En el Anexo I, en el que se muestran diversos ejemplos de dosificación, las temperaturas a las que se han fabricado las mezclas fueron las que se resumen en la Tabla 8, y que pueden servir como recomendación para cada tipo de mezcla.

Tipo de mezcla	Tipo Ligante	Ligante s/a (%)	Temperatura (°C)			
			Sin caucho	Vía húmeda	Vía seca	
					Fabricación	Digestión (t > 90 min)
BBTM 11 A	PMB 45/80-60 PMB 45/80-60C	5,5	165	165	170	160
BBTM 11 B	PMB 45/80-65 PMB 45/80-65C	5,0	165	165	-	-
PA 11	PMB 45/80-65 PMB 45/80-65C	4,5	165	165	-	-
SMA 11	PMB 45/80-65+fibra PMB 45/80-65C	6,2	165	165	170	160
ANTIFISURAS	BMAVC-1	9,0	-	175	-	-
AC 16 surf S	50/70 BC 50/70	5,0	160	165	-	-
AC 22 bin S	50/70 BC 50/70	4,5	160	165	170	160
AC 32 base S	35/50 BC 35/50	4,5	160	165	-	-

*Para asegurar la digestión del caucho

Tabla 8. Temperaturas de envuelta o fabricación de las mezclas con caucho (°C). Anexo I



Según se observa en la Tabla 8, con los betunes puros se trabajó a 160°C, con los betunes mejorados con caucho y los modificados con caucho y polímeros a 165°C y en las mezclas con caucho por vía seca se trabajó a 170°C y además, en este último caso, la mezcla estuvo en estufa a 160°C durante 90 minutos para asegurar la digestión.

Las temperaturas de compactación estuvieron 10°C por debajo de las de fabricación, excepto en las mezclas por vía seca, que se compactaron a 5°C por debajo de la temperatura de digestión.

4.4 Ensayos a realizar para la elaboración de la fórmula de trabajo

Los tipos de mezclas que se estudian en esta Guía, con los contenidos de caucho que se recomiendan, deben formularse de acuerdo a los procedimientos habituales en España, que vienen dados por la siguiente normativa:

	Tipo de mezclas
Artículo 543 del PG-3	BBTM A BBTM B PA
Artículo 542 del PG-3	AC

Tabla 9. Especificaciones técnicas de cada tipo de mezcla

En cuanto a las mezclas SMA, a la fecha de publicación de esta Guía, no están recogidas en la normativa Española. Sin embargo, se dispone ya de una propuesta de Pliego de Prescripciones realizada por el CEDEX, denominada “Mezclas Bituminosas en Caliente tipo SMA (Propuesta de normativa)”, y que se ha utilizado en esta Guía como documento de referencia, hasta que se disponga del correspondiente Pliego de Prescripciones oficialmente aprobado en España. Por último, en cuanto a las mezclas antifisuras con BMVAC-1 se han formulado de acuerdo con la experiencia española.

A continuación se relacionan las principales propiedades de las mezclas bituminosas y las normas de ensayo que son de aplicación.

4.4.1 Propiedades de las mezclas bituminosas y normas de ensayo en laboratorio

Las propiedades más elementales de una mezcla bituminosa son las denominadas volumétricas, en concreto se trata de la densidad y los huecos en mezcla.

La densidad de una mezcla bituminosa tiene dos variantes: la densidad aparente, es decir, la de la mezcla bituminosa incluyendo los huecos de aire que quedan en su interior (UNE-EN 12697-6) y su densidad máxima, sin huecos de aire, que se determina en picnómetro (UNE-EN 12697-5). Ésta segunda supone sólo un concepto teórico, cuya utilidad está en

el cálculo de los huecos de aire en la mezcla compactada (UNE-EN 12697-8) a partir del valor de su densidad aparente y del valor de la densidad máxima con picnómetro.

La densidad es una propiedad que no está sujeta a especificaciones, sobre todo porque su valor varía fuertemente en función de la naturaleza del árido utilizado, sin que ello suponga cambios en el comportamiento de la mezcla bituminosa. Sin embargo el contenido de huecos de aire en mezcla sí es de gran importancia: En las mezclas AC se limitan los contenidos mínimos para garantizar que en tiempo caluroso el ligante pueda dilatar ocupando huecos de aire. Sin embargo, en otras mezclas como las BBTM B o las PA se requieren unos contenidos de huecos de aire más elevados para permitir que el agua circule a través de dichos huecos en los episodios lluviosos hasta los elementos de drenaje de la calzada, asegurando así que el agua no se acumule en la superficie del pavimento.

En cualquier caso debe aclararse que los huecos de aire que quedan en mezcla deben ser el resultado de una compactación suficientemente enérgica sobre una granulometría de los áridos y unos contenidos de ligante concebidos para lograr dicho contenido de huecos, y no de una compactación deficiente.

En el caso de las mezclas SMA además de las propiedades anteriores se consideran dos parámetros adicionales, también volumétricos: el contenido de huecos en áridos y el porcentaje de huecos en áridos rellenos de betún. Los huecos en áridos deberán ser suficientes para albergar el betún que envolverá los áridos y los huecos de aire. El porcentaje de huecos rellenos debe dejar espacio para los huecos de aire que ocupará el betún cuando dilate en la época estival.

Una vez que la formulación cumple las propiedades volumétricas se deben estudiar las propiedades mecánicas.

En el caso de las mezclas tipo AC se estudian la resistencia a la acción del agua (UNE-EN

12697-12) y la resistencia a las roderas (UNE-EN 12697-22). El primer ensayo determina la pérdida de adherencia en la interfase árido-ligante que se produce por la saturación y acción del agua en las mezclas bituminosas. Por otro lado, el objeto del ensayo de pista es determinar la susceptibilidad de las mezclas bituminosas a las deformaciones plásticas durante la época estival, que por las altas temperaturas propicia la fluencia del material y la aparición de roderas.

En el caso de las mezclas BBTM A y BBTM B también se estudian las dos propiedades anteriores, exigiéndoles en general mayor resistencia al ataque del agua, ya que por su granulometría y por su posición, en rodadura y expuestas a la lluvia, son más propensas a padecer el problema. Con los mismos ensayos se ha diseñado la mezcla Antifisuras con betún de alta viscosidad BMAVC-1.

En el caso de las mezclas PA se exigen dos ensayos adicionales: el ensayo Cántabro (UNE-EN 12697-17) y el ensayo de escurrimiento de ligante (UNE-EN 12697-18). Las mezclas drenantes disponen de poco mástico lo que las hace más vulnerables a la disgregación, motivo por el que se realiza el ensayo cántabro. Y precisamente por el alto contenido de huecos y la limitación de arena también pueden presentar problemas de escurrimiento de ligante, especialmente durante el transporte a obra. Por ello se chequea esta posibilidad durante la formulación de la mezcla bituminosa con el ensayo de escurrimiento de ligante.

4.4.2 Interpretación de los ensayos de mezclas bituminosas con caucho

- **Mezclas con caucho por vía húmeda**

Dado que el caucho va incorporado en el ligante y que las especificaciones serán las mismas que en mezclas sin caucho, no hay cambios en los ensayos o en su interpretación que deban mencionarse. Con carácter general las tendencias que se observan en una mezcla bituminosa con caucho por vía húmeda respecto a su homóloga sin caucho son:

- Un ligero aumento del contenido de huecos en mezcla, que si fuera significativo puede compensarse con un ligero aumento del contenido de ligante o un retoque granulométrico.
- Una resistencia a la acción del agua ligeramente menor que sin caucho, aunque no resulta difícil cumplir especificaciones.
- Una mayor resistencia a las deformaciones plásticas.

- **Mezclas con caucho por vía seca**

Cuando se incorpora el caucho por vía seca se exigirán las mismas propiedades y valores que cuando no se incorpora caucho. Sin embargo, debido al proceso de digestión que ocurre por vía seca en el seno de la mezcla bituminosa, todos los ensayos ofrecen resultados que dependen del progreso de la digestión que se haya alcanzado. En efecto, cuanto mayor es el tiempo de digestión, menor es la presencia de partículas elásticas de caucho libre en la mezcla, por lo que la digestión tiene los siguientes efectos en la mezcla bituminosa:

- Los huecos en mezcla disminuyen al mejorar la eficacia de la compactación.
- La resistencia a la acción del agua aumenta con la aparición de una interfase ligante-caucho de gran afinidad.
- La resistencia a la disgregación también disminuye en el caso de mezclas drenantes.

Únicamente la resistencia a las deformaciones plásticas evoluciona poco en función del tiempo de digestión, mostrando incluso antes de la digestión los efectos beneficiosos del caucho frente a la formación de roderas.

Debido a estos cambios durante la digestión, en el laboratorio habrán de adoptarse las medidas para que, antes de medir las propiedades

mencionadas, la mezcla disponga de un tiempo y temperaturas de digestión similares a las que puedan asegurarse en obra. De otro modo obtendríamos unos valores de sus propiedades que podrían no ser representativos de los de las mezclas colocadas en obra.

4.5 Normas de buena práctica en el laboratorio

El trabajo en el laboratorio con mezclas bituminosas con caucho no es muy diferente del de mezclas sin caucho, pero conviene hacer algunas recomendaciones de buena práctica.

- **Mezclas con caucho por vía húmeda**

Tal y como se comenta en el apartado 4.3, con los betunes modificados con caucho se trabaja a la misma temperatura que con los betunes modificados con polímeros. Con los betunes mejorados con caucho se trabaja a 5°C por encima de lo que se trabaja con sus homólogos sin caucho. Por último, con el betún de alta viscosidad se trabaja a 175°C.

En cualquier caso, los betunes con caucho deben removerse, por ejemplo con una espátula o cacillo, antes de tomar la porción correspondiente para cada probeta. Se trata de homogeneizar el ligante, corrigiendo en el momento los eventuales problemas de decantación del caucho en el fondo del recipiente. Cuando se fabrica toda la mezcla bituminosa en una sola amasada, y después se fracciona la masa para fabricar varias probetas este problema se minimiza, pero aún así debe removerse el ligante antes de añadirlo a los áridos para homogeneizarlo antes de fabricar la mezcla.

Se comenzará con la envuelta en blanco de los áridos, la mezcla con el ligante y posteriormente la incorporación del polvo mineral. Durante la envuelta de los áridos y debido a la mayor viscosidad de estos ligantes, es posible que sea necesario prolongar ligeramente el tiempo de envuelta unos 15 segundos más que en mezclas sin caucho. La práctica, en las primeras envueltas, será la que recomiende el período de tiempo



más adecuado con cada ligante y cada granulometría de los áridos. Deberá conseguirse, en todo caso, la completa envuelta de los áridos, lo que puede verificarse a simple vista sobre todo en las partículas más gruesas del árido.

El resto de operaciones no varía con respecto a las mezclas bituminosas sin caucho.

- **Mezclas con caucho por vía seca**

En general las mezclas con caucho por vía seca, en las proporciones recomendadas en esta Guía, han de fabricarse 10°C por encima de sus homólogas sin caucho y en ningún caso a menos de 170°C.

En este caso no es preciso remover el ligante, puesto que no contiene caucho, pero hay que cuidar especialmente el orden de incorporación de los componentes de la mezcla: se mezclan en blanco los áridos con el caucho, hasta conseguir una mezcla homogénea, y entonces se añade el ligante hasta conseguir la perfecta envuelta de los áridos (la envuelta del caucho es difícil de apreciar). Por último se incorpora el polvo mineral y se completa el mezclado. Los tiempos totales de envuelta suelen ser del orden de 30 segundos superiores a los de las mezclas homólogas sin caucho.

Una vez que se ha completado la envuelta debe permitirse que el proceso de digestión avance. Como se explicó en el Capítulo 3, se trata de un fenómeno progresivo, favorecido por la temperatura, por lo que la mezcla recién fabricada y, antes de su compactación, ha de colocarse dentro de la estufa a una temperatura 10°C por debajo de la de fabricación, durante un tiempo que garantice un adecuado grado de digestión.

Sobre el proceso de digestión en laboratorio deben hacerse las siguientes recomendaciones. En primer lugar la masa ya mezclada debe colocarse en bandejas metálicas, en porciones que se correspondan con las probetas a fabricar. Es conveniente tapar la mezcla, es suficiente con una lámina de aluminio que después se desecha, de modo que se limite su contacto con el aire. La razón es que estas pequeñas porciones de mezcla tienden a oxidarse más de lo que lo haría in situ esa porción individual de mezcla si formase parte de la carga de un camión, rodeada de más mezcla y de las paredes de la caja del camión. Otra razón más radica en el hecho de que a las temperaturas de digestión la mezcla emite un fuerte olor, que se minimiza al tapar la mezcla. Por este último motivo las estufas que se dediquen a la digestión de mezclas con caucho por vía seca

deben ser las situadas en las zonas del laboratorio mejor ventiladas.

