

SIGNUS

SISTEMA INTEGRADO DE GESTIÓN DE NEUMÁTICOS USADOS

G

uía para la fabricación de betunes con polvo de neumático





Autores

José M^a Bermejo Muñoz

Director de Desarrollo de Mercados de Valorización de SIGNUS Ecovalor

Juan Gallego Medina

Profesor Titular de la Universidad Politécnica de Madrid

Leticia Saiz Rodríguez

Técnico de Desarrollo de Mercados de Valorización de SIGNUS Ecovalor

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.

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. REFERENCIAS NORMATIVAS DE LOS BETUNES CON CAUCHO	13
2.1 Betunes mejorados con caucho	15
2.2 Betunes modificados con caucho y polímeros	16
2.3 Betunes modificados de alta viscosidad con caucho	17
2.4 Condiciones de almacenamiento de los betunes con caucho	18
3. INTERACCIÓN BETÚN-CAUCHO: PROCESO DE DIGESTIÓN	21
3.1 El proceso de digestión del caucho en los betunes	21
4. CARACTERIZACIÓN DEL POLVO DE CAUCHO	25
4.1 Características y métodos de ensayo	25
5. DISEÑO DE BETUNES CON CAUCHO	29
5.1 Selección del betún base	29
5.2 Selección del polvo de caucho	29
5.3 Selección del polímero	30
5.4 Selección del mezclador de laboratorio	30
5.5 Temperatura de mezclado y tiempo de digestión	31
5.6 Toma de muestras y ensayos de control	32
5.7 Formulación del betún en el laboratorio	32
5.8 Verificación de las características del ligante a escala industrial	33
6. FABRICACIÓN DE BETUNES CON CAUCHO A ESCALA INDUSTRIAL	35
6.1 Sistemas para la fabricación de betunes con caucho a escala industrial	35
6.1.1 Configuraciones de unidades de producción más frecuentes	35
6.1.2 Tipos de mezcladores	37
6.2 Componentes de la formulación del ligante	38
6.2.1 Polvo del caucho: recepción, almacenamiento y control	38
6.2.2 Polímero: recepción, almacenamiento y control	38
6.3 Fabricación del betún con caucho	39
6.4 Control de la producción	39
6.5 Almacenamiento de los betunes con caucho	40
7. FORMULACIONES TIPO DE BETUNES CON CAUCHO	43
7.1 Características y selección de los materiales	43
7.1.1 Betunes base	44
7.1.2 Polvo de caucho	44
7.1.3 Polímeros	46
7.2 Protocolo de fabricación	46
7.3 Formulaciones recomendadas de betunes con caucho	47
7.3.1 Betunes mejorados con caucho	47
7.3.2 Betunes modificados con caucho	48
7.3.3 Betunes modificados de alta viscosidad con caucho	49
ANEXO 1. Equipos de fabricación en laboratorio	53
ANEXO 2. Equipos de fabricación a escala industrial	59

Agradecimientos



La elaboración de esta Guía es fruto de un trabajo experimental llevado a cabo en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid, como resultado del convenio de colaboración firmado entre SIGNUS y la Fundación Agustín de Betancourt para el estudio de formulaciones de betunes modificados con polvo de caucho.

A pesar de la existencia de un convenio para la ejecución del trabajo, SIGNUS como promotor del documento quiere agradecer expresamente la gran implicación en el proyecto del profesor Juan Gallego quien gracias a su tesón e interés personal en el asunto, ha sacado adelante un trabajo que si bien no ha estado dirigido a investigación básica, ha alcanzado unos altos niveles de desarrollo tecnológico e innovación con un enfoque eminentemente industrial, lo que le hace tremendamente valioso para impulsar el desarrollo de las mezclas bituminosas con caucho en nuestro país.

Así mismo esta gran implicación en el trabajo, ha dado como resultado un volumen de información de gran riqueza de contenidos que ha obligado, a la hora de redactar esta Guía, a un gran esfuerzo de síntesis para convertirla en una herramienta de trabajo de aplicación sencilla y directa para los destinatarios de la misma, administraciones públicas, empresas constructoras o fabricantes de mezclas bituminosas, ingenierías, etc., y que todo ello conlleve un cambio definitivo de la percepción que existe en la actualidad de las mezclas bituminosas con polvo de neumático.

Igualmente, SIGNUS agradece el esfuerzo adicional del profesor Juan Gallego en la comunicación de los resultados de este trabajo en particular y de las tecnologías en general, a través de su inestimable participación en jornadas y eventos de difusión del empleo de las mezclas bituminosas con polvo de neumático.

Presentación de la Guía



El Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG-3) del Ministerio de Fomento, establece en su articulado la posibilidad de utilización de betunes o mezclas modificados con polímeros, siempre que se cumplan las especificaciones establecidas para los mismos.

En este sentido, la modificación de los betunes se puede llevar a cabo bien con polímeros, bien con polvo de neumático¹ (Orden Circular 21/2007 del Ministerio de Fomento) obtenidos a partir de neumáticos fuera de uso, dando lugar a distintos tipos de betunes y mezclas bituminosas con propiedades diferentes pero siempre superiores a las obtenidas con las mezclas de betunes convencionales.

Independientemente de los efectos positivos que confiere el polvo de neumático al betún, una de las consecuencias más positivas por las que sin duda merece la pena generalizar aún más su uso es que a los precios actuales de los betunes es posible llegar a soluciones que permitan mejorar la reología de una manera más económica que con los polímeros y otros aditivos.

A este diferencial de coste inicial además deben añadirse una serie de ventajas tales como los ahorros en gastos de conservación de las carreteras y la prolongación de su vida útil.

SIGNUS, entidad constituida con la finalidad primordial de garantizar la correcta gestión de los neumáticos fuera de uso (NFU) recogidos en España, da respuesta no solo a la propia actividad de gestión sino al cumplimiento de una serie de requisitos adicionales establecidos tanto por la Administración General del Estado como por las comunidades autónomas, a través de entre otros, del Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR 2008-2015), en el que se establece como objetivo que el caucho procedente del 55% de los neumáticos fuera de uso se aplique a mezclas asfálticas.

“ La apuesta por mezclas con polvo supone no solo ahorros presentes sino futuros”.

(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 fuera de uso.



Hasta la fecha, no existe un registro oficial con datos precisos sobre el consumo de polvo de NFU en España, ni de los tramos ejecutados con mezclas bituminosas con polvo de NFU. Sin embargo, se estima que en la actualidad hay más de 1.100 km de vías en las que se han empleado este material. Los buenos resultados alcanzados a lo largo de los últimos años, respaldan la confianza en esta tecnología.

A pesar de que algunas empresas ya han apostado por el desarrollo de estas aplicaciones, aún existe un cierto desconocimiento práctico de las mismas y un temor a abordar la formulación de los betunes con caucho por la idea de que se precisa para ello una gran tecnificación.

El análisis del mercado actual de fabricación de betunes con caucho de neumáticos revela que sólo unos pocos fabricantes están

comercializando este tipo de ligantes. Se trata habitualmente de empresas muy especializadas y altamente tecnificadas que elaboran sus propias fórmulas de trabajo. Es habitual que en las publicaciones de divulgación de sus productos describan las propiedades y mejoras que se obtienen, sin hacer referencia a las formulaciones que han empleado ya que lo mantienen como parte de su *know how*.

Esta situación conlleva, entre otras consecuencias, el que empresas de tamaño medio con poca especialización en betunes, no se atrevan a fabricar sus propios ligantes a pesar, de que el equipo necesario es relativamente sencillo y las posibilidades de ahorro resultan evidentes.

Los principales destinatarios de la presente Guía son las empresas constructoras o productores de betunes modificados con espe-

cialización o tecnificación limitada en lo que se refiere a fabricación de betunes con caucho, a los que se pretende dotar de un documento de sencillo manejo que les permita tener resuelta una preformulación de cualquiera de los betunes con caucho más utilizados en España, de modo que con unos pocos ensayos de comprobación previos estén en condiciones de fabricarlos.

Para conseguir dicho objetivo se han propuesto durante el proyecto una serie de ensayos de laboratorio para determinar unos rangos aproximados de la composición del betún con caucho, de modo que se cumplan los requisitos técnicos que se exigen tanto en la Orden Circular 21/2007 del Ministerio de Fomento como en el artículo 212 del PG-3 para betunes modificados con caucho de neumático.

Además de estas preformulaciones, este documento incluye información sobre el proceso

de fabricación (temperaturas, tiempos, energía de agitación, etc.) y recomendaciones de almacenamiento, de modo que el usuario de la Guía esté en condiciones de fabricar por sí mismo los ligantes planteados.

“ Se estima que en la actualidad hay más de 1.100 km de vías en las que se han empleado este material. Los buenos resultados alcanzados a lo largo de los últimos años, respaldan la confianza en esta tecnología.”