Una vez transcurrido el tiempo de digestión que se desee, las muestras individuales se van sacando de la estufa y se compactan. Si la digestión no es suficiente la compactación no será óptima. A este respecto conviene compactar algunas probetas con 2 horas de digestión, tiempo suficiente para garantizar la digestión de tal forma que se tenga un valor de referencia de densidad aparente, que nos servirá para constatar que con tiempos de digestión menores la compactación es adecuada. Si la densidad que obtenemos durante una compactación es insuficiente debemos revisar todo el proceso: granulometría y contenido de caucho, temperatura y tiempo de digestión.

En cuanto al cálculo de la densidad y los huecos de aire en las mezclas por vía seca se recomienda el método basado en las densidades máxima y aparente (UNE-EN 12697-5, UNE-EN 12697-6 y UNE-EN 12697-8). Los métodos basados en la densidad de los áridos en picnómetro son difíciles de aplicar en la práctica, porque las partículas de caucho presentes entre los áridos se comportan de modo diferente que éstos, y dificultan el ensayo.

4.6 Redacción de la fórmula de trabajo

La fórmula de trabajo de una mezcla bituminosa es un documento técnico que indica, a partir de los ensayos previos realizados en el laboratorio, el procedimiento que ha de seguirse en la central de mezclas bituminosas durante la fabricación a escala industrial.

Los elementos que constituyen la fórmula de trabajo, en el caso general de mezclas sin caucho, son los siguientes:

- Identificación y proporción a emplear de cada fracción de árido.
- Granulometría de los áridos combinados.



- Dosificación de polvo mineral.
- Tipo y contenido del ligante.
- Tiempo de mezcla en blanco y de mezcla con el ligante.
- Temperatura de los áridos antes de entrar en el mezclador.
- Temperatura de mezclado y temperatura mínima de la mezcla al salir del mezclador.
- Temperatura máxima de la mezcla al iniciar la compactación y la mínima al concluir.

En el caso de las mezclas bituminosas con caucho la fórmula de trabajo tendrá todos los elementos anteriores aunque con valores diferentes en algunos casos. Así cuando se trabaja con caucho por vía húmeda, el tipo de ligante se referirá a alguno de los ligantes con caucho (mejorados, modificados o de alta viscosidad).

Sin embargo, cuando se incorpora el caucho por vía seca la fórmula de trabajo deberá in-



corporar nuevos elementos propios de esta tecnología. En particular deberá definir:

- Contenido de caucho.
- Granulometría del caucho.
- Orden de incorporación en el proceso de mezclado: Áridos + caucho + betún + polvo mineral.
- Tiempo mínimo de digestión.

Por lo tanto, la fórmula de trabajo de una mezcla bituminosa con caucho por vía húmeda es en todo similar a la de una mezcla bituminosa sin caucho. Sin embargo la de una mezcla con caucho por vía seca debe definir lo referente al polvo de caucho y su incorporación en el proceso.

Por lo demás, la fórmula de trabajo deberá incluir las características de la mezcla bituminosa que se ha fabricado en laboratorio durante el proceso de diseño, según se muestra en la Tabla 10:

PARA TODAS LAS MEZCLAS:	MEZCLAS DRENANTES:
- Porcentaje de huecos en aire	- Resistencia a la pérdida de partículas
- Densidad aparente	- Escurrimiento de ligante
- Resistencia a la acción del agua	SMA:
- Resistencia a las deformaciones plásticas	% huecos en áridos

Tabla 10. Características de la mezcla bituminosa que debe contener la fórmula de trabajo



Fabricación de mezclas bituminosas con caucho

5

Una vez que se dispone de la fórmula de trabajo de la mezcla bituminosa, elaborada en laboratorio, puede fabricarse ya en la central de fabricación de mezclas. El caucho puede introducirse en la mezcla de dos modos:

- **Vía húmeda:** producción de betunes caucho y posterior fabricación de la mezcla bituminosa con ellos. Se distinguen dos procedimientos de fabricación:
 - Betunes producidos en terminal de fabricación de betunes modificados, y posterior transporte y almacenamiento del betún caucho en la central de mezclas bituminosas, hasta que se emplee.
 - Betunes producidos in situ y en tiempo real, en una unidad de betunes caucho situada en la planta de fabricación de mezclas, que pueden también almacenarse unas horas hasta que se emplee.
- **Vía seca:** fabricación de mezclas incorporando el caucho directamente en el mezclador de la central de mezclas bituminosas, junto a los áridos y al ligante base.

Estas variantes dan lugar a diferentes procedimientos a tener en cuenta en la operación de la central de mezclas bituminosas, que se analizarán en este capítulo.

Además, y dado que cada vez son más frecuentes por diversas razones las centrales de fabricación discontinuas, se introducirán cuando corresponda algunos comentarios específicos para este tipo de instalaciones.

5.1 Fabricación de mezclas bituminosas con betunes caucho producidos en terminal de betunes modificados

En este caso la operación de la central de mezclas bituminosas es muy similar al caso general de betunes sin caucho. Los tipos más habituales de betunes caucho que se sirven desde terminal son los betunes mejorados con caucho (BC) y los betunes modificados con caucho y polímeros (PMB-C).



Figura 4. Terminal de modificación de betunes



Figura 5. Camión cisterna para abastecimiento de ligantes

5.1.1 Almacenamiento y manejo de los betunes caucho

Estos betunes caucho fabricados en terminal de betunes modificados se sirven a la central de mezclas en camiones cisterna. Al llegar se trasvasan a los tanques de la central, para lo cual el propio camión está equipado con bombas y mangueras apropiadas.

Los betunes caucho presentan tendencia a la decantación, puesto que en muchos de ellos subsisten partículas de caucho en suspensión. Probablemente los betunes caucho fabricados en terminal de betunes son los más estables, pero aún así conviene tomar medidas para evitar incidencias relacionadas con eventuales decantaciones.

En este sentido, los tanques en que se depositen estos ligantes con caucho deben disponer de un sistema de calefacción en el recubrimiento exterior del tanque y un aislamiento, y de un removedor que mantenga el ligante continuamente en movimiento. Es preferible la utilización de tanques verticales dado que esta disposición puede favorecer las corrientes de convección.

Como normas generales para este periodo de almacenamiento, hasta que el ligante se consuma, se pueden indicar las siguientes:

- La temperatura de almacenamiento debe ser de unos 160°C en todos los betunes caucho procedentes de terminal.
- Para periodos de almacenamiento mayores de 24 horas pueden permitirse temperaturas algo más bajas, del orden de 145-150°C, aumentando la temperatura del tanque unas horas antes de su utilización.
- No son aconsejables periodos de almacenamiento mayores de 72 horas.

El propósito de estas indicaciones es disponer del ligante a temperatura suficiente para su empleo directo en la fabricación de mezclas, y a la vez propiciar un progreso lo más lento posible de sus propiedades, proceso que se ve acelerado por la temperatura.

Los ligantes del tipo BMAVC no se incluyen en este apartado, ya que no suelen fabricarse en terminal, sino in situ, debido a su alta viscosidad.



Figura 6. Tanques de almacenamiento vertical

5.1.2 Temperaturas de Trabajo

En las sucesivas fases de operación en la central deberemos respetar las indicaciones de la fórmula de trabajo de la mezcla. Las temperaturas que se recomiendan son las siguientes:

- Temperatura del betún al entrar en el mezclador: 160-165°C.
- Temperatura máxima y mínima de los áridos: 165-175°C.
- Temperatura de mezclado: 165°C.

Es deseable que la mezcla bituminosa con este tipo de ligantes salga de la central de fabricación a una temperatura de 160-165°C.

5.1.3 Tiempo de digestión

Los betunes caucho procedentes de terminal han completado su digestión ya que cuando llegan a la central acumulan un tiempo de varias horas en el camión cisterna. Por lo tanto no es necesario establecer ninguna medida para verificar su digestión.



Figura 7. Central discontinua de fabricación de mezclas asfálticas

5.1.4 Tiempo de envuelta

Este tipo de ligantes no ofrece dificultades adicionales de envuelta cuando se trabaja a escala industrial. Por lo tanto la utilización de estos betunes caucho procedentes de terminal no exige habitualmente un incremento del tiempo de envuelta y por lo tanto una disminución de la producción horaria, al menos por este concepto.

5.1.5 Producción horaria de la central

En este caso la capacidad de la central no se ve reducida respecto a su funcionamiento con betunes sin caucho. Hay que cuidar especialmente los siguientes aspectos

- Evitar discontinuidades en el stock de betunes caucho: se debe disponer de betún caucho almacenado para dos días de trabajo. Para ello la planta debe estar provista con tanques en número y tipo adecuados.
- Se debe comprobar que las bombas que impulsan el betún caucho hasta la báscula de la central tienen la potencia necesaria. Aunque estos ligantes presentan viscosidades



Figura 8. Central continua de fabricación de mezclas asfálticas

similares a las de los betunes modificados con polímeros conviene comprobar que las bombas de la central son capaces de llenar la báscula en el tiempo disponible para ello en el ciclo. De otro modo el ciclo se incrementaría y la producción horaria disminuiría.

5.1.6 Fabricación en centrales continuas

Por lo que respecta a la incorporación del betún con los áridos en este tipo de plantas, como es sabido se emplean, en lugar de dispositivos ponderales, bombas volumétricas y caudalímetros másicos que permiten dosificar el ligante en continuo y proporcionalmente a la entrada de áridos en el tambor secador mezclador.

Cuando el betún caucho procede de terminal el proceso es idéntico al que se sigue en la central con otros ligantes sin caucho. Habrá que comprobar también en estas plantas que la bomba y los dispositivos de medida trabajan sin dificultad con el ligante caucho.

5.2 Fabricación de mezclas bituminosas con betunes caucho producidos in situ

En este caso los betunes caucho se producen en una unidad de fabricación que se sitúa en la central de mezclas bituminosas. Estas unidades pueden ser fijas, asociadas a una deter-

minada central de fabricación, o móviles, que se estacionan en una central para acometer un proyecto concreto.

La unidad de fabricación tiene el objetivo de facilitar la interacción entre el betún y el caucho con la mayor eficacia posible. Existen diversos tipos de unidades de fabricación de betunes caucho, que se pueden consultar en la *"Guía para la fabricación de betunes con polvo de neumáticos"*, editada por Signus.

Esquemáticamente, en todos los casos la unidad de fabricación debería disponer de los siguientes elementos:

- Una toma para la entrada de betún de penetración desde los tanques de la central de fabricación.
- Una central térmica, que sirve a un intercambiador de calor, por si fuera necesario elevar la temperatura del betún que entra en el sistema, y todo el circuito térmico que recorre los distintos elementos de la unidad.
- Una tolva de alimentación del caucho. Puede haber dos, para utilizar simultáneamente caucho y un polímero.
- Un depósito para incluir aditivos para mezclas semicalientes o aditivos con otra función.

- Dispositivos para pesaje o dosificación volumétrica de betún, caucho, polímero y aditivos.
- Un mezclador donde se agite energicamente la mezcla de todos los componentes, para conseguir una buena integración de los mismos.
- Un tanque de digestión, en el que se complete dicho proceso (pueden coincidir mezclador y tanque digestor, si el primero tiene dimensiones suficientes).
- Un sistema de impulsión que suministre el producto terminado desde el tanque de digestión hasta el mezclador o hasta los eventuales tanques de almacenamiento.
- Un sistema de control, desde donde se programe y supervise toda la operación del equipo.



Figura 9. Unidad de fabricación in situ de betunes caucho

Los betunes caucho que habitualmente se suministran con este tipo de equipos son los betunes mejorados (BC), los betunes modificados con caucho y polímeros (PMB-C) y los betunes de alta viscosidad (BMAVC).

5.2.1 Conexión de la unidad de betunes caucho a la central de fabricación de mezclas

La unidad de fabricación de betunes caucho debe integrarse en el funcionamiento de la central de mezclas bituminosas (Figura 10). Desde el punto de vista material esta integración exige los siguientes elementos:

- Conexión con los tanques de betún neto de la central, para suministrar a la unidad el betún a modificar.
- Conexión con la báscula de la central, o bien los tanques de almacenamiento, para servir el betún caucho que se ha fabricado.

Estos requisitos se resuelven habitualmente mediante la instalación de una válvula de tres vías que permite varias configuraciones, según se desee utilizar la unidad de betunes caucho o suministrar betún neto a la central para fabricar mezclas sin caucho.