Referencias normativas de los betunes con caucho

2

En España se han hecho importantes avances en lo que se refiere a especificaciones de ligantes bituminosos que incorporan caucho de NFU's. Aunque sin un carácter normativo, quizás el hito más importante previo a la aparición de normativa 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, los modificados y los modificados de alta viscosidad, todos ellos con polvo de caucho procedente del NFU.

Unos meses más tarde se publicaba la Orden Circular 21/2007 del Ministerio de Fomento, "Sobre el uso y especificaciones que deben cumplir los ligantes y mezclas bituminosas que incorporen caucho procedente de NFU", convirtiéndose en el documento principal en cuanto a la fabricación y empleo de betunes con caucho en España.

En el preámbulo de la Orden Circular se define el polvo de caucho como el producto procedente de la granulación de neumáticos hasta tamaños inferiores a 1 mm y cuyo contenido de partículas finas menores de 0,063 mm no supere el 15%. Se especifica además, que es-

tará compuesto fundamentalmente por caucho natural y sintético y porcentajes máximos de contaminación ferromagnética, textil o de otro tipo inferiores al 0,01 %, 0,5% y 0,25% en peso, respectivamente.

Asimismo distingue dos procedimientos de fabricación. El primero es el que denomina "fabricación en central" y que se refiere a las instalaciones tradicionales de modificación de betunes, provistas de un mezclador con cizalla, que dotan al ligante con caucho de estabilidad suficiente para ser transportado a una planta de fabricación de mezclas bituminosas.

El segundo procedimiento es el denominado "fabricado in situ", descrito como el operado con una unidad especial para la fabricación de betunes con caucho que se ubica en la propia planta de fabricación de mezclas asfálticas y que se refiere a unidades que no necesariamente disponen de un mezclador con cizalla.

En cuanto a los tipos de betún con caucho la Orden Circular 21/2007 distingue tres categorías, en función del grado de modificación:

- Betunes mejorados
- Betunes modificados
- Betunes de alta viscosidad

Las especificaciones que se exigen a cada uno de los tres tipos de ligante caucho coinciden o al menos están relacionadas con los requisi-

tos de los betunes modificados con polímeros convencionales, que actualmente se recogen en la norma UNE-EN14023:2010.

Conviene sin embargo clarificar desde ahora, que la peculiar naturaleza de los betunes con caucho implica que algunos de los ensayos normalizados para betunes con polímeros sean de muy difícil realización a nivel práctico, ya que presentan partículas en suspensión y esto es debido a que la interacción con el betún no supone la total integración del caucho en la fase líquida. En particular, el ensayo de cohesión denominado "Fuerza-ductilidad" (UNE-EN 13589 y UNE-EN 13703) exige que las probetas de betún alcancen una elongación de al menos 40 cm. Sin embargo, las heterogeneidades que suponen las partículas de caucho en el seno del betún impiden alcanzar tales elongaciones antes de romperse, incluso a 25°C de temperatura.

A este respecto cabe señalar que la propia norma UNE-EN14023 sobre betunes modifi-

cados indica que la propiedad de la cohesión puede medirse con otros ensayos como el del impacto con el péndulo Vialit (UNE-EN 13588) que parece más adecuado para betunes modificados con caucho.

Algo similar ocurre con el ensayo de recuperación elástica (UNE-EN 13398), en el que se pide una elongación mínima de 20 cm, que tampoco es frecuente alcanzar. Sin embargo, la norma de ensayo permite, en este caso, obtener el porcentaje de retorno elástico considerando como elongación de referencia la alcanzada en el momento de la rotura y no los 20 cm que establece el procedimiento estándar.

En cualquier caso, no existen dudas sobre las propiedades mejoradas de los betunes con caucho, tanto en términos de cohesión como de retorno elástico, tan sólo se trata de una inadecuación de los procedimientos de ensayo que se toman como referencia en el momento de la redacción de las especificaciones de estos ligantes con caucho.



2.1 Betunes mejorados con caucho

Las características de estos betunes mejorados no estaban recogidas en normativa alguna, por lo que la Orden Circular 21/2007 crea unas especificaciones particulares para ellos. Para indicar que contienen caucho se nombran con las siglas "BC" seguidas del valor de penetración del ligante. Sus especificaciones técnicas se muestran en la siguiente tabla:

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/cm²	≥ 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)



2.2 Betunes modificados con caucho y polímeros

Se trata, según la Orden Circular 21/2007, de ligantes que se han modificado con caucho (no se prescribe el contenido de caucho que deben tener, ni si la modificación se consigue

además con otros aditivos). Estos ligantes deben cumplir las especificaciones de los betunes modificados (artículo 212 del PG-3). Se nombran añadiendo una "C" al final de la denominación del betún modificado que corresponda. Dichas especificaciones de betunes modificados se resumen en la siguiente tabla:

Denominación UNE EN 14023			PMB 10/ 40-70 C	PMB 25/ 55-65 C	PMB 45/ 80-60 C	PMB 45/ 80-65 C	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/cm²	≥ 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 2. Requisitos de los betunes modificados con caucho

2.3 Betunes modificados de alta viscosidad con caucho

Estos ligantes tienen unas especificaciones en las que toma relevancia el valor que debe alcanzar la viscosidad. Se nombran con las siglas BMAVC y sus especificaciones son las siguientes:

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)	UNE EN 13589 UNE EN 13703	J/cm²	5°C	-	≥ 2
			10°C	≥ 2	-
Consistencia (Flotador a 60°C)	NLT 183	s	≥ 3000		
Viscosidad dinámica	UNE EN 13302	mPa·s	135°C	≤ 7500	≤ 5000
			170°C	≥ 2000	≥ 1200
Recuperación elástica	UNE EN 13398	%	≥ 10	≥ 20	≥ 30
Estabilidad al almacenamiento (*)	UNE EN 13399	Diferencia de anillo y bola	°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 3. Especificaciones de betunes modificados de alta viscosidad con caucho (BMAVC)

2.4 Condiciones de almacenamiento de los betunes con caucho

Posteriormente, la Orden Circular 21/bis 2009 del Ministerio de Fomento, incorporó nuevos requerimientos para el empleo de estos betunes, sobre todo en lo relativo al almacenamiento y manejo de estos ligantes en obra. Establece que todos los tipos de li-

gantes con caucho, independientemente de su categoría y procedimiento de fabricación, deben estar almacenados en un tanque durante al menos 8 horas y por un máximo de 72 horas, previamente a su empleo en la fabricación de mezclas bituminosas. El tanque ha de ser, de acuerdo con esta Orden Circular 21bis/2009, preferiblemente vertical y provisto de sistema de calefacción, agitación y recirculación, además de puntos de recogida

de muestras a distintas alturas de la columna vertical.

Debe decirse que, efectivamente, tiempos de almacenamiento superiores a las 72 horas pueden afectar negativamente a las propiedades del producto. Sin embargo, de acuerdo con la experiencia española avalada por unos excelentes resultados prácticos, tiempos de interacción (fabricación + almacenamiento)

de 1 hora son suficientes para alcanzar la digestión y cumplir las especificaciones que se exigen al ligante, incluso en el caso de los betunes modificados de alta viscosidad con caucho.



Interacción betún-caucho: proceso de digestión



La interacción a alta temperatura del betún con las partículas de caucho procedente del neumático, se ha descrito de diferentes modos en la bibliografía. Por un lado, se presenta como una reacción química que consiste en la degradación de las cadenas elastoméricas por efecto térmico y por otro, un proceso de desvulcanización del caucho donde se produce la destrucción de enlaces azufre-azufre propio de la vulcanización, puesta de manifiesto por una disminución de azufre en la superficie de las partículas de caucho. Sin embargo, la interacción es principalmente un fenómeno físico cuyo mecanismo principal consiste en el hinchamiento del caucho al captar las fracciones más ligeras del betún.

3.1 El proceso de digestión del caucho en los betunes

Durante la interacción betún-caucho las partículas de caucho comienzan a hincharse o aumentar de volumen debido a la absorción de las fracciones aromáticas (*Figura 1*). Alrededor de la partícula de caucho se va formando un "gel" o "capa blanda" que va desprendiéndose por el efecto de la agitación a la vez que se integra en el betún. Llevado el fenómeno al extremo, si la temperatura o la energía de agitación se prolongaran, la partícula de caucho llegaría a desaparecer en el seno del betún.

La interacción del caucho con el betún se denomina **digestión**.

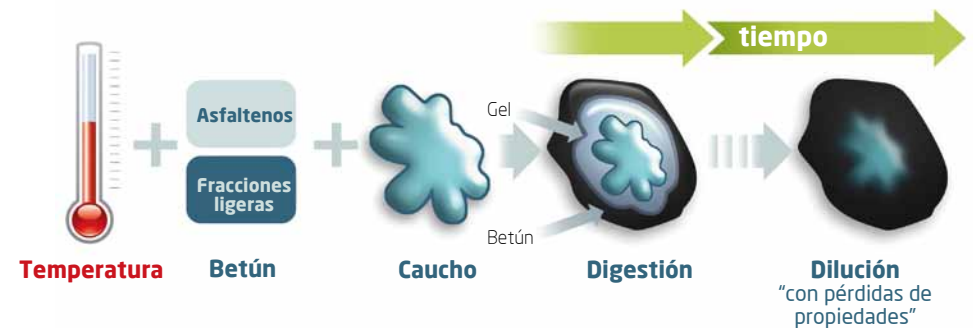


Figura 1. Evolución de la interacción betún-caucho



En la **Figura 2** se representa un esquema de la evolución del proceso de digestión con el tiempo en el que su adecuada combinación de la temperatura de digestión asegura la inte-

gración del caucho en el betún mejorando sus propiedades, mientras que cuando se prolonga en exceso, la mejora conseguida se reduce por la dilución del caucho en el betún.