En lo que se refiere a los sistemas de control y eléctricos de la central y de la unidad de betún caucho también se precisan conexiones:

- Conexión de los dos sistemas de control, sobre todo en el caso de que el betún caucho se suministre directamente de la unidad a la báscula de la central, en cuyo caso debe haber una perfecta sincronización entre ambas instalaciones. Ello se logra a través de una conexión eléctrica que debe realizar el especialista electromecánico. No obstante, si la unidad de betunes caucho va a enviar el producto a tanques de almacenamiento, que pertenecen a la central, será el propio sistema de control de la unidad el que lo haga de modo autónomo, e independientemente del control de la central, que gobernará sólo el suministro desde los tanques de almacenamiento.
- Conexión de suministro eléctrico, que suele hacerse desde el transformador eléctrico

co que alimenta la central. Si la potencia contratada no es suficiente, lo que puede ocurrir en unidades móviles que se ubican temporalmente en una central, será preciso recurrir a un electrogenerador de potencia suficiente. Esta segunda opción es la menos recomendable, por el espacio que ocupa y el ruido que produce el electrogenerador.

Por último, si la unidad de betunes caucho no dispone de su propia central térmica será preciso conectarla al circuito térmico de la central. Pero no se recomienda esta opción ya que las temperaturas juegan un papel muy importante tanto en la correcta fabricación como en el manejo posterior del betún caucho, con lo que conviene que la unidad de fabricación sea autónoma desde el punto de vista térmico.

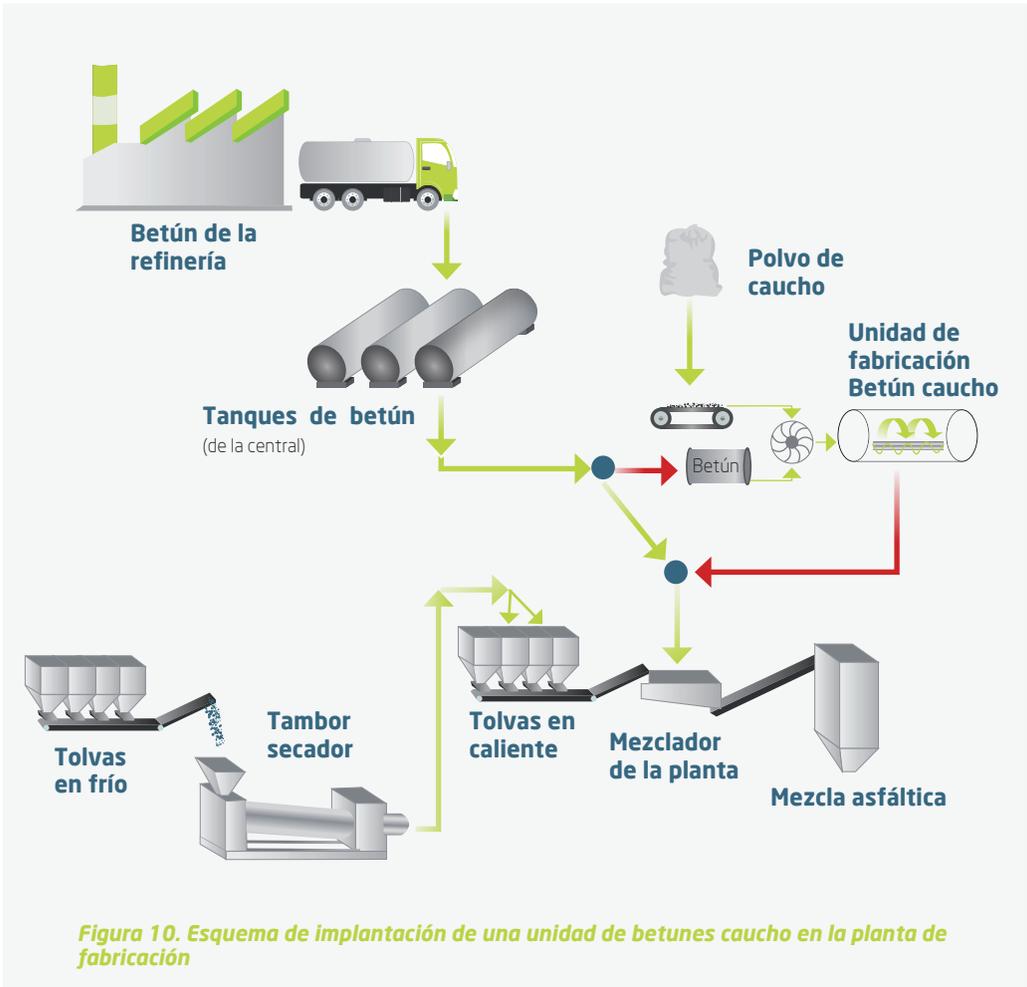


Figura 10. Esquema de implantación de una unidad de betunes caucho en la planta de fabricación

Otro aspecto no poco importante es la integración física de la unidad en los espacios disponibles de la central. Aunque la configuración de cada central de mezclas recomendará una implantación diferente para la unidad de betunes-caucho, existen unos principios que la experiencia ha demostrado válidos:

- Una unidad de fabricación ocupa unos 60 m². Por tanto la central deberá contar con tal superficie disponible.
- Deberá además, existir espacio suficiente para llenar las tolvas de caucho y polímero, lo que suele realizarse con maquinaria adecuada para manejar los big-bags en que se sirven estos materiales a obra.
- La localización debe ser lo más cercana posible a los tanques de la central, para minimizar la distancia de suministro y la longitud de conductos calefactados, y cercana también a la báscula (o a los tanques de almacenamiento), por los mismos motivos.
- Se debe cuidar, al implantar la unidad, afectar lo mínimo posible la funcionalidad de la central, de modo que no se dificulte la carga de las tolvas de árido, la carga de los tanques de betún, y sobre todo la trayectoria de los camiones que transportan la mezcla. Una disfunción de este tipo puede reducir la producción horaria de la central con el consiguiente perjuicio económico.

5.2.2 Almacenamiento del caucho y los polímeros

Tanto caucho como polímeros podrían suministrarse a la central de mezclas a granel, y depositarse en silos. Sin embargo por el momento es más frecuente que se sirvan en sacas o big-bags, con un peso aproximado de 1 tonelada. Cuando se trata de fabricar un betún modificado con caucho y polímero, éste último puede suministrarse de dos formas:

- Premezclado con el caucho en las proporciones adecuadas. Es el sistema adecuado cuando la unidad de betún caucho dispone de una única tolva para dosificar los productos modificadores.

- En sacas o big-bag distintas de las de caucho. En tal caso la unidad de betunes caucho debe contar con dos tolvas para dosificar separadamente el caucho y el polímero.

Cada saca o big-bag de producto modificador, caucho o polímero, ocupa una superficie de 1,2 m² aproximadamente. Se deberían tener acopiadas las sacas de caucho y polímero que se vayan a utilizar en al menos 3 jornadas de trabajo, para evitar paradas motivadas por incidencias en el suministro. En base a la producción diaria prevista resulta fácil calcular el stock de modificadores con el que debe contarse en la central.

En cuanto a las características del espacio destinado a almacenamiento de caucho y polímeros, sería preferible que estuviese bajo techo para protegerse de la lluvia. Si el caucho o el polímero cogen humedad durante su almacenamiento en la central, en el momento de utilizarse generan vapor de agua y espumas al entrar en contacto con el betún a alta temperatura lo que se traduce en una disminución de la producción horaria (para reducir el volumen de espuma), rebosamientos en el mezclador e incluso la posibilidad de accidentes que afecten a los operarios de la unidad.

No obstante, en muchas centrales no se dispone de espacio techado para tal fin, por lo que es práctica habitual, y debe exigirse, el suministro de caucho y polímero en sacas con camisa interior de polietileno, lo que preserva el material de la humedad aún en episodios lluviosos.



Figura 11. Stock de Big-bags de caucho



5.2.3 Almacenamiento de los betunes caucho hasta su utilización

La unidad de mezclado dispone, como se ha dicho, de un tanque de digestión (o de un mezclador amplio, que permite en una segunda fase la digestión) dotado de removedor que mantenga en movimiento el betún caucho, evitando decantaciones y favoreciendo el que la digestión llegue a completarse. El betún caucho que se suministra al mezclador de la central ya ha completado la digestión y está listo para su utilización en la fabricación de mezcla.

Sin embargo, por motivos logísticos puede ser conveniente disponer de tanques de almacenamiento en la central, dado que:

- La producción horaria de la unidad de betún caucho puede ser insuficiente para atender las necesidades de la obra. En estos casos los tanques de almacenamiento actúan

como reguladores recibiendo, por ejemplo, betún caucho de la unidad en jornadas largas, de 12 horas o más, y suministrándolo a la central en jornadas de 8 h.

- El disponer de un stock de betún caucho en la central garantiza que cualquier eventualidad, por ejemplo una avería en la unidad de betún caucho o un fallo en el suministro de betún, caucho o polímeros, no significará necesariamente la parada de la obra.

Los tanques de almacenamiento deberán cumplir lo establecido en el punto 5.1.1 de esta Guía.

5.2.4 Temperaturas de trabajo

La fórmula de trabajo de la mezcla indica las temperaturas que deben observarse durante el proceso. Las temperaturas de trabajo que se recomiendan aparecen en la Tabla 11.

	<i>Betunes mejorados (BC) y Betunes modificados (PMB-C)</i>	<i>Betunes de alta viscosidad (BMAVC)</i>
Temperatura del betún al entrar en el mezclador	160-165°C	170-175°C
Temperatura máxima y mínima de los áridos	165-175°C	175-185°C
Temperatura de mezclado	165°C	175°C

Tabla 11. Temperaturas de trabajo para los distintos betunes

Es deseable que la mezcla bituminosa con los betunes mejorados (BC) y los betunes modificados con caucho y polímero (PMB-C) salga de la central de fabricación a temperaturas de 160° - 165°C. Sin embargo, cuando se trata de betunes de alta viscosidad (BMAVC), la mezcla bituminosa no debería salir a menos de 170 - 175 °C.

5.2.5 Tiempo de digestión

Los betunes caucho producidos in situ, gracias al tiempo de digestión que forma parte de su proceso de fabricación, se sirven a la central con el proceso de digestión suficientemente avanzado, incluso cuando se fabrican y sirven directamente (sin tanque de almacenamiento de la central). Cuando sí existen tanques de almacenamiento en la central, donde el betún caucho producido se almacena y se sirve a la central, la digestión avanza aún más, y el problema podría ser su excesivo progreso. De ahí que se limite a 72 horas el tiempo de almacenamiento.

5.2.6 Tiempo de envuelta

Cuando el ligante fabricado in situ es del tipo mejorado con caucho (BC) o modificado con caucho y polímero (PMB-C) el tiempo de envuelta en la central es similar al que se precisa con betunes sin caucho, por lo que el empleo de estos betunes in situ no supone un alargamiento del ciclo de trabajo.

No obstante, se trata de una regla general que en ciertos casos, como mezclas con muchos finos o dotaciones de ligante limitadas, puede no cumplirse, por lo que al inicio de la obra es necesario observar el aspecto de las amasadas para detectar cualquier problema de envuelta que recomendase prolongar unos segundos la etapa del ciclo destinada al mezclado.

5.2.7 Producción horaria de la central

Como se ha dicho, el tiempo de envuelta en central en principio no tiene por qué ser mayor. Sin embargo otros factores pueden disminuir la producción horaria de la central de fabricación:

- La producción horaria de la unidad de betún caucho. Si la unidad produce, por ejemplo, 12 t/h de producto, la central no podrá producir en el mismo período más toneladas de mezcla que las que correspondan a esta cantidad de ligante. El problema puede solucionarse con tanques de al-

macenamiento y jornadas de la unidad de betún caucho más largas que la jornada de fabricación y extensión de mezcla.

- La capacidad de las bombas de la planta. En el caso de betunes mejorados (BC) y betunes modificados (PMB-C) la viscosidad no suele ser problema, pero en el caso de los betunes de alta viscosidad (BMAVC) se precisan bombas más potentes. Si la potencia no es suficiente el proceso de carga de la báscula se prolonga, por el poco caudal que se le suministra, y consecuentemente el ciclo de fabricación puede alargarse algunos segundos, disminuyendo la producción horaria. Para evitarlo hay que comprobar que las bombas disponibles en la unidad de betún caucho o en la central son suficientemente potentes.
- La capacidad de la báscula puede convertirse en un elemento limitador cuando se emplean BMAVC. Las mezclas bituminosas con este tipo de ligantes tienen dotaciones altas, en torno al 8-9% en peso de los áridos. Dado que las mezclas convencionales no suelen pasar del 5-6% las básculas suelen estar dimensionadas para esta última situación. Cuando se presenta este problema no existe más solución que cambiar la báscula por otra de mayor capacidad, lo que puede no resultar sencillo. La alternativa es fabricar amasadas de menor peso, que con la misma duración del ciclo suponen una disminución de la producción horaria. El problema merece un análisis previo para evitar este tipo de situaciones.