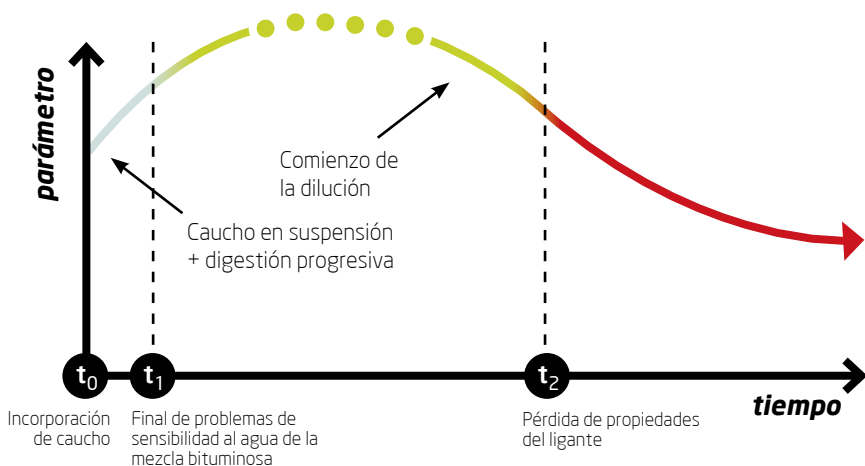


Figura 2. Evolución de propiedades modificadas

Existen varias técnicas para estudiar el proceso de digestión del caucho en el betún. Entre otras posibles, la de filtrado del caucho en suspensión, microscopía electrónica de barrido (SEM), fraccionamiento del betún (SARA), espectrometría de infrarrojos, cromatografía de filtración en gel y microscopía de fluorescencia. Todas han contribuido a un mejor conocimiento de la interacción betún-caucho.

En síntesis, el proceso de digestión se ve favorecido:

- A medida que la temperatura aumenta
- Cuando el tiempo de contacto se prolonga

- Al disminuir el tamaño máximo de las partículas de caucho
- Cuanto mayor es el contenido de fracciones ligeras del betún
- Al aumentar la energía de mezclado

“ Una adecuada combinación de la temperatura de digestión asegura la integración del caucho en el betún mejorando sus propiedades.”

Caracterización del polvo de caucho

4



Un aspecto importante a la hora de formular adecuadamente los betunes con caucho es conocer las especificaciones que presenta el polvo de NFU. Los diferentes estudios bibliográficos han demostrado que la composición del caucho y la granulometría de las partículas de polvo son dos de las principales características que mayor influencia tienen en las propiedades del betún con caucho.

La Orden Circular 21/2007 define el polvo de caucho procedente de NFU como aquél que resulta de granular neumáticos fuera de uso hasta tamaños inferiores a 1 mm y siempre que su contenido de partículas por debajo de 0,063 mm sea inferior al 15%. Además, dicho documento indica que el polvo de caucho estará compuesto fundamentalmente por caucho natural y sintético y no contendrá materiales ferromagnéticos, textiles o contaminantes en proporciones superiores al 0,01%, 0,5% y 0,25% en peso, respectivamente.

En este capítulo se recogen cuáles son las principales características del polvo de NFU y la descripción de los métodos de ensayo para su caracterización.

4.1. Características y métodos de ensayo

Las principales características del polvo son:

- **Composición química:** El polvo de NFU está compuesto por una mezcla de distintos cauchos, principalmente caucho natural (NR) y cauchos sintéticos, entre los que se encuentran los del tipo (SBR) y (BR). La proporción de estos cauchos depende del origen del neumático de partida, así por ejemplo el contenido de caucho natural de los neumáticos de camión es mayor que el de los neumáticos de vehículos ligeros (turismo, furgoneta, moto...).

Para la medida del contenido de caucho natural, el único método preciso es el basado en técnicas de ^{14}C que determina el contenido de biomasa de una muestra y que resulta equivalente a su contenido de caucho natural.

- **Densidad aparente:** Puede variar ligeramente en función del proceso de producción. No obstante, como valor de referencia se puede tomar una densidad aparente del



orden de 0,5 Kg/dm³, con ligeras oscilaciones en función del huso granulométrico y tipo de neumático empleado.

- **Granulometría:** Además de comprobar que las partículas de polvo de caucho son inferiores a un tamaño determinado, también es importante conocer su distribución de tamaños a lo largo de su curva granulométrica. El método de ensayo para establecer la granulometría está recogido en la norma europea UNE-CEN/TS 14243:2012 EX de carácter experimental, titulada: *“Materiales producidos a partir de neumáticos fuera de uso. Especificación de categorías basadas en sus dimensiones e impurezas y métodos para determinar sus dimensiones e impurezas”*.

El método de ensayo para determinar el tamaño de partícula consiste en introducir una muestra de al menos 150 g en un equipo de tamizado que tenga un movimiento de vibración en al menos dos dimensiones, para clasificar el material por tamaños mediante distintos tamices. El tiempo de tamizado es de 10 minutos. El informe de resultados proporciona la curva granulométrica, en la que además de los límites superior e inferior, se indican los porcentajes de material que pasa a través de los tamices intermedios colocados en el equipo.

- **Contenido de acero o materiales ferromagnéticos:** A través de un análisis se determina la cantidad de acero libre

que contiene el polvo de caucho, utilizando para ello un método consistente en la extracción del acero por medio de un imán. El procedimiento de ensayo establecido en la norma UNE-CEN/TS 14243:2012 EX anteriormente mencionada, plantea la toma de una muestra de polvo de caucho de 500 g esparcida sobre una bandeja que permita obtener un espesor inferior de 2 cm, sobre la que se pasa un imán de una superficie mayor de 2 cm² de superficie y 1 T (Tesla) de intensidad mínima, en el que quedan adheridas las partículas de acero.

- **Contenido de textil:** Para la cuantificación de este parámetro la norma UNE-CEN/TS 14243:2012 EX establece un procedimiento en el que se toma una cantidad de

muestra similar a la del ensayo granulométrico, que además es sometida a este mismo ensayo durante un tiempo de 10 min. Las fibras textiles en este caso, si existen, tienden a formar pequeñas aglomeraciones que se separan y pesan para su cuantificación.

- **Contenido de impurezas:** La norma experimental mencionada anteriormente, describe un método de ensayo para medir el contenido de impurezas basado en una separación densimétrica de materiales, en el que se vierte una muestra de 150 g de polvo sobre una solución salina preparada con 300 g de sal común en 1 litro de agua, dando como resultado una densidad aproximada de 1,25 g/cm³, superior a la que tiene el caucho (del orden de 1,125 g/cm³) provocando que los elementos extraños localizables en el granulado, como tierra, vidrio o alguna partícula metálica no magnética, decanten en el fondo del recipiente empleado.
- **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±5°C y la masa mínima de la muestra que será de 100 g). En esta norma se describe el ensayo para determinar la humedad de un suelo mediante secado en estufa.

“ Los métodos de ensayo para establecer la granulometría están recogidos en la norma europea UNE-CEN/TS 14243:2012 EX.”



Diseño de betunes con caucho

5

El diseño de un betún con caucho en laboratorio es un proceso que comprende la selección de los componentes y el procedimiento de fabricación, de modo que se logre posteriormente una adecuada reproducción del proceso a escala industrial y un producto resultante que cumpla unas especificaciones establecidas.

Aunque no se trata de un procedimiento excesivamente complejo, las indicaciones recogidas en esta Guía y la experiencia previa de cada uno servirán para ahorrar esfuerzos.

En los siguientes apartados se describe, paso a paso, el procedimiento a seguir para completar el diseño de un betún con caucho.

5.1 Selección del betún base

Como criterio de partida el betún base debe ser más blando que el que se pretende obtener. Tanto el caucho como los polímeros y los aditivos más utilizados, tienden a hacer el betún más consistente a temperaturas de servicio intermedias y altas. En términos de la normativa española de ligantes, la adición de caucho a un betún base supone una disminución de su penetración y un incremento de la temperatura de reblandecimiento.

También tiene cierta influencia la naturaleza química del betún. En general son preferibles

los betunes cuyo contenido conjunto de compuestos nafteno-aromáticos y aromáticos-polares según norma (NLT-373) sea lo más alto posible. No obstante, la influencia que pueda tener la composición del betún, dentro de los rangos manejados habitualmente en España, es menor que la que tiene la penetración del ligante original.