5.2.8 Fabricación en centrales continuas

Estas centrales no disponen de báscula para el ligante, sino que se alimentan en continuo y la dotación de ligante se controla con bombas volumétricas y caudalímetros máscos. Por tanto habrá que comprobar también en estas plantas que la bomba y los dispositivos de medida trabajan sin dificultad con el ligante caucho fabricado in situ.

5.3 Fabricación de mezclas bituminosas con caucho por vía seca

El procedimiento de vía seca consiste en incorporar el caucho a la mezcla bituminosa en el mezclador de la central en el momento de su fabricación, como si se tratase de una fracción de árido.

No obstante las partículas de caucho interactúan con el ligante de la mezcla, modificándolo parcialmente, en un proceso denominado digestión que se ve favorecido por el tiempo y la temperatura y que condiciona la fabricación y puesta en obra de las mezclas con caucho por vía seca.

5.3.1 Almacenamiento del caucho

Será necesario disponer en la central de fabricación de un stock de polvo de caucho que debería ser al menos el correspondiente a 3 jornadas de trabajo, para evitar interrupciones en la obra debidas a imprevistos en el suministro.

En cuanto a las condiciones de almacenamiento y el espacio necesario en la planta para tal fin son aplicables las recomendaciones que se han dado en el apartado 5.2.2 para el stock de caucho a emplear en los betunes modificados in situ.

5.3.2 Procedimientos para incorporar el caucho en el mezclador de la central

La incorporación de caucho en el mezclador, por ejemplo envasado en bolsas de polietileno ligero que se empleó inicialmente en esta técnica, debe descartarse ya que se presta a equivocaciones e imprecisiones.

Por lo tanto deben emplearse dosificadores ponderales, que habitualmente están compuestos por una tolva para contener el caucho y un dispensador gobernado por un sistema de pesaje automático, que introducirá en el mezclador de la central la cantidad precisa de caucho que corresponde, según la fórmula de trabajo, al peso de la amasada que se está fabricando. Debe exigirse a estos dispositivos una precisión del 0,1% sobre el peso total de la amasada que se fabrica.

Estos dosificadores deben estar sincronizados con el ciclo de fabricación de la planta, puesto que el orden adecuado de entrada de los componentes en el mezclador es (Figura 5): áridos y caucho (+mezclado en blanco), betún (+mezclado) y polvo mineral (+mezclado). De este modo, cuando el betún entre en el mezclador debe encontrar una mezcla homogénea de áridos y caucho.

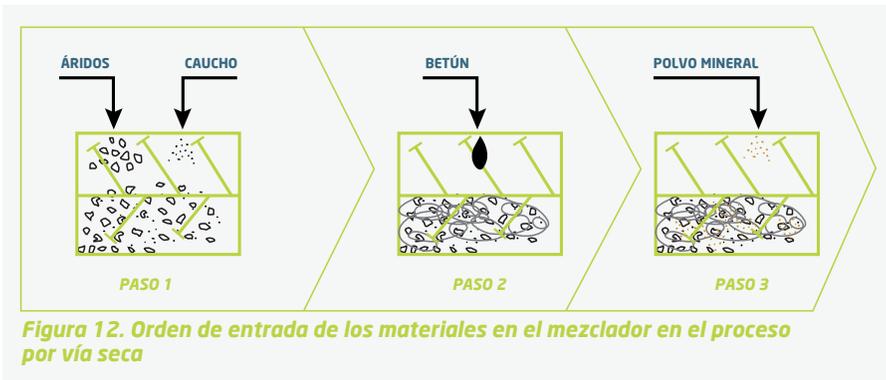


Figura 12. Orden de entrada de los materiales en el mezclador en el proceso por vía seca

5.3.3 Temperaturas de trabajo

La fórmula de trabajo de la mezcla indica las temperaturas que deben observarse durante el proceso. Los dos puntos de chequeo más importantes y las temperaturas que se recomiendan en el caso de mezclas con caucho por vía seca son los siguientes:

	<i>Vía Seca</i>
Temperatura del betún al entrar en el mezclador	165°C
Temperatura máxima y mínima de los áridos	170-180°C
Temperatura de mezclado	170°C

Tabla 12. Temperaturas de trabajo para la vía seca

Es deseable que la mezcla bituminosa con estos tipos de ligantes salga de la central de fabricación a temperaturas de 165-170°C.

5.3.4 Tiempo de amasado

La presencia de las partículas de caucho sí dificulta el proceso de envuelta, lo que para garantizar la correcta cubrición de las partículas minerales y e incluso las de caucho obliga a prolongar ligeramente los tiempo de envuelta, y por consiguiente el ciclo. Aunque depende de la central y de sus características, el ciclo puede incrementarse del orden del 10% respecto al mezclado sin caucho.

5.3.5 Tiempo de digestión cuando se emplea la vía seca

El tiempo de digestión de una mezcla con caucho por vía seca es el tiempo transcurrido desde que se fabrica la mezcla hasta que se extiende sobre el pavimento y su temperatura baja sensiblemente, aproximadamente por debajo de 150°C. Por lo tanto el tiempo de digestión disponible en obra resulta de sumar el tiempo que la mezcla permanece en los silos reguladores de mezcla en caliente (cuando la

central dispone de ellos), el tiempo de transporte de la mezcla hasta el tajo de extendido, el tiempo de espera de los camiones cargados e incluso los minutos que la mezcla permanece en la extendedora hasta que se coloca sobre el pavimento.

Estos periodos, que existen en cada obra, deben ser suficientes para que la interacción betún-caucho progrese hasta crear una interfase afín entre ambos materiales, con intercambios entre ellos que suponen una modificación parcial del ligante que contiene la mezcla bituminosa así como una disminución de tamaño y de las características elásticas de las partículas de caucho.

No obstante, a escala industrial y en condiciones reales, no resultaría económico prolongar el tiempo de digestión más allá del tiempo disponible que resulte de aplicar criterios para la optimización de la productividad. Por ello el proceso es más bien el contrario, a partir del tiempo de digestión que se estime que habrá en la obra, se define el tiempo de digestión que se empleará en los ensayos de laboratorio para la elaboración de la fórmula de trabajo, manteniendo la mezcla en estufa por dicho periodo antes de su compactación. Y cuando se redacte la fórmula de trabajo se hará constar, además del porcentaje y granulometría del caucho, el tiempo de digestión que la mezcla ha tenido en laboratorio, y que deberá ser el mínimo que tenga a escala industrial durante su fabricación y puesta en obra. Aunque no se trata de una regla fija, las mezclas por vía seca que se presentan en esta Guía no deberían disponer en ningún caso de tiempos de digestión menores de 90 minutos.

5.3.6 Producción horaria de la central y costes de operación

La reducción de producción horaria o el incremento de los costes de operación al fabricar mezclas por vía seca provienen de dos factores:

- La duración del ciclo de amasado, que puede ser del orden de un 10% más larga, lo que puede afectar a los costes.

- La necesidad de arbitrar tiempos de digestión adicionales, por ejemplo cuando el tajo de extendido está muy cercano a la central de fabricación. Si ésta última dispone de tolvas reguladoras de mezcla en caliente no habrá reducciones de producción horaria; pero si es necesario que los camiones cargados con mezcla esperen para que la digestión se complete en su caja, los costes se incrementarán.

Cuando se trabaja por vía seca es necesario acomodar el contenido de caucho y su granulometría al tiempo de digestión disponible en obra, para no incrementar los costes de operación con el sólo propósito de disponer de tiempos de digestión adicionales.

5.3.7 Fabricación en centrales continuas y discontinuas

La mayor diferencia entre la fabricación con caucho por vía seca en centrales continuas y discontinuas radica en la forma de incorporar el caucho al mezclador.

- En las centrales discontinuas el caucho se añade de una sola vez en el mezclador y en la cantidad que corresponde al peso de la amasada que se está fabricando.
- En las centrales continuas el caucho se añade en continuo, en un punto del tambor secador mezclador que no está expuesto directamente a la llama, lo que podría deteriorarlo. Es habitual utilizar la misma entrada de que disponen estos tambores para la incorporación de aditivos, material reciclado, etc., ya en el tramo en que los áridos están secos y se van a incorporar el betún.

Esta diferencia obliga a disponer de un sistema dinámico de pesaje del caucho, que deberá tener como en el caso general, una precisión del 0,1% en peso de mezcla.

Asimismo deberá regularse la velocidad de rotación y la configuración del tambor para



que el tiempo de mezclado sea suficiente para lograr la correcta envuelta de las partículas minerales e incluso del caucho.

5.4 Otros aspectos de la operación en central con mezclas bituminosas con caucho

Adicionalmente a lo explicado en este capítulo de la Guía, es conveniente acabar con unas notas relativas a la limpieza de las centrales de fabricación de mezclas cuando se emplea caucho. Particularmente en el caso de la vía húmeda se debe hacer una limpieza de las tuberías por las que ha circulado el betún con caucho. En efecto, con el paso de los días pueden producirse depósitos de partículas de caucho en las pare-



des de los conductos, lo que se evita fácilmente si al final de cada jornada se hace circular betún neto, que removerá los eventuales depósitos que se puedan estar formando. Es una tarea sencilla y puede evitar complicaciones.

En el caso de la vía seca no se precisa, por motivos obvios, esta limpieza.



5.5. Mercado CE de mezclas bituminosas con polvo de caucho

En el ámbito de la Unión Europea el mercado CE es el proceso mediante el cual un fabricante o importador informa a los usuarios y autoridades competentes de que el producto que comercializa cumple con la legislación obligatoria en materia de requisitos esenciales. El procedimiento general es el que se muestra en el siguiente esquema:



Figura 13. Procedimiento general para el mercado CE de productos

La mayor parte de los productos que se comercializan en Europa están sujetos a la obligatoriedad de obtener el marcado CE. Es el caso de los betunes y las mezclas bituminosas.



5.5.1. Mercado CE de mezclas bituminosas

La comercialización de mezclas bituminosas en la Unión Europea está regulada por el Reglamento No 305/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo de 9 de marzo de 2011 por el que se establecen condiciones armonizadas para la comercialización de productos de construcción y se deroga la Directiva 89/106/CEE del Consejo.

El fabricante es el responsable de que sus productos sean conformes a los requisitos esenciales de la directiva. En el caso de las mezclas bituminosas, se aplica la serie de normas UNE-EN 13108, que se dedican a los diferentes tipos de mezclas bituminosas. Por lo que se refiere a las mezclas incluidas en esta Guía las normas de aplicación son la UNE-EN 13108-1 para hormigones bituminosos tipo AC, la UNE-EN 13108-2 para mezclas bituminosas para capas delgadas tipo BBTM A y B, la UNE-EN 13108-5 para mezclas bituminosas tipo SMA y la UNE-EN 13108-7 para mezclas porosas o drenantes. Se completan, por lo que respecta al procedimiento de marcado CE, con las normas UNE-EN 13108-20 para los ensayos iniciales de tipo, y la norma UNE-EN 13108-21 para el control de producción en la central de fabricación. Por último, estos métodos de ensayo son básicamente los recogidos en la serie de normas armonizadas UNE-EN 12697.

El sistema de evaluación que el Reglamento pide para el marcado CE de las mezclas bituminosas es del tipo 2+, que asigna tareas tanto al fabricante como a un organismo notificado, externo al fabricante, y acreditado a tal efecto por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC).

De acuerdo con este esquema, son tareas del fabricante:

- Realizar los ensayos iniciales de tipo (los puede hacer el propio fabricante o encargarlos a un laboratorio externo acreditado).
- Elaborar un protocolo "Control de Producción en Fábrica".
- Ensayar las muestras tomadas periódicamente en la central de fabricación, de acuerdo a un plan establecido.

Las tareas del organismo externo notificado son:

- Inspección inicial de la central de fabricación, para emitir el Certificado de Conformidad CE del Control de Producción en Fábrica.
- Realizar inspecciones anuales para renovar el Certificado anterior.

Una vez puesto en marcha el marcado CE en una central de fabricación de mezclas bitu-

minosas ésta dispondrá de tres documentos que le permiten comercializar sus mezclas bituminosas:

- 1) **Certificado de Conformidad del Mercado CE del Control de Producción en Fábrica.** Habitualmente cada central dispone de un certificado que incorpora en anexo un listado de todos los tipos de mezclas bituminosas que la central fabricará y comercializará.
- 2) **Declaración de Prestaciones (DP), con las propiedades que cumple la mezcla bituminosa.** Se dispone de un documento para cada tipo de mezcla bituminosa que se fabrica y comercializa en la central de fabricación.
- 3) **Marcado CE de la mezcla bituminosa.** Se dispone de un documento por cada mezcla fabricada y comercializada.

5.5.2. Mercado CE de mezclas bituminosas con caucho

Para el marcado CE de las mezclas bituminosas con caucho conviene distinguir entre las mezclas con caucho por vía húmeda y con caucho por vía seca.

- Mercado CE de una mezcla bituminosa con caucho por vía húmeda

Por un lado, el Certificado de Conformidad del Mercado CE del Control de Producción en Fábrica deberá incorporar la nueva mezcla con betún caucho en el listado de mezclas que se fabrican y comercializan en la central, para lo cual habrá de intervenir el organismo notificado.

Además, se precisa una nueva Declaración de Prestaciones, puesto que a pesar de que ya se disponga de una DP de una mezcla similar fabricada en la central, el cambio al nuevo ligante obliga a obtener una nueva DP para la nueva mezcla bituminosa resultante. Piénsese que incluso, en el ámbito de los betunes convencionales, cambiar de un ligante 35/50 a un 50/70 exige obtener una nueva Declaración de Prestaciones.

Por último, en cuanto al Mercado CE de la mezcla, también se precisa un nuevo documento para la nueva mezcla.

El proceso es similar al de cualquier nueva mezcla sin caucho, y se facilita con el marcado CE previo de los ligantes caucho que se vayan a utilizar en la fabricación de las mezclas con caucho por vía húmeda.



- Mercado CE de una mezcla bituminosa con caucho por vía seca

En este caso el mercado CE debe abordarse considerando el polvo de caucho añadido a la mezcla como un aditivo. El procedimiento de marcado CE ya prevé el empleo de aditivos, que deberán contemplarse en la Declaración de Prestaciones para la obtención del marcado.

Además, el procedimiento y dispositivos de incorporación del caucho como aditivo en la central deberán revisarse por parte del organismo notificado, de cara a su inspección para obtener y mantener al día el Certificado de Conformidad del Mercado CE de Control de Producción en Fábrica.

5.5.3. Aceptación del mercado de CE como garantía de calidad en obras

Si bien es cierto que la obtención y mantenimiento del marcado CE en todo tipo de mezclas bituminosas puede suponer un distintivo de calidad, en la práctica de la obras en España es habitual que la Administración aplique simultáneamente los controles de calidad previstos en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del proyecto, habitualmente el PG-3 en las obras del Ministerio de Fomento o el Pliego propio de las diferentes administraciones de carreteras.

Es decir, que el marcado CE se ha convertido en un procedimiento obligatorio, pero en la práctica no ha sustituido al control de calidad habitual. Esta situación es igualmente aplicable a las mezclas bituminosas que incorporan caucho.



Extendido y compactación en el pavimento



Una vez que la mezcla bituminosa con caucho se ha fabricado se transporta al tajo de extendido, se coloca sobre el pavimento y se compacta. Los equipos de obra y los procedimientos en poco difieren de los de mezclas bituminosas convencionales. Sin embargo en este capítulo se presentarán algunas peculiaridades que conviene tener en cuenta para obtener los mejores resultados cuando se trabaja con caucho. Casi todas ellas están relacionadas con las temperaturas de operación que afectan a estas mezclas tanto o más que las mezclas convencionales.

6.1 Transporte de la mezcla bituminosa

La mezcla se transportará al tajo de extendido en camiones de caja lisa. Si en el caso general ha de tratarse su superficie con un producto

antiadherente, en el caso de las mezclas con caucho es más necesario aún. Se puede emplear una solución jabonosa o bien otro producto respaldado por la experiencia, pero sin excesos que den lugar a encharcamientos en el fondo de la caja. En cualquier caso debe evitarse el uso de productos derivados del petróleo, que podrían reblandecer el ligante de la mezcla.

Las mezclas bituminosas con caucho presentan menos tendencia a la segregación granulométrica que las mezclas convencionales, sin caucho; aún así deben observarse durante la carga de los camiones las normas de buena práctica para minimizar este fenómeno: se debe realizar la carga del camión de modo que las partículas más gruesas tengan los menores recorridos para rodar y segregarse. Un esquema de la carga se observa en la Fig. 14.

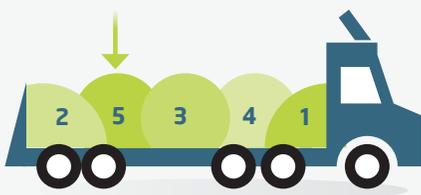
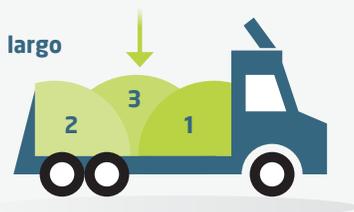


Figura 14. Esquema de carga de los camiones

La temperatura de la mezcla bituminosa al entrar en la caja del camión no debe ser inferior a la indicada en la fórmula de trabajo, que con carácter general puede establecerse en 160 -165 °C para las mezclas con betunes mejorados con caucho o modificados con caucho y polímeros, 165 -170 °C para las mezclas con caucho por vía seca, y unos 170 -175°C para las mezclas fabricadas con betunes caucho de alta viscosidad.

Tipo de mezcla	Temperatura de carga del camión
Mezclas con BC y PMB-C	160 -165 °C
Mezclas con caucho por vía seca	165 -170 °C
Mezclas con BMAVC	170 -175 °C

Tabla 13. Temperatura de carga de los camiones

Para reducir la pérdida de temperatura durante el transporte la caja del camión deberá cubrirse con una lona. Durante la descarga de la mezcla en la extendedora, o en el equipo de transferencia, también deberán respetarse las temperaturas mínimas establecidas en la fórmula de trabajo. Como regla general, durante el transporte la mezcla bituminosa no debería perder en ningún caso más de 10°C.



Figura 15. Protección de la mezcla bituminosa con una lona durante el transporte.

Algunos condicionantes pueden hacer difícil conseguir este objetivo. Los más negativos son las bajas temperaturas ambiente y los tiempos de viaje, que incluyen las prolongadas esperas del camión para descargar la mezcla. Por lo que respecta a las bajas temperaturas, dado que no se aconseja extender mezclas bituminosas con caucho a temperaturas ambiente por debajo de los 10°C, no será frecuente que se transporte mezcla bituminosa en días fríos. Sin embargo, el tiempo de transporte sí podría prolongarse por la distancia y las congestiones de tráfico. Asimismo juegan un papel importante las esperas de los camiones cargados, esperando su turno para descargar en la extendedora o en el silo móvil de transferencia. Si bien las congestiones de tráfico son externas a la obra, y poco puede hacerse más que elegir el mejor itinerario, las esperas de los camiones cargados sí depen-

den de la organización de la obra, por lo que debe buscarse un equilibrio entre evitar que la extendedora se quede sin mezcla bituminosa y que los camiones formen cola en el tajo de extendido. Hoy en día, con el uso de la telefonía móvil, no resulta difícil coordinar la producción en la central de fabricación con la operación de extendido, y reducir así los tiempos de espera de los camiones cargados con la mezcla en caliente.

6.2 Preparación de la superficie

Antes de extender la nueva capa debe procederse al saneamiento del pavimento existente si se tratase de un proyecto de rehabilitación. Deben repararse baches, fresarse las zonas en mal estado y todas las operaciones habituales en este tipo de actuaciones. Por último debe dejarse la superficie preparada con un riego de adherencia.

En cuanto al tipo de emulsión bituminosa y dotación a colocar, son aplicables los criterios generales, si bien cuando se utilicen mezclas con betunes modificados con caucho y polímeros y con betunes de alta viscosidad con caucho, se recomiendan las emulsiones de betunes modificados con polímeros. Asimismo pueden emplearse emulsiones termoadherentes.

6.3 Descarga y extendido de la mezcla bituminosa

Con carácter general, la operación de extendido no debe comenzarse cuando la temperatura ambiente sea inferior de 10°C y no se espera una pronta evolución de las condiciones. Tampoco debe extenderse la mezcla en condiciones de lluvia, incluso débil. Si estos condicionantes se cumplen se puede comenzar la operación de extendido.

La descarga del camión se hace directamente a la tolva de la extendedora. Siempre que sea posible se puede interponer entre ambos un silo móvil de transferencia, que homogeniza la mezcla bituminosa tanto desde el punto de vista granulométrico como térmico, y regula la

demanda evitando en algunos casos detenciones de la extendedora. Deben evitarse los arranques y paradas innecesarios de la extendedora, por su efecto negativo en la regularidad superficial de la mezcla bituminosa.

Las temperaturas en la descarga deben ser al menos 155°C para las mezclas con betunes mejorados con caucho y betunes modificados con caucho y polímeros, y 160°C para las mezclas con caucho por vía seca y para las mezclas con betunes modificados de alta viscosidad.

La extendedora debe estar dotada con un tamper calefactado que asegure una precompactación de la capa colocada, así como un elemento calefactor para la ejecución de la junta longitudinal.



Figura 16. Extensión de una capa de mezcla bituminosa

Los trabajos complementarios realizados manualmente en las juntas deben reducirse al mínimo, en particular con mezclas discontinuas, porosas y SMA, ya que resultan más difíciles que en mezclas sin caucho. Deberá extremarse el ajuste de la regla a la pasada adyacente para reducir al mínimo el material sobrante. Cuando los repasos manuales sean imprescindibles se realizarán con agilidad, antes de que la mezcla se haya enfriado sensiblemente.

Las juntas transversales deben reducirse al mínimo imprescindible. Siempre deben cortarse verticalmente, calentarse (si son en frío) e impregnarse con emulsión adherente. Las juntas longitudinales casi siempre son en frío. Por

ello han de cortarse verticalmente, impregnarse con emulsión adherente y calentarse. A tal efecto la extendedora estará provista de elementos calefactores de la junta.

6.4 Compactación de la capa

Tan pronto como sea posible deberá comenzar la compactación. Las temperaturas para comienzo de la compactación no deben ser menores de 150°C en las mezclas con betunes mejorados o modificados con caucho y polímeros y no menores de 155°C cuando se emplean betunes de alta viscosidad o la vía seca. Según el tipo de mezcla bituminosa los compactadores más adecuados son los siguientes:

- Mezclas tipo AC: Rodillo liso vibratorio + Rodillo de neumáticos.
- Mezclas tipo BBTM, PA y SMA: Rodillo liso, sin vibración.

Los mejores resultados en mezclas tipo AC se obtienen con el rodillo liso vibratorio, acabando con unas pasadas de rodillo de neumáticos. En éste último se debe extremar el cuidado para evitar que se peguen partículas en los neumáticos, incluyendo una solución jabonosa y un faldón que contribuya a mantener la temperatura de los neumáticos. Si aún así se observase material adherido a los neumáticos, que desluce la superficie de acabado, se deberá descartar el uso del rodillo de neumáticos.

En las mezclas tipo BBTM, PA y SMA se recomienda la utilización del rodillo liso. Dado que se trata de capas delgadas debe evitarse emplear la vibración, que podría partir las partículas minerales más gruesas.

En cualquier caso, al comienzo de la obra es conveniente realizar un tramo de ensayo en el que se determinará el tipo de rodillo o rodillos más adecuados, así como el número de pasadas de cada uno. Además se comprobarán las temperaturas de inicio y final de compactación recomendadas en la fórmula de trabajo, por si fuera conveniente retocarlas.