5.2 Selección del polvo de caucho

El parámetro con más influencia para la modificación del betún es la granulometría del polvo de caucho. En general, granulometrías más gruesas ralentizan la interacción betún-caucho y acentúan los problemas de sedimentación en el producto final. Son aconsejables granulometrías continuas, con tamaños máximos de 0,8 mm.

La composición química del caucho también tiene influencia en las características finales del betún. El parámetro de control debe ser el porcentaje de fracción elastomérica así como el contenido de caucho natural en la misma, en ambos casos son preferibles valores lo más altos posibles.

Por último debe considerarse el método de molienda del caucho: a temperatura ambiente o criogénico. En general es aconsejable el

“ La adición de caucho a un betún base supone una disminución de su penetración y un incremento de la temperatura de reblandecimiento.”

molido a temperatura ambiente, ya que ofrece más superficie específica, y que por otra parte es el más habitual en el mercado.

5.3 Selección del polímero

En el caso de betunes modificados es frecuente emplear algún polímero para completar el grado de modificación que se logra con el caucho. En cuanto al polímero a utilizar, en el apartado 7.1.3 de esta Guía, se dan algunas indicaciones para seleccionarlo. Los más eficaces para completar el efecto del caucho son los basados en elastómeros tipo SBS (estireno-butadieno-estireno). Suelen presentarse en polvo o en granza, pellets, etc. La decisión de utilizar una u otra presentación debe atender al tipo de mezclador empleado, tal como se explica en el siguiente apartado.

Existen en el mercado diversos polímeros del tipo SBS, con diferencias importantes en cuanto a estructura, propiedades y sobre todo por la influencia que tienen sobre el betún después de su incorporación al mismo.

Analizando las propiedades de los polímeros utilizados para el trabajo y los resultados sobre las propiedades del betún, se desprende que los polímeros SBS del tipo radial o ramificado tienen un mayor efecto modificador del betún que en último término es lo que se pretende con su incorporación. Esta mayor capacidad de modificación del betún respecto a los polímeros lineales se debe a que las estructuras ramificadas facilitan la creación de redes tridimensionales en el interior del betún.



5.4 Selección del mezclador de laboratorio

A nivel de laboratorio se tienen dos tipos de mezcladores dependiendo de que se trate de removedores con mayor o menor velocidad de rotación, o que se empleen dispositivos provistos de cizalla.

De acuerdo con las instalaciones existentes en plantas de producción, es frecuente utilizar únicamente removedores cuando la modificación de ligante se hace sólo con caucho de neumáticos, mientras que cuando se emplean adicionalmente polímeros, es más apropiado el uso de dispositivos industriales provistos de efecto cizalla.

Por tanto, si se incorporan polímeros en laboratorio es muy recomendable emplear un dispositivo provisto de cizalla, en caso contrario, empleando un dispositivo sin ella, la presentación del polímero ha de ser en polvo, para facilitar su difusión en el ligante.

El tipo de mezclador utilizado en laboratorio deberá, en todo caso, estar en consonancia

con aquel que se disponga a escala industrial. A modo de ejemplo, si el equipo de fabricación industrial está compuesto de un mezclador y un tanque de digestión de mayor tamaño, en el laboratorio sería conveniente tener una primera fase de mezclado enérgico, seguida de un período de digestión durante el que el betún con caucho esté continuamente agitado mediante un removedor, como ocurre en el tanque de digestión a escala industrial.

En el Anexo 1 de esta Guía pueden encontrarse algunos modelos característicos de ambos tipos.

5.5 Temperatura de mezclado y tiempo de digestión

Se ha comprobado que la intensidad con la que interaccionan betún y caucho, en la operación de fabricación, se duplica aproximadamente por cada incremento de 10°C de temperatura. Por ello, cuanto mayor sea la temperatura, menor será el tiempo de digestión necesario.

No obstante, al calentar los ligantes éstos envejecen, por lo que deben evitarse tempera-

turas innecesariamente altas. Sería recomendable que, de acuerdo con la práctica habitual, las temperaturas de mezclado estén en los siguientes rangos:

- Betunes con un contenido de caucho de hasta el 22%: 185-195°C
- Betunes con un contenido de caucho de hasta el 15%: 175-185°C

Debe además aclararse que aunque el betún base esté acondicionado a una cierta temperatura, al añadir el caucho y eventualmente el polímero, la temperatura disminuirá en el mezclador de laboratorio entre 10 y 40°C aproximadamente, dependiendo del porcentaje de caucho añadido y de la temperatura ambiente, por lo que es imprescindible, tras un primer mezclado a mano con espátula, acondicionar nuevamente la mezcla de betún y caucho a la temperatura deseada, antes de proceder a la operación de fabricación propiamente dicha.

En cuanto a los tiempos de digestión deben establecerse, con carácter general en 60 mi-

nutos, si bien a escala industrial este tiempo puede reducirse ligeramente.

5.6 Toma de muestras y ensayos de control

Este aspecto es de suma importancia. En general, los betunes con caucho tienen tendencia a la sedimentación, por lo que al tomar las muestras para cada ensayo han de observarse las siguientes precauciones:

- Remover con la espátula antes y durante la toma de la muestra.
- Tomar muestras en recipientes pequeños y enfriarlos lo más rápidamente posible.
- Si se van a realizar ensayos de la misma muestra a lo largo de varios días, dividir inicialmente la muestra en varias porciones, de modo que solo se caliente cada una de ellas de forma individual y se desheche el material sobrante.

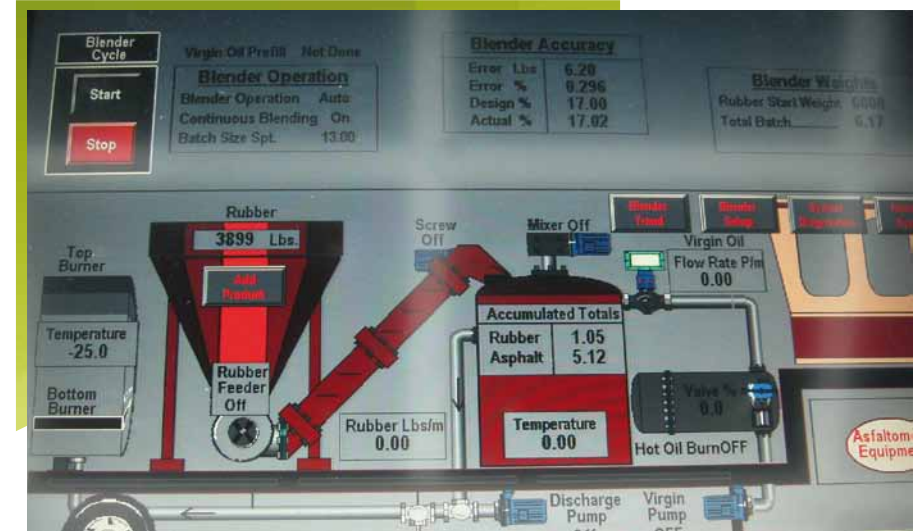
A título orientativo, para realizar los ensayos habituales, será suficiente una muestra de

unos 650 g, que se distribuirá entre los diferentes ensayos a realizar.

5.7 Formulación del betún en el laboratorio

Una vez que se ha conseguido cumplir las especificaciones después de una o varias pruebas, se redactará un documento de formulación en laboratorio que constará, al menos, de los siguientes elementos:

- La composición ponderal del producto a fabricar: porcentajes en peso de betún, de caucho y eventualmente de polímero.
- Las prescripciones del betún base, particularmente su penetración, y el origen del mismo.
- Las prescripciones del caucho, particularmente su granulometría y tipo de neumático de origen (porcentajes).
- Identificación del polímero, en los casos en que se incorpore. Se atenderá tanto a su denominación comercial como a su forma de presentación: en polvo, granulado etc.



- La temperatura de mezclado, y la temperatura de digestión, cuando ésta fuera distinta de la primera.
- El tiempo de digestión mínimo, entendiéndose como la suma del tiempo en el mezclador y en el digester en caso de existir y ser distinto del primero.
- Características del producto final: Penetración, temperatura de reblandecimiento. En el caso de betunes de alta viscosidad, también se facilitará el valor de referencia del parámetro viscosidad.

cados en laboratorio y los fabricados a escala industrial por diferentes causas, como el tipo y energía del mezclador, diferente exposición al oxígeno y por tanto diferente envejecimiento en uno y otro caso.

El procedimiento de verificación habitual debe comenzar con la formulación del ligante en laboratorio y continuar con la fabricación de una primera amasada a escala industrial, comprobando la correspondencia de sus propiedades con las que se han medido en las muestras de laboratorio. A continuación deberán hacerse los retoques oportunos en la formulación para encajar los resultados a escala real. Se trata de un proceso iterativo que resultará corto e incluso innecesario una vez se cuente con una cierta experiencia previa.

Este documento servirá para la formulación a escala industrial.

5.8 Verificación de las características del ligante a escala industrial

De forma habitual suelen existir diferencias entre las características de los betunes fabri-



Fabricación de betunes con caucho a escala industrial



Una vez que se ha obtenido la formulación del ligante con caucho a escala de laboratorio, se procede a la fabricación a escala industrial. Para este propósito existen una serie de equipos cuyos principios básicos se explican a continuación.

También se presentan en este capítulo las diversas fases del proceso de fabricación industrial: la recepción del betún, del caucho y eventualmente del polímero, la fabricación del ligante con caucho, el control de producción y del producto final y las condiciones de almacenamiento.

6.1 Sistemas para la fabricación de betunes caucho a escala industrial

La producción de betunes con caucho exige la interacción íntima entre el betún, el caucho, en algunas ocasiones los polímeros y eventualmente otros aditivos de distinto tipo que ayuden a adquirir o mantener ciertas propiedades del betún.

“ El objetivo de la unidad de fabricación de betunes modificados es facilitar la interacción entre los componentes en el menor tiempo posible.”

6.1.1 Configuraciones de unidades de producción más frecuentes

Existen básicamente dos esquemas de fabricación: el mezclado en línea, también llamado en continuo y el mezclado por amasadas.

• Mezclado en línea

En el **mezclado en línea** los componentes a mezclar pasan a través del equipo de forma continua, y salen de él ya mezclados. Se puede observar en el esquema de la **figura 3**.

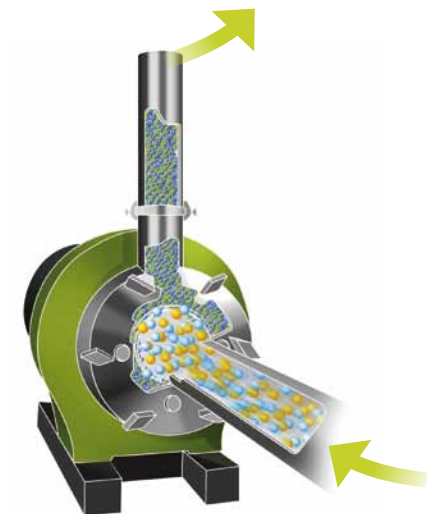
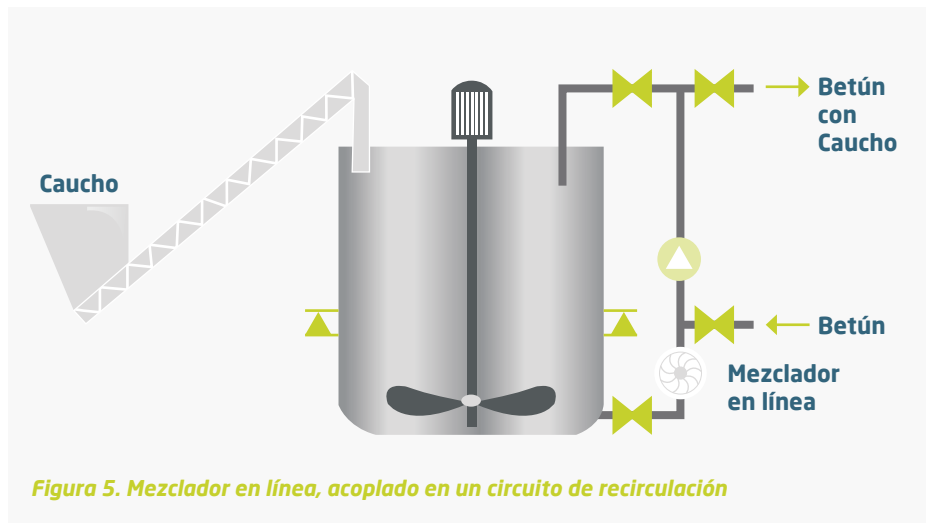
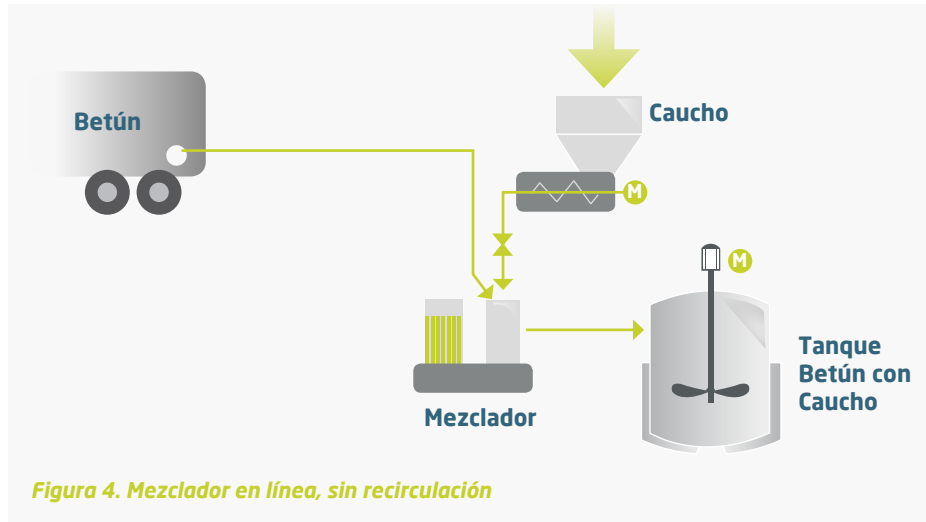


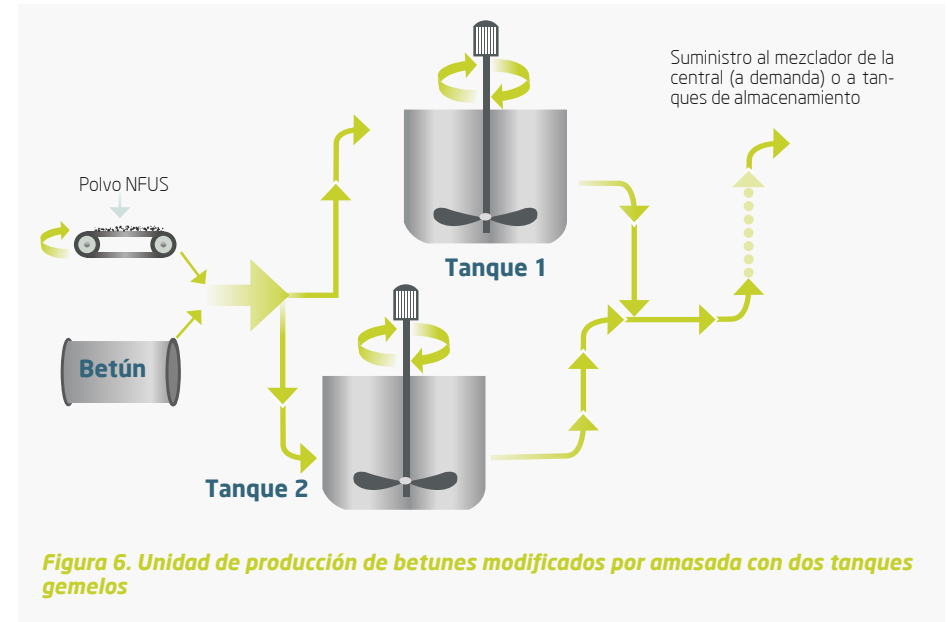
Figura 3. Mezclador en línea

En este tipo de mezclador la fabricación se puede conseguir sin recirculación (figura 4) o mediante un circuito de recirculación (figura 5) repitiendo las pasadas necesarias por el mezclador hasta alcanzar un grado de integración suficiente que garantice el cumplimiento de las especificaciones del producto.



• Mezclado por amasadas

Por otro lado, el esquema de mezclado por amasadas consiste en introducir un dispositivo de agitación en un tanque, de modo que durante un tiempo prefijado la mezcla del betún con el caucho y los eventuales aditivos estén en continuo movimiento para permitir una correcta interacción entre ellos.



En cualquier caso, para conseguir una buena interacción entre el betún y el polvo de caucho, la configuración de la unidad de betún modificado deberá permitir que antes de ser utilizado, el betún con caucho disponga del tiempo de digestión prescrito en la formulación de laboratorio, y que se calcula sumando el tiempo de mezclado y el tiempo de permanencia en el tanque de digestión, si existe y es distinto del mezclador.

6.1.2 Tipos de mezcladores

Independientemente de la configuración de la unidad de producción de betunes con caucho, el mezclador propiamente dicho puede estar dotado de efecto cizalla o no.

“ El mezclador de efecto cizalla es capaz de cortar las partículas del polvo NFU favoreciendo la interacción con el betún.”

En el primer caso, el elemento mecánico que produce el mezclado es capaz de cortar o romper las partículas con lo que disminuye el tamaño de éstas y facilita la aparición de nuevas superficies en las que progrese la interacción. Este tipo de mezcladores de cizalla disponen generalmente de una pieza fija, estator y una parte móvil, rotor, con muy pequeña holgura entre ellas. Por medio de un efecto de succión se obliga a la mezcla

a pasar entre ambas piezas produciendo un efecto de corte muy intenso que contribuye a disminuir el tamaño de las partículas de caucho e incrementar su superficie específica, favoreciendo la interacción de las mismas con el betún.