Figura 17. Compactación con rodillo liso

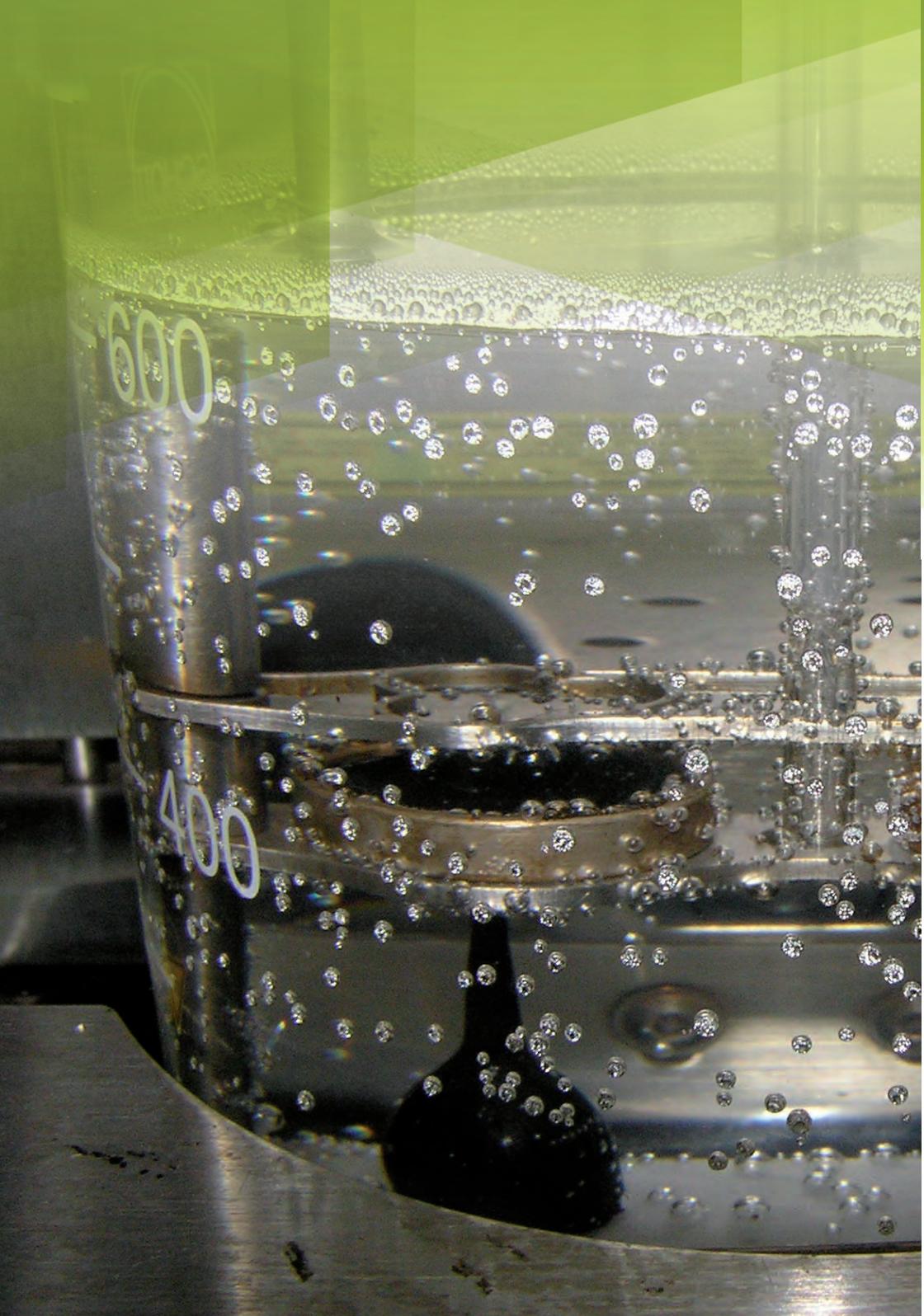
El criterio debe ser alcanzar la densidad que se exige en obra.

Sin embargo, en el caso de las mezclas con caucho por vía seca existe la posibilidad de que estas partículas elásticas intenten recuperar su forma aún después de que la capa haya alcanzado la densidad exigida. El final de la compactación no vendrá dada por la densidad exigida, sino que continuará hasta que se haya alcanzado la temperatura de final de compactación que en mezcla por vía seca puede ser de 120°C.

sólo después de que la capa haya alcanzado los 60°C. En tiempo caluroso, y cuando sea urgente abrir al tráfico, se puede regar la capa con agua, para que disminuya la temperatura de una forma más rápida.

6.5 Apertura al tráfico

En algunos casos se ha observado que al abrirse al tráfico algunas partículas se pegan a los neumáticos de los primeros vehículos que circulan. Esto se evita abriendo al tráfico



Control de calidad

7

El control de calidad en el ámbito de la construcción está formado por una serie de procedimientos que permiten confirmar que los materiales, los procesos y el producto final cumplen unos requisitos mínimos establecidos en la normativa aplicable.

En la última década en Europa se ha venido implantando en el sector de la construcción de carreteras un control de calidad apoyado en el marcado CE (o de Conformidad Europea). Este distintivo informa de que el material que se comercializa cumple con los requisitos esenciales establecidos en las Directivas Europeas que le son de aplicación.

Tanto los ligantes como las mezclas bituminosas pueden disponer de este distintivo. Cada fabricante será el encargado de conseguirlo para lo cual ha de seguir un procedimiento establecido en el Reglamento Europeo 305/2011.

Cuando un material –un ligante o una mezcla bituminosa– posee el marcado CE, su recepción en obra puede limitarse a la verificación documental por parte del Constructor de los valores declarados en los documentos que lo acompañan. Por la importancia que ha adquirido el Marcado CE en el ámbito de los materiales bituminosos, se dedica el apartado 5.5

de esta Guía a indicar los procedimientos para obtenerlo y mantenerlo, en particular cuando se trata de ligantes y mezclas bituminosas con caucho de neumáticos.

No obstante, y a pesar de que se disponga de marcado CE, es práctica frecuente aplicada por las administraciones públicas realizar una serie de ensayos de control de calidad a la recepción de los materiales, durante la fabricación de la mezcla bituminosa y una vez que la capa está colocada en el pavimento, y precisamente a éstos nos referiremos en el presente capítulo.

Por otro lado, si no se dispusiera de marcado CE, los procedimientos y ensayos que se comentan a continuación son imprescindibles. Como se verá, son prácticamente los mismos que para materiales bituminosos sin caucho, lo que pone de manifiesto una vez más la normalidad a la que están llamados los materiales bituminosos con caucho de neumáticos.

7. 1 Control de calidad del caucho

De forma general, los ensayos de control de calidad que se realizan sobre el polvo de caucho son el análisis granulométrico, la humedad, el ensayo del contenido de textil, el ensayo de acero y el ensayo del contenido de otras impurezas.

- Toma de muestras:

La norma UNE-CEN/TS 14243:2012:EX incluye un apartado en el que se indica que para obtener una muestra representativa el muestreo preferiblemente debe hacerse cuando el material esté en movimiento (por ejemplo, en una cinta transportadora...). No obstante, la realidad en este caso es que el material se suministra en bigbag y por tanto se encuentra estacionario. A este respecto, es necesario indicar que en la fecha de publicación de este documento, a nivel europeo y dentro del Comité Técnico de normalización TC366 se está elaborando una norma que describe el procedimiento para tomar una muestra representativa de granulado o polvo de neumático cuando se encuentra almacenado en un bigbag, que consiste principalmente en coger pequeñas cantidades de material a distintas alturas del bigbag, constituyendo el total la muestra representativa para analizarla en el laboratorio.

- Contenido de humedad:

El análisis se realizará de acuerdo a la Norma UNE 103-300-3 (excepto en lo relativo a la temperatura de calentamiento de la estufa que será de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ y la masa mínima de la muestra será de 100 g). En esta norma se describe el ensayo para determinar la humedad de un suelo mediante secado en estufa.

- Granulometría y contenido de impurezas (textil, acero y otras impurezas):

Los métodos de ensayo para determinar la distribución granulométrica y los contenidos de impurezas del polvo de neumático se describen en la norma europea UNE-CEN/TS 14243:2012 de carácter experimental, titulada: "Materiales producidos a partir de neumáticos fuera de uso. Métodos para determinar sus dimensiones e impurezas". Una descripción de estos métodos de ensayo se incluyen en la "Guía para la Fabricación de Betunes con polvo de neumático" publicada por Signus en 2014. No obstante, cabe mencionar, que en



la fecha de publicación de esta Guía se están finalizando los trabajos de validación de esta norma y se prevén algunos cambios en algunos parámetros de estos métodos de ensayos.

7.2 Control de calidad de los betunes con caucho

Dado que existen varios tipos de ligantes con caucho, y que pueden estar fabricados en terminal de betunes o in situ mediante una unidad de fabricación colocada en la central de fabricación de mezclas, los controles de calidad difieren en uno u otro caso.

En cuanto a la definición de lotes y frecuencias de muestreo, son perfectamente válidos los establecidos en los artículos 211 y 212 del PG-3 para ligantes sin caucho.

7.2.1 Control de calidad de betunes de penetración (fabricación in situ y vía seca)

Al inicio de la obra y al menos una vez mensualmente se realizará un estudio completo



para comprobar el cumplimiento de todas las características establecidas en el Art. 211 del PG-3.

Una vez iniciada la obra, de cada cisterna que llegue a la central de fabricación se comprobará rutinariamente la penetración (UNE-EN 1426).

Durante la fabricación se tomarán muestras de la tubería desde los tanques de almacenamiento a la unidad de fabricación, o a la báscula de betún de la central en el caso de vía seca, con una frecuencia semanal. Se realizarán los ensayos de penetración (UNE-EN 1426) y la temperatura de reblandecimiento (UNE-EN 1427) y se calculará el índice de penetración (Anexo A de la UNE-EN 12591).

7.2.2 Control de betunes mejorados con caucho y betunes modificados con caucho y polímeros producidos en terminal de betunes modificados

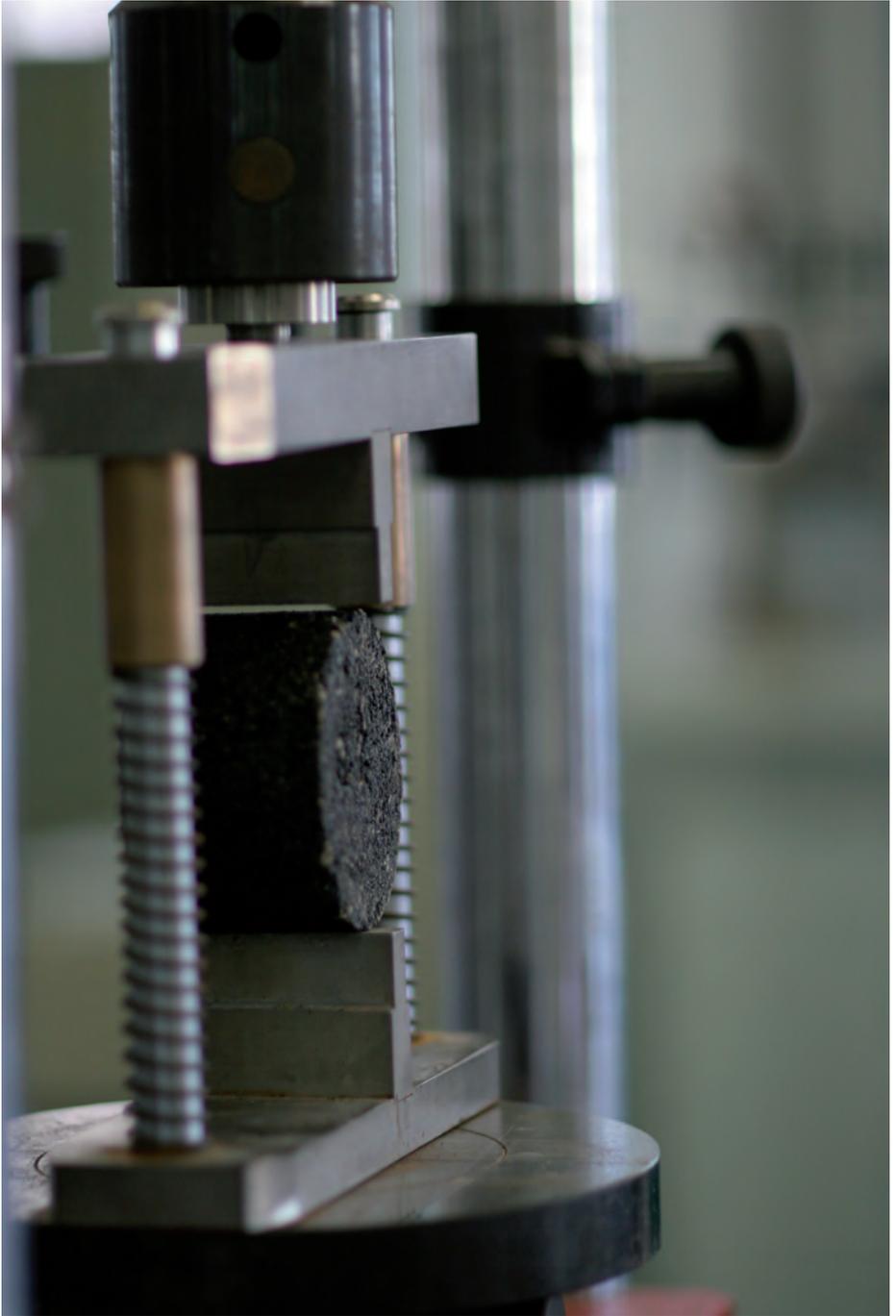
Al inicio de la obra y al menos una vez al mes, se realizará un estudio completo para com-

probar que el ligante cumple las especificaciones de la OC 21/2007 para betunes mejorados con caucho o del Art. 212 del PG-3 en el caso de betunes modificados con caucho y polímeros.