Los mezcladores tradicionales sin efecto cizalla consisten en un sistema removedor más o menos potente que mantiene el fluido agitado, mejorando la interacción del betún con el caucho que de otro modo sería más lenta.

Entre los dos tipos de mezcladores anteriores, habría que situar dispositivos de alta velocidad (>3.000 rpm) provistos de un cabezal diseñado no sólo para crear un vórtice en el fluido, sino para cortar o romper las partículas, al menos parcialmente.

Dependerá en último término del fabricante de la unidad de betunes modificados, el emplear una u otra configuración y uno u otro tipo de mezclador. En el Anexo II se incluye información más detallada sobre los equipos más frecuentes en el mercado, ventajas e inconvenientes de los mismos, maquinaria auxiliar necesaria, conexión a la planta de mezclas bituminosas, etc.

Como recomendación general, el empleo de polímeros conjuntamente con caucho para obtener ciertos grados de modificación en el ligante se ve muy beneficiada por el empleo de mezcladores dotados de efecto cizalla.

6.2. Componentes de la formulación del ligante

Se tomará como formulación de partida aquella obtenida a nivel de laboratorio una vez hechas las comprobaciones oportunas a escala industrial, tal como se indica en los puntos 5.7 y 5.8. Habrá de prestarse especial atención a:

6.2.1 Polvo del caucho: recepción, almacenamiento y control

El polvo de caucho suele suministrarse tanto en cisterna como envasado en big-bags, de un volumen aproximado de 2 m³. A su llegada se

comprobará la hoja de especificaciones, que se adjunta con cada envío, donde se indicarán al menos los siguientes datos:

- Razón social del suministrador y fecha de producción.
- Huso granulométrico.
- Proporciones, en porcentaje, de los tipos de neumáticos utilizados en la fabricación.
- Contenido de humedad en porcentaje (%).
- Contenido de fibra textil en porcentaje (%).
- Contenido de partículas ferromagnéticas en porcentaje (%).
- Contenido de otros contaminantes en porcentaje (%).

En función del sistema de gestión de la calidad de los materiales se verificará el cumplimiento de los parámetros y se almacenará, hasta su consumo debidamente protegido, particularmente frente a la lluvia. Siempre que los envases (big-bag) no estén provistos de una lámina interna de polietileno que protege el caucho en caso de lluvia, deberán cubrirse los sacos con una lona u otro elemento que garantice su protección frente al agua. En caso contrario, el caucho debe almacenarse bajo cubierta.

Para comprender la importancia de preservar el caucho almacenado de la humedad debe considerarse que, aunque la misma se perdería durante la fabricación del betún con caucho, ésta podría dar lugar a espumas al entrar en contacto con el betún, lo que supone por un lado un incremento del riesgo de salpicaduras y derrames y por otro, la reducción de la productividad de la planta.

6.2.2 Polímero: recepción, almacenamiento y control

El polímero, cualquiera que sea su presentación, habrá de venir provisto del correspondiente certificado facilitado por el suministrador. Antes de su uso, debe verificarse que el

producto se corresponde con el empleado en la formulación de laboratorio.

En cuanto a las condiciones de almacenamiento, han de observarse las mismas precauciones que con el caucho, sobre todo en lo referente a la protección frente a la humedad.

6.3 Fabricación del betún con caucho

Antes de comenzar la fabricación ha de comprobarse que todos los elementos del equipo están en perfecto estado de funcionamiento: calderas, circuito térmico, dispositivos de dosificación, bombas, etc.

Una vez comenzada la fabricación, deberán verificarse que tanto las temperaturas del betún base que entra en la unidad de fabricación, como la del betún en el interior del mezclador y la del betún con caucho en el tanque de digestión, si fuera distinto del mezclador, se corresponden con las condiciones de producción prescritas en la formulación de laboratorio. A estos efectos, el equipo debe estar provisto de los sistemas de medida de temperatura correspondientes, situados en un lugar fácilmente accesible.

Asimismo se comprobarán las temperaturas en tuberías, codos, bombas y demás elementos en contacto con el betún, especialmente si no están calefactados. En esta tarea puede ser de gran ayuda el empleo de una cámara termográfica. Se trata así de evitar “tapones fríos” en los circuitos que ha de recorrer el betún y especialmente el betún con caucho.

Durante la fabricación se continuará comprobando la temperatura del betún en las sucesivas fases de su producción, tomando las medidas necesarias para corregir desviaciones respecto a lo recomendado en la formulación de laboratorio.

Una vez que la fabricación ha comenzado, se pondrá especial atención en que la proporción de los componentes sea la prescrita en la formulación de laboratorio.

Asimismo, y con objeto de respetar los tiempos mínimos de digestión, se evitará sobrepasar la producción horaria que tenga el equipo, de acuerdo a su diseño.

6.4 Control de la producción

La viscosidad del ligante se ve incrementada por la presencia de caucho en el betún. Además, se trata de una propiedad que puede medirse en continuo, por ejemplo en una tubería de recirculación. Por este motivo, dicho parámetro se emplea como control de calidad en tiempo real sin necesidad de recurrir a la extracción de muestras, lo que permite detectar inmediatamente anomalías importantes en el proceso de fabricación.

No obstante, la extracción de muestras constituye, junto al control de las temperaturas y del tiempo de fabricación (incluida la digestión), el principal elemento para el control de la calidad del ligante.

A tal efecto, la unidad de fabricación debe estar equipada con las correspondientes válvulas de toma de muestras. Para que la muestra tomada sea representativa, en cuanto a composición, grado de digestión y temperatura, del material que se suministre a la central de fabricación de mezclas bituminosas, ésta debe extraerse de un punto cercano a la salida del tanque.

Para un buen control de las especificaciones del betún es preciso desechar la cantidad de ligante necesaria para asegurar que la muestra procede realmente del tanque y no simplemente de la tubería o la válvula de toma de muestras (mínimo 3-4 Kg).

A su vez, la muestra debe estar constituida por otros 3-4 kg de betún con caucho, tomados en un envase metálico, de unos 5 kg de capacidad, provisto de cierre que asegure la conservación de la muestra.

Este volumen de muestra permite, con un buen control de la temperatura del betún



realizar el ensayo de viscosidad con viscosímetro manual ya que por las dimensiones de la muestra, la parte central conserva la temperatura de fabricación durante más tiempo que lo haría en el caso de tomar muestras más pequeñas, típicas de otros tipos de betún. La toma de las submuestras a partir de la muestra de campo debe realizarse observando las precauciones que se mencionaron en el apartado 5.6 de esta Guía, sobre toma de muestras en laboratorio.

Durante las primeras pruebas a escala industrial, a partir de una formulación de laboratorio, se tomarán muestras para comprobar que el producto fabricado cumple las especificaciones de referencia presentadas en el *capítulo 2 de esta Guía*, con las limitaciones que allí se describen.

En cuanto a la frecuencia de los controles, se recomienda que por cada 50 toneladas de producto fabricado, y al menos dos veces por jornada de trabajo, se tome una muestra de 3-4 kg en la que se medirá el valor de la viscosidad *in situ* con viscosímetro manual, y a partir de ella, submuestras del betún para la determina-

ción en laboratorio del valor de penetración, la temperatura de reblandecimiento y el retorno elástico. El envase con la muestra sobrante se cerrará y etiquetará haciendo constar el origen, la fecha y hora de la muestra, así como las posibles incidencias que tengan lugar (tiempo de almacenamiento prolongado, nº de recalentamientos, etc.). La muestra adecuadamente identificada se conservará para posteriores comprobaciones, si fueran necesarias.

Además, durante la fabricación de betunes de alta viscosidad, cada hora se tomará una muestra que se someterá al ensayo de viscosidad con viscosímetro rotacional manual y como recomendación, en los demás tipos de ligantes con caucho. Toda la información obtenida sobre viscosidades se plasmará en un informe que será remitido al organismo de control.

6.5 Almacenamiento de los betunes con caucho

Como regla general, los betunes con polvo de caucho son productos que conviene consumir tan pronto como sea posible. Los motivos de esta recomendación son tres: El primero la

tendencia a la decantación de las partículas, el segundo el cremado en superficie que se produce cuando se incorporan polímeros, y por último, la evolución de sus propiedades a medida que avanza el tiempo de almacenamiento.

No obstante, la propia dinámica de los trabajos en obra obligará en muchos casos a que sea necesario el almacenamiento durante horas, ya que la producción de betún con caucho y el consumo en obra no siempre se sincronizan debido a las numerosas contingencias que afectan habitualmente a una obra de pavimentación.

Por consiguiente, se trata de buscar una solución de compromiso entre ambas realidades, la conveniencia de consumir el producto de forma inmediata a su fabricación y la necesidad de operar con cierta capacidad de almacenamiento y regulación en el suministro a la planta.

Se dan a continuación unas indicaciones para afrontar con éxito el almacenamiento:

- Los tanques de almacenamiento, además de disponer de sistemas de calentamiento y aislamiento térmico, como es habitual, deben estar provistos de un removedor que mantenga el producto continuamente agitado para prevenir decantaciones y heterogeneidades.
- El tiempo máximo de almacenamiento debe ser de 3 días.
- La temperatura de almacenamiento debe ser similar o inferior a la de digestión.
- Cuando el almacenamiento se prolonga más de 24 horas es habitual permitir que la temperatura descienda progresivamente, para recalentar previamente a la reanudación del consumo. Estos ciclos enfriamiento-recalentamiento deben ser como máximo dos, ya que la repetición del proceso puede acelerar la degradación del caucho y la pérdida de propiedades del betún con caucho

En los casos en los que sean inevitables más ciclos de enfriamiento-recalentamiento, o bien que los tiempos de almacenamiento se prolonguen más allá de 3 días (por ejemplo, por la persistencia de condiciones meteorológicas adversas para la pavimentación) se comprobarán los parámetros fundamentales del betún: penetración, temperatura de reblandecimiento y retorno elástico. La viscosidad se comprobará en el caso de los betunes con caucho de alta viscosidad. En caso de ligeras desviaciones respecto a las especificaciones del producto, se recomienda:

- Consumir el betún con caucho como si se tratase de un betún convencional y siempre en mezclas bituminosas destinadas a aplicaciones de menores exigencias técnicas.
- Como alternativa, se podría añadir al tanque más producto fabricado con una concentración de caucho y/o polímeros superior a la original, hasta que se recuperasen las propiedades perdidas.

Observando estas pautas puede asegurarse la calidad del ligante y la ausencia de incidencias en la central de mezclas bituminosas.

“ Se trata de buscar una solución de compromiso entre ambas realidades, la conveniencia de consumir el producto de forma inmediata a su fabricación y la necesidad de operar con cierta capacidad de almacenamiento y regulación en el suministro a la planta.”

Formulaciones tipo de betunes con caucho

7

Como se ha dicho, uno de los principales objetivos de esta Guía es dar unas orientaciones precisas sobre la composición que permite obtener los betunes con caucho más empleados en España, con los requisitos que se piden para ellos en las especificaciones españolas, tanto en el artículo 212 del PG-3 como en la Orden Circular 21/2007.

Es sabido que las características de un betún con caucho dependen del origen y granulometría del caucho, del betún base y eventualmente del polímero, no sólo en lo que se refiere a su penetración, sino también a su caracterización química. Además, el tipo de mezclador que se emplee también puede afectar a algunas propiedades del ligante final.

Por ello no es posible dar una composición óptima para todos los betunes y cauchos, y para todos los equipos de mezclado. Sin embargo, sí se pueden dar unas formulaciones orientativas que en la práctica totalidad de los casos cumplirán especificaciones. No obstante, es necesario realizar trabajos adicionales en el laboratorio para optimizar esa formulación tanto en lo referente a sus propiedades como en lo relativo a los costes de fabricación.

“ Las características de un betún con caucho dependen del origen y granulometría del caucho, del betún base y eventualmente del polímero. Además el tipo de mezclador que se emplee, también puede afectar a algunas propiedades del ligante final.”

En este ánimo se han realizado una serie de trabajos de laboratorio, que se describen a continuación, concebidos para que las formulaciones que se ofrecen en las siguientes secciones tengan la mayor generalidad y validez posible.

7.1 Características y selección de los materiales

A continuación se describen las características de los materiales empleados para llevar a cabo el presente trabajo de laboratorio.

7.1.1 Características o selección de los betunes base

De acuerdo con la bibliografía y la experiencia, contenidos altos de compuestos aromáticos facilitan la interacción del betún con caucho. Para el desarrollo experimental del trabajo, se analizaron muestras de betunes puros de penetración 50/70, procedentes de 4 refinerías españolas. En su elección se tuvo en cuenta tanto el origen de los crudos procesados como el propio procedimiento de preparación que se aplica en las instalaciones, de forma que los betunes empleados fuesen muy diferentes entre sí y el rango de comportamientos fuese lo suficientemente amplio como para que el resultado del trabajo sea de aplicación al 100% de los betunes usados comúnmente en nuestro país.

	Betún de la Refinería 1	Betún de la Refinería 2	Betún de la Refinería 3	Betún de la Refinería 4
(A) Asfaltenos, %	18,2	13,8	18,8	14,1
(B) Saturados, %	17,7	9,7	12,0	22,4
(C) Nafteno-Aromáticos, %	43,4	48,3	46,4	45,8
(D) Aromáticos-Polares, %	20,2	28,0	22,3	17,7
(C+D) Aromáticos, %	63,6	76,3	68,7	63,5

Tabla 4. Composición de los betunes originales

A la vista de estos resultados se seleccionaron las refinerías 2 y 4 por presentar sus betunes los valores máximo y mínimo respectivamente para el contenido total de aromáticos. Con betunes de estas dos refinerías se realizó el resto de trabajos de laboratorio.

7.1.2 Características o selección del polvo de caucho

Las principales características del polvo de caucho, con influencia en las propiedades de los betunes, son por un lado, su composición (el contenido de polímeros e incluso el porcentaje de caucho natural) y su granulometría y por otro el modo de fabricación utilizado.

“El método habitual para la caracterización de los betunes es el de fraccionamiento, descrito en la norma NLT-373/94”, a través del cual se distinguen cuatro fracciones distintas: maltenos, solubles en n-heptano, los saturados no adsorbidos en alúmina calcinada, nafteno-aromáticos o simplemente aromáticos, que sí se adsorben en alúmina calcinada en presencia del n-heptano y que se desorben con tolueno, y aromáticos polares, también denominados resinas, que se desorben de la alúmina calcinada después de que las fracciones saturadas y nafteno-aromáticas se hayan separado, empleando para ello tolueno y tricloroetileno como eluyentes.

Los resultados de fraccionamiento (NLT-373/94) de los cuatro betunes fueron los siguientes:

A efectos prácticos, el polvo de caucho que se comercializa en España está obtenido con sistemas de granulación, a temperatura ambiente. Por ello es el único que se ha utilizado para este trabajo.

En cuanto a la **granulometría**, el 100% del caucho utilizado pasa por el tamiz de 0,8 mm con un retenido en el tamiz 0,5 mm de más del 35%. Se trata de una granulometría en un rango frecuente en el mercado para la modificación de asfaltos.

Por último, en cuanto a la **composición química**, el tipo de caucho de que se tra-

te a efectos prácticos depende del origen neumático, bien de camión o de vehículos ligeros, con porcentajes de caucho natural y sintéticos diferentes. Así, para el estudio de laboratorio se seleccionaron dos cauchos con la granulometría mencionada más arriba, el primero procediendo a partes iguales de neumáticos de camión y de vehículo ligero (50/50) y el segundo de la granulación de

neumáticos de camión (100/0). La composición de ambos productos se puede ver en las **tablas 5, 6 y 7**.

Para la medida del componente no caucho del polvo, al margen del negro de carbono, se lleva a cabo un análisis del extracto cetónico (ISO 1407) que arroja los siguientes resultados:

Origen del Polvo de NFU	Plastificante + aditivos %		
	medida 1	medida 2	valor medio
50% camión + 50% vehículo ligero	8,40%	7,92%	8,16%
100% camión	5,75%	6,01%	5,88%

Tabla 5. Análisis de extracto cetónico de caucho

La medida de los componentes principales de polvo se lleva a cabo mediante un análisis termogravimétrico, utilizando una termobalanza TGA/SDTA 851 de Mettler con las siguientes condiciones:

- Masa de muestra de 20 mg.

- Flujo de nitrógeno de 80 mL/min.
- Flujo de oxígeno = 45 mL/min.
- Temperatura de ensayo = 30 a 1.000 °C.
- Velocidad de calentamiento = 20 °C/min.

Los resultados fueron los siguientes:

Origen del Polvo de NFU	TGA			
	Volátiles %	Caucho %	Negro de carbono %	Cenizas %
50% camión + 50% vehículo ligero	4,67	57,41	32,22	6,02
100% camión	4,83	57,05	31,69	6,83

Tabla 6. Análisis termogravimétrico de caucho

Para una completa caracterización del polvo se llevó a cabo la medida del contenido de caucho natural que se midió mediante el método de ¹⁴C. Los resultados de ambos tipos de polvo fueron los siguientes:

Origen del Polvo de NFU	% Caucho natural
50% camión + 50% vehículo ligero	38%
100% camión	47%

Tabla 7. Contenido de caucho natural

A partir de estos dos tipos de granulado de caucho se realizó todo el trabajo experimental de laboratorio posterior, de modo que las formulaciones que se ofrecen en los apartados siguientes de esta Guía tienen validez tanto con caucho 100/0 (100% camión) como con caucho 50/50 (a partes iguales camión/vehículo ligero). No obstante, cualquier otra muestra de polvo procedente de mezclas de neumáticos que se encuentren en estos rangos o similares, debería tener un comportamiento similar al encontrado en este trabajo.