Una vez comenzada la obra, al llegar a la central cada cisterna de betún, se comprobará rutinariamente su penetración (UNE-EN 1426), su temperatura de reblandecimiento (UNE-EN 1427) y su recuperación elástica (UNE-EN 13398).

Durante la obra y con frecuencia semanal se comprobará, a partir de muestras tomadas en la tubería de los tanques de almacenamiento a la báscula de central, la penetración (UNE-EN 1426) y el punto de reblandecimiento (UNE-EN 1427).

En periodos de almacenamiento de más de 3 días se comprobará la variación de penetración (UNE-EN 1426) y de temperatura de reblandecimiento (UNE-EN 1427) entre muestras tomadas de la parte superior y de la parte inferior del tanque de almacenamiento.



7.2.3 Control de betunes mejorados con caucho y betunes modificados con caucho y polímeros cuando se fabrican in situ

Al inicio de la obra se realizará un estudio completo, para comprobar que el betún fabricado in situ cumple los requisitos establecidos en la OC 21/2007 para betunes mejorados con caucho y en el Art. 212 del PG-3 para betunes modificados con caucho y polímeros.

Una vez comenzada la obra se tomarán muestras de la salida del equipo, al menos dos veces diarias, y se comprobarán las propiedades de penetración (UNE 1426) y temperatura de reblandecimiento (UNE 1427). Diariamente se comprobará su recuperación elástica (UNE-EN 13398).

Si el ligante fabricado in situ se almacena en periodos de más de 3 días se comprobará la variación de penetración (UNE-EN 1426) y de temperatura de reblandecimiento (UNE-EN 1427) entre muestras tomadas de la parte superior y de la parte inferior del tanque de almacenamiento.

7.2.4 Control de betunes modificados de alta viscosidad con caucho fabricados in situ.

Al inicio de la obra se realizará un estudio completo, para comprobar que el betún fabricado in situ cumple los requisitos establecidos en la OC 21/2007 para betunes modificados de alta viscosidad con caucho fabricados in situ.

Durante la obra se tomarán muestras del material, a la salida del tanque digestor, con periodicidad horaria. El objetivo de estas muestras es detectar en tiempo real alguna anomalía importante en el proceso, que se ve reflejada en la viscosidad del material (UNE-EN 13302). Las muestras para este ensayo se toman en recipientes metálicos de 5 kg de capacidad, lo que permite realizar el ensayo in situ con viscosímetro manual, y suficiente estabilidad térmica.

Además, durante la obra se tomarán muestras de la salida del equipo, al menos dos veces

diarias, y se comprobarán las propiedades de penetración (UNE 1426) y temperatura de reblandecimiento (UNE 1427).

7.3 Control de calidad durante la fabricación de las mezclas bituminosas

El control de calidad ha de recoger en primer lugar el de los ligantes, que se ha visto en los apartados precedentes, y el de los áridos, que es en todo similar al de mezclas convencionales y está recogido en los Art. 542 del PG-3 para mezclas tipo AC, en el Art. 543 para mezclas de los tipos BBTM A, BBTM B y PA, y en el Borrador del Pliego para Mezclas Bituminosas en Caliente tipo SMA, redactado por el CEDEX para las mezclas tipo SMA.

Y debe completarse con el de la fabricación y puesta en obra de las propias mezclas bituminosas, que se presenta en sus aspectos principales a continuación.

7.3.1 Mezclas bituminosas del tipo AC

Al menos una vez semanalmente se comprobará el correcto funcionamiento y la precisión de la báscula y de los termómetros de la instalación.

En cuanto al control de la propia mezcla bituminosa, a la salida del mezclador se comprobará su aspecto y temperatura. Además se tomarán muestras con una frecuencia que será función del nivel de control que se haya adoptado (se recomienda X para rodadura e intermedia con tráfico desde T00 hasta T2, e Y para el resto de casos) y del nivel de conformidad que se esté obteniendo, de acuerdo con la norma UNE-EN 13108-21. En estas muestras de mezcla bituminosa se obtendrá el contenido de ligante (UNE-EN 12697-1) y la granulometría de los áridos extraídos (UNE-EN 12697-2).

Además, al menos una vez a la semana se comprobará la sensibilidad a la acción del agua mediante el ensayo de resistencia conservada a tracción indirecta (UNE-EN 12697-12). Y al menos una vez al mes se verificará la resisten-

cia a las deformaciones plásticas mediante el ensayo de rodadura (UNE-EN 12697-22).

En cuanto a la extensión y compactación, el lote a controlar se define como el menor que resulte de aplicar los siguientes criterios: 500 m de calzada, 3.500 m² de calzada o la fracción construida diariamente.

Por cada lote se toma una muestra a la salida de la planta o en la tolva de la extendidora, y se fabrican en laboratorio 3 probetas, con 75 golpes por cara. A estas probetas se les determina la densidad aparente (UNE-EN 12697-6) y el contenido de huecos (UNE-EN 12697-8).

Del lote ejecutado se extraen al menos 3 testigos de la capa correspondiente, en los que se comprobará el espesor de la capa compactada, y se obtendrán asimismo la densidad aparente y el contenido de huecos en mezcla, que debe compararse con los obtenidos en las probetas de laboratorio para el mismo lote. También se realizará sobre estos testigos el ensayo de adherencia entre capas (NLT-382).

Por último, en la capa extendida debe comprobarse el índice de regularidad internacional, IRI, mediante la norma NLT-330. Cuando se trata de capas de rodadura ha de verificarse además la macrotextura superficial (UNE-EN 13036-1) en tres puntos aleatoriamente ele-

gidos, y la resistencia al deslizamiento en toda la longitud de la obra (UNE 41201 IN).

En cuanto a los valores a cumplir se adoptarán los mismos que aparecen en el Art. 542 del PG-3 para mezclas bituminosas que no contienen caucho.

7.3.2 Mezclas bituminosas de los tipos BBTM A, BBTM B, PA, SMA y mezcla antifisuras

Al menos una vez semanalmente se comprobará el correcto funcionamiento y la precisión de la báscula y de los termómetros de la instalación.

Al menos una vez diaria se realizará un granulométrico de los áridos en caliente (UNE-EN 933-1).

En cuanto al control de la propia mezcla bituminosa, a la salida del mezclador se comprobará su aspecto y temperatura. Además se tomarán muestras con una frecuencia que será función del nivel de control que se haya adoptado (se recomienda X para tráficos T00 a T2 e Y para el resto de casos) y del nivel de conformidad que se esté obteniendo, de acuerdo con la norma UNE-EN 13108-21. En estas muestras de mezcla bituminosa se obtendrá el contenido de ligante (UNE-EN 12697-1) y





la granulometría de los áridos extraídos (UNE-EN 12697-2).

Además, al menos una vez a la semana se comprobará la sensibilidad a la acción del agua mediante el ensayo de resistencia conservada a tracción indirecta (UNE-EN 12697-12) en mezclas BBTM A, BBTM B, PA y SMA.

Y al menos una vez al mes, en mezcla BBTM A, BBTM B y SMA se verificará la resistencia a las deformaciones plásticas mediante el ensayo de rodadura (UNE-EN 12697-22).

En mezclas tipo PA, una vez a la semana se comprobará la pérdida de partículas (UNE-EN 12697-17) y una vez al mes el escurrimiento de ligante (UNE-EN 12697-18).

En cuanto a la extensión y compactación el lote a controlar se define como el menor que resulte de aplicar los siguientes criterios: 500 m de calzada, 3.500 m² de calzada o la fracción construida diariamente.

Por cada lote se toma una muestra a la salida de la planta o en la tolva de la extendedora, y se fabrican en laboratorio 3 probetas, con 50 golpes por cara con el compactador Marshall (UNE-EN 12697-30) para las mezclas BBTM A, BBTM B, PA, SMA y la mezcla antifisuras. A

estas probetas se les determina la densidad aparente (UNE-EN 12697-6) y el contenido de huecos (UNE-EN 12697-8).

Paralelamente se extraen al menos 3 testigos de la capa recién extendida, en los que se comprobará el espesor de la capa compactada, y se obtendrán asimismo la densidad aparente y el contenido de huecos en mezcla, que debe compararse con los obtenidos en las probetas de laboratorio para el mismo lote. En mezclas tipo BBTM A y SMA se utiliza como referencia el la densidad aparente y en mezclas tipo BBTM B y PA la referencia es el contenido de huecos en mezcla. También se realizará sobre estos testigos el ensayo de adherencia entre capas (NLT-382).

Por último, en la capa extendida debe comprobarse el índice de regularidad internacional, IRI, mediante la norma NLT-330. Ha de verificarse además la macrotextura superficial (UNE-EN 13036-1) en tres puntos aleatoriamente elegidos, y la resistencia al deslizamiento en toda la longitud de la obra (UNE 41201 IN).

En cuanto a los valores a cumplir se adoptarán los mismos que aparecen en el Art. 543 del PG-3 para mezclas bituminosas que no contienen caucho.



Mezclas tipo con polvo de caucho

ANEXO

A continuación se presentan unas fichas de formulaciones de mezclas bituminosas con caucho, comparadas con mezclas del mismo tipo sin caucho. Se trata de ejemplos reales que pueden ayudar a comprender la influencia del caucho a través de ligantes con caucho o incorporado por vía seca.

Las fichas muestran la granulometría utilizada, el tipo de áridos y ligante, las temperaturas de fabricación y compactación, la energía de compactación y las propiedades más importantes de las mezclas estudiadas.

En cualquier caso, como se ha explicado en los capítulos 4 y 5, referidos al diseño y la fabricación de mezclas en laboratorio y en central, para cada proyecto debe estudiarse la fórmula de trabajo con los áridos y ligantes que se vayan a emplear en obra. Es más, lo idóneo es que la fórmula con caucho haya sido objeto de marcado CE, de modo que la planta la produzca rutinariamente para las sucesivas obras en que se aplique.

MEZCLA BBTM 11A

Árido grueso: Pórfido; Árido fino: Calizo; Polvo mineral: Carbonato cálcico

Tamiz (mm) UNE-EN 933-2	16	11,2	8	4	2	0,5	0,063
Pasa (%)	100	99,3	65	31,1	30	16,1	8,2

Contenido de ligante	Norma	BBTM 11A	BBTM 11A vía húmeda	BBTM 11A vía seca	PG3 Artículo 543
Contenido de ligante (%)		5,5	5,5		>5,2%
Tipo de ligante		PMB 45/80-60	PMB 45/80-60 C	50/70 y 1% polvo de caucho por vía seca	---
Relación polvo mineral/betún		1,5	1,5		$\geq 1,2$ y $\leq 1,6$
Tª fabricación/compactación (°C)	---	165/155	165/155	170/155	---
Compactación (golpes/cara)	UNE-EN 12697-30	50	50	50	50
Densidad máxima (g/cm³)	UNE-EN 12697-5	2,496	2,494	2,480	---
Densidad aparente (g/cm³)	UNE-EN 12697-6	2,39	2,374	2,371	---
Huecos en mezcla (%)	UNE-EN 12697-8	4,25	4,81	4,40	≥ 4

Resultados de tracción indirecta y sensibilidad al agua

Resistencia a tracción indirecta, probetas secas, ITS (MPa)	UNE-EN 12697-22	1,864	1,578	1,559	---
Resistencia a tracción indirecta, probetas húmedas, ITS (MPa)	UNE-EN 12697-22	1,752	1,562	1,434	---
Resistencia conservada a tracción indirecta, ITSr (%)	UNE-EN 12697-12	94	99	92	≥ 90

Resistencia a la deformación plástica

Densidad (g/cm³)	UNE-EN 12697-22	2,365	2,350	2,347	---
Temperatura (°C)		60	60	60	---
Espesor de probeta (mm)		40	40	40	---
WTSaire (mm/10³ ciclos)		0,025	0,030	0,025	$\leq 0,07$
PRDaire (%)		4,76	4,78	5,51	---

MEZCLA BBTM 11B

Árido grueso: Pórfido; Árido fino: Calizo; Polvo mineral: Carbonato cálcico

Tamiz (mm) UNE-EN 933-2	16	11,2	8	4	2	0,5	0,063
Pasa (%)	100	99,4	69	26,3	25	15,1	5,5

Contenido de ligante	Norma	BBTM 11B	BBTM 11B vía húmeda	PG3 Artículo 543
Contenido de ligante (%)		5	5	>4,75
Tipo de ligante		PMB 45/80-65	PMB 45/80-65C	---
Relación polvo mineral/betún		1,1	1,1	$\geq 1,0$ y $\leq 1,2$
Tª fabricación/compactación (°C)	---	165/155	165/155	---
Compactación (golpes/cara)	UNE-EN 12697-30	50	50	50
Densidad máxima (g/cm³)	UNE-EN 12697-5	2,516	2,510	---
Densidad aparente (g/cm³)	UNE-EN 12697-6	2,107	2,098	---
Huecos en mezcla (%)	UNE-EN 12697-8	16,25	16,55	≥ 12 y ≤ 18

Resultados de tracción indirecta y sensibilidad al agua

Resistencia a tracción indirecta, probetas secas, ITS (MPa)	UNE-EN 12697-22	1,497	1,092	---
Resistencia a tracción indirecta, probetas húmedas, ITS (MPa)	UNE-EN 12697-22	1,353	981	---
Resistencia conservada a tracción indirecta, ITSr (%)	UNE-EN 12697-12	90,4	90	≥ 90

Resistencia a la deformación plástica

Densidad (g/cm³)	UNE-EN 12697-22	2,09	2,08	---
Temperatura (°C)		60	60	---
Espesor de probeta (mm)		40	40	---
WTSaire (mm/10³ ciclos)		0,061	0,066	$\leq 0,07$
PRDaire (%)		7,139	5,43	---

MEZCLA POROSA PA11

Árido grueso: Pórfido; Árido fino: Calizo; Polvo mineral: Carbonato cálcico

Tamiz (mm) UNE-EN 933-2	16	11,2	8	4	2	0,5	0,063
Pasa (%)	100	99,2	59	20,2	12,1	7,6	4,6

Contenido de ligante	Norma	PA11	PA 11 vía húmeda	PG3 Artículo 543
Contenido de ligante (%)		4,5	4,5	>4,3%
Tipo de ligante		PMB 45/80-65	PMB 45/80-65 C	---
Relación polvo mineral/betún		1,02	1,02	$\geq 0,9$ y $\leq 1,1$
Tª fabricación/compactación (°C)	---	165/155	165/155	---
Compactación (golpes/cara)	UNE-EN 12697-30	50	50	50
Densidad máxima (g/cm³)	UNE-EN 12697-5	2,541	2,514	---
Densidad aparente (g/cm³)	UNE-EN 12697-6	1,925	1,928	---
Huecos en mezcla (%)	UNE-EN 12697-8	24,2	23,3	≥ 20

Resultados de tracción indirecta y sensibilidad al agua

Resistencia a tracción indirecta, probetas secas, ITS (MPa)	UNE-EN 12697-22	1,050	0,935	---
Resistencia a tracción indirecta, probetas húmedas, ITS (MPa)	UNE-EN 12697-22	0,968	0,792	---
Resistencia conservada a tracción indirecta, ITSr (%)	UNE-EN 12697-12	92,2	84,7	≥ 85
Pérdida de partículas en mezclas drenantes (%)	UNE-EN 12697-17	16,4	19,6	> 20
Escurrimiento de ligante	UNE-EN 12697-18	nulo	nulo	nulo

MEZCLA SMA 11

Árido grueso: Pórfido; Árido fino: Calizo; Polvo mineral: Carbonato cálcico

Tamiz (mm) UNE-EN 933-2	16	11,2	8	4	2	0,5	0,063
Pasa (%)	100	100	67	27	25	16,2	8,4

Contenido de ligante	Norma	SMA 11	SMA 11 vía húmeda	SMA 11 vía seca	PPT-SMA
Contenido de ligante (%)		6,2	6,2	6,2	>5,8%
Tipo de ligante		PMB 45/80-65 y 0,5% fibra	PMB 45/80-65 C	50/70 y 1,25% polvo de caucho por vía seca	---
Relación polvo mineral/betún		1,36	1,36	1,36	≥ 1,2 y ≤ 1,6
Tª fabricación/compactación (°C)	---	165/155	165/155	170/155	---
Compactación (golpes/cara)	UNE-EN 12697-30	50	50	50	50
Densidad máxima (g/cm³)	UNE-EN 12697-5	2,463	2,474	2,455	---
Densidad aparente (g/cm³)	UNE-EN 12697-6	2,328	2,356	2,337	---
Huecos en mezcla (%)	UNE-EN 12697-8	4,5	4,8	4,8	≥ 4 y ≤ 6

Resultados de tracción indirecta y sensibilidad al agua

Resistencia a tracción indirecta, probetas secas, ITS (MPa)	UNE-EN 12697-22	1,699	1,478	1,479	---
Resistencia a tracción indirecta, probetas húmedas, ITS (MPa)	UNE-EN 12697-22	1,630	1,433	1,433	---
Resistencia conservada a tracción indirecta, ITS (%)	UNE-EN 12697-12	96	97	97	≥ 90

Resistencia a la deformación plástica

Densidad (g/cm³)	UNE-EN 12697-22	2,301	2,343	2,320	---
Temperatura (°C)		60	60	60	---
Espesor de probeta (mm)		40	40	40	---
WTSaire (mm/10 ³ ciclos)		0,056	0,038	0,061	≤ 0,07
PRDaire (%)		5,2	4,5	5,2	---

MEZCLA ANTIFISURAS (BMAVC-1)

Árido grueso: Pórfido; Árido fino: Silíceo; Polvo mineral: Carbonato cálcico

Tamiz (mm) UNE-EN 933-2	16	11,2	8	4	2	0,5	0,063
Pasa (%)	100	99,4	69	26,3	25	15,1	5,5

Contenido de ligante	Norma	ANTIFISURAS
Contenido de ligante (%)		9,0
Tipo de ligante		BMAVC-1
Relación polvo mineral/betún		0,33
Tª fabricación/compactación (°C)		175/160
Compactación (golpes/cara)	UNE-EN 12697-30	50
Densidad máxima (g/cm ³)	UNE-EN 12697-5	2,387
Densidad aparente (g/cm ³)	UNE-EN 12697-6	2,283
Huecos en mezcla (%)	UNE-EN 12697-8	4,4
Resultados de tracción indirecta y sensibilidad al agua		
Resistencia a tracción indirecta, probetas secas, ITS (MPa)	UNE-EN 12697-22	1,412
Resistencia a tracción indirecta, probetas húmedas, ITS (MPa)	UNE-EN 12697-22	1,394
Resistencia conservada a tracción indirecta, ITSR (%)	UNE-EN 12697-12	92,4
Resistencia a la deformación plástica		
Densidad (g/cm ³)	UNE-EN 12697-22	2,261
Temperatura (°C)		60
Espesor de probeta (mm)		60
WTSaire (mm/103 ciclos)		0,064
PRDaire (%)		5,77

MEZCLA AC16 S

Árido grueso: Pórfido; Árido fino: Calizo; Polvo mineral: Carbonato cálcico

Tamiz (mm) UNE-EN 933-2	22	16	8	4	2	0,5	0,063
Pasa (%)	100	100	71,0	36,2	25,2	13,3	9,3

Contenido de ligante	Norma	AC16 S	AC16 S vía húmeda	PG3 Artículo 542
Contenido de ligante (%)		5	5	>4,5
Tipo de ligante		50/70	BC 50/70	---
Relación polvo mineral/betún		1,1	1,1	1,1
Tª fabricación/compactación (°C)	---	160/150	165/155	---
Compactación (golpes/cara)	UNE-EN 12697-30	75	75	75
Densidad máxima (g/cm³)	UNE-EN 12697-5	2,499	2,478	---
Densidad aparente (g/cm³)	UNE-EN 12697-6	2,387	2,367	---
Huecos en mezcla (%)	UNE-EN 12697-8	4,5	4,5	≥ 4 y ≤ 6

Resultados de tracción indirecta y sensibilidad al agua

Resistencia a tracción indirecta, probetas secas, ITS (MPa)	UNE-EN 12697-22	2,263	2,024	---
Resistencia a tracción indirecta, probetas húmedas, ITS (MPa)	UNE-EN 12697-22	2,146	1,951	---
Resistencia conservada a tracción indirecta, ITSr (%)	UNE-EN 12697-12	95	96	≥ 90

Densidad (g/cm³)	UNE-EN 12697-22	2,370	2,346	---
Temperatura (°C)		60	60	---
Espesor de probeta (mm)		40	40	---
WTSaire (mm/10³ ciclos)		0,097	0,054	≤ 0,07
PRDaire (%)		5,7	3,5	---

MEZCLA AC22 S

Árido grueso: Silíceo; Árido fino: Calizo; Polvo mineral: Carbonato cálcico

Tamiz (mm) UNE-EN 933-2	32	22	16	8	4	2	0,5	0,063
Pasa (%)	100	95	78	56	27,6	13,9	10	5,1

Contenido de ligante	Norma	AC22 S	AC22 S vía húmeda	AC22 S vía seca	PG-3 Artículo 542
Contenido de ligante (%)		4,5	4,5	4,5	≥ 4
Tipo de ligante		50/70	BC 50/70	B70/100 + 1% polvo de caucho	---
Relación polvo mineral/betún		1,13	1,13	1,13	1,1
Tª fabricación/compactación (°C)	---	160/150	165/155	170/155	---
Compactación (golpes/cara)	UNE-EN 12697-30	75	75	75	75
Densidad máxima (g/cm³)	UNE-EN 12697-5	2,467	2,478	2,464	---
Densidad aparente (g/cm³)	UNE-EN 12697-6	2,346	2,345	2,328	---
Huecos en mezcla (%)	UNE-EN 12697-8	4,90	5,37	5,5	≥ 4 y ≤ 6

Resultados de tracción indirecta y sensibilidad al agua

Resistencia a tracción indirecta, probetas secas, ITS (MPa)	UNE-EN 12697-22	2,764	2,187	2,220	---
Resistencia a tracción indirecta, probetas húmedas, ITS (MPa)	UNE-EN 12697-22	2,428	2,092	1,903	---
Resistencia conservada a tracción indirecta, ITSr (%)	UNE-EN 12697-12	88	96	96	≥ 80

Resistencia a la deformación plástica

Densidad (g/cm³)	UNE-EN 12697-22	2,331	2,346	2,311	---
Temperatura (°C)		60	60	60	---
Espesor de probeta (mm)		60	30	60	---
WTSaire (mm/10³ ciclos)		0,066	0,056	0,059	≤ 0,07
PRDaire (%)		6,8	4,1	3,6	---

MEZCLA AC32 G

Árido grueso: Calizo; Árido fino: Calizo; Polvo mineral: Carbonato cálcico

Tamiz (mm) UNE-EN 933-2	45	32	16	8	2	0,5	0,25	0,063
Pasa (%)	100	99,7	69	47	25	12,1	8,1	4,2

Contenido de ligante	Norma	AC32 G	AC32 G vía húmeda	PG-3 Artículo 542
Contenido de ligante (%)		4,5	4,5	> 4%
Tipo de ligante		35/50	BC 35/50	---
Relación polvo mineral/betún		0,93	0,93	$\geq 0,9$ y ≤ 1
Tª fabricación/compactación (°C)	---	160/150	165/155	---
Compactación (golpes/cara)	UNE-EN 12697-30	75	75	75
Densidad máxima (g/cm ³)	UNE-EN 12697-5	2,477	2,479	---
Densidad aparente (g/cm ³)	UNE-EN 12697-6	2,318	2,313	---
Huecos en mezcla (%)	UNE-EN 12697-8	6,4	6,7	≥ 4 y ≤ 8

Resultados de tracción indirecta y sensibilidad al agua

Resistencia a tracción indirecta, probetas secas, ITS (MPa)	UNE-EN 12697-22	2,11	1,830	---
Resistencia a tracción indirecta, probetas húmedas, ITS (MPa)	UNE-EN 12697-22	1,75	1,466	---
Resistencia conservada a tracción indirecta, ITSr (%)	UNE-EN 12697-12	82	80	≥ 80

Densidad (g/cm ³)	UNE-EN 12697-22	2,203	2,278	---
Temperatura (°C)		60	60	---
Espesor de probeta (mm)		60	60	---
WTSaire (mm/10 ³ ciclos)		0,66	0,029	$\leq 0,07$
PRDaire (%)		3,6	2,9	---





EXONERACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Los contenidos establecidos en esta Guía son por un lado el resultado del análisis de distintas experiencias de los autores, previas a este trabajo y de la síntesis de los resultados experimentales llevados a cabo con diferentes betunes y polvos de caucho en laboratorio.

Los autores de la presente Guía, han elaborado la misma con el mejor criterio y rigor técnico posible. Sin embargo será en última instancia el buen criterio del usuario de la misma el único que puede garantizar un resultado satisfactorio, por lo que los autores y SIGNUS Ecovalor se eximen de toda responsabilidad derivada de su aplicación práctica.