7.1.3 Características o selección de los polímeros

Durante las primeras pruebas de laboratorio se observó que la modificación conseguida era más eficaz en el caso de un copolímero termoplástico butadieno/estireno 70/30, polimerizado en solución y con estructura radial. Su nombre comercial es Calprene 411. Se presenta en forma de miga porosa, de pellet y de polvo con sílice. En el laboratorio se empleó la presentación en polvo, ya que el mezclador utilizado era del tipo hélice a alta velocidad, pero sin cabezal con cizalla, por lo que se recomendaba emplear la presentación en polvo para facilitar su integración en el betún.

7.2 Protocolo de fabricación

Los betunes se fabricaron mediante el equipo que se muestra en las **figuras 9 y 10 del Anexo I**. Se trata de un mezclador de hélice a alta velocidad, provisto de un recipiente de 1 litro en un baño térmico con aceite en el que se pone una muestra de 650 g de peso. Tras un primer mezclado manual, con espátula, se introducía la cabeza del mezclador. El recipiente quedaba cerrado gracias a una tapa perforada para permitir la salida del eje del cabezal y la cinta adhesiva de aluminio que sellaba el conjunto para impedir la entrada de aire. Tras 10 minutos de pausa para permitir que la muestra alcanzase de nuevo la temperatura de trabajo, comenzaba el proceso de mezclado seleccionando para ello la velocidad de giro más adecuada a cada tipo de betún. Los detalles sobre temperaturas, velocidades del mezclador, tiempos de operación, etc., se pueden encontrar en las fichas correspondientes que se presentan en esta Guía.

Una vez fabricado el betún con caucho se tomaron muestras para los ensayos de penetración, temperatura de reblandecimiento y retorno elástico, así como para el de viscosidad en el caso de los betunes de alta viscosidad.

Para el diseño de cada tipo de betún con caucho se fabricaron 4 ligantes:

- Betún de la refinería 2 + Caucho 50/50 (+ polímero en la fabricación de los ligantes tipo PMB).
- Betún de la refinería 2 + Caucho 100/0 (+ polímero en la fabricación de los ligantes tipo PMB).
- Betún de la refinería 4 + Caucho 50/50 (+ polímero en la fabricación de los ligantes tipo PMB).
- Betún de la refinería 4 + Caucho 100/0 (+ polímero en la fabricación de los ligantes tipo PMB).

Para cada una de estas cuatro combinaciones se ensayaron varios contenidos de caucho y en el caso de los ligantes PMB, varios contenidos de polímero.

Finalmente, y a la vista de los resultados de los ensayos, se seleccionaron las composiciones más conservadoras de modo que se garantizara su cumplimiento en los 4 casos de estudio. Ello sin detrimento de que otros tipos de polvo de caucho con granulometrías o contenidos de caucho natural más favorables, así como con betunes más compatibles, las formulaciones pudieran incorporar porcentajes mayores de caucho.

Mediante este protocolo de fabricación se determinó la composición idónea para fabricar ligantes BC 35/50, BC 50/70, PMB 45/80-60, PMB 45/80-65, BMAVC-1, BMAVC-3, y un último ligante, que no está recogido la normativa, el BMAVC-1b, más blando que el BMAVC-1, y cuya utilización se recomienda para regiones frías.

“ Se seleccionaron las composiciones más conservadoras de modo que se garantizara su cumplimiento en los 4 casos de estudio.”

En los siguientes apartados se presentan las formulaciones tipo para cada uno de estos ligantes.

7.3 Formulaciones recomendadas de betunes con caucho

En este apartado de la Guía se presentan una serie de formulaciones recomendadas para distintos tipos de betunes con caucho. Por simplicidad, estas formulaciones se presentan en forma de ficha de fácil manejo. No obstante debe tenerse en cuenta que se trata de formulaciones que han dado buen resultado con los materiales y en las condiciones de laboratorio que se han descrito más arriba y por tanto deben interpretarse en su sentido de formulaciones aproximadas que precisan su comprobación previa en laboratorio y a veces incluso ligeras variaciones para que el producto resultante cumpla especificaciones.

7.3.1 Betunes mejorados con caucho

Los betunes mejorados con caucho están recogidos en la Orden. Circular. 21/2007 de

Fomento. Se trata de betunes con características mejoradas sobre los betunes de penetración similar, teniendo una temperatura de reblandecimiento algo mayor que aquéllos. Su nomenclatura se compone de las letras BC seguidas del rango de penetración. Existen dos tipos: BC 35/50 y BC 50/70.

La recomendación es que pueden utilizarse en la fabricación de todas las mezclas bituminosas, para cualquier capa y categoría de tráfico en la que se venían empleando los betunes de penetración.

Su fabricación es sencilla por su limitado contenido de caucho, lo que hace que su viscosidad no sea elevada. Sin embargo, pueden decantar, por lo que deben tomarse las medidas adecuadas durante su fabricación y manejo.

La formulación recomendada para estos ligantes se presenta en las **Fichas 1 y 2**.

FICHA 1

BC 35/50

Componentes	Fabricación
Betún Base: B50/70 Caucho: 0/0,8 mm % Caucho (s/betún): 10	Temperatura (°C): 185 Tipo de agitador: hélice, 4.000 rpm Tiempo de digestión: 60 min
Manipulación y almacenamiento	
El producto puede decantar. Es necesario el empleo de tanques provistos de removedor.	

FICHA 2

BC 50/70

Componentes	Fabricación
Betún Base: B70/100 Caucho: 0/0,8 mm % Caucho (s/betún): 10	Temperatura (°C): 185 Tipo de agitador: hélice, 4.000 rpm Tiempo de digestión: 60 min
Manipulación y almacenamiento	
El producto puede decantar. Es necesario el empleo de tanques provistos de removedor.	

7.3.2 Betunes modificados con caucho

En este tipo de ligantes, una parte de su modificación se ha conseguido con caucho, ya que suelen incorporar también polímeros. Sus características tecnológicas están recogidas en el artículo 212 del PG-3. Este artículo se dedica a los betunes modificados con polímeros y establece que en el caso de que la mayor parte de la modificación se consiga con caucho de neumáticos, al final de su nomenclatura debe colocarse una "C" indicando que contienen caucho. Así por ejemplo, un ligante PMB 45/80-60, que tiene una penetración entre 45 y 80 décimas de milímetro, y una temperatura de reblandecimiento igual o mayor de 60° si se ha obtenido utilizando mayoritariamente caucho, pasa a denominarse PMB 45/80-60 C.

En esta Guía se presentan dos ligantes modificados con caucho: PMB 45/80-60 C, que se corresponde con el antiguo BMC-3b y el PMB 45/80-65 C, que se corresponde con el antiguo BMC-3 C. Al añadirse la letra "C" se informa de que contienen en una mayor proporción caucho de neumáticos.

Estos ligantes se pueden utilizar en los tipos de mezclas bituminosas, capas y categorías de



tráfico en las que se utilizan los betunes modificados con polímeros.

Debe tenerse en cuenta que estos ligantes también pueden decantar, por lo que deben tomarse las medidas adecuadas durante su fabricación y manejo para que esto no ocurra.

Las formulaciones de estos betunes se presentan en las *Fichas 3 y 4*.

FICHA 3

PMB 45/80-60 C

Componentes

Betún Base: B110/120
Caucho: 0/0,8 mm
% Caucho (s/betún): 4 - 5
% Polímero C411 (s/betún): 2,5 - 3

Formulación

Dependiendo del contenido de aromáticos del betún base, se precisan ensayos de laboratorio previos para determinar exactamente la dosificación óptima.

Fabricación

Para su fabricación se recomienda utilizar un mezclador de cizalla.

Manipulación y almacenamiento

El producto puede decantar. Es necesario el empleo de tanques provistos de removedor.

Fabricación

Temperatura (°C): 185
Tipo de agitador: hélice, 8.800 rpm
Tiempo de digestión: 60 min

FICHA 4

PMB 45/80-65 C

Componentes

Betún Base: B110/120
Caucho: 0/0,8 mm
% Caucho (s/betún): 4 - 5
% Polímero C411 (s/betún): 3 - 4

Formulación

Dependiendo del contenido de aromáticos del betún base, se precisan ensayos de laboratorio previos para determinar exactamente la dosificación óptima.

Fabricación

Para su fabricación se recomienda utilizar un mezclador de cizalla.

Manipulación y almacenamiento

El producto puede decantar. Es necesario el empleo de tanques provistos de removedor.

Fabricación

Temperatura (°C): 185
Tipo de agitador: hélice, 8.800 rpm
Tiempo de digestión: 60 min

7.3.3 Betunes modificados de alta viscosidad con caucho

Los betunes de alta viscosidad están recogidos en la Orden Circular 21/2007 del Ministerio de Fomento, y son ligantes muy modificados. En esta Guía se dan orientaciones para la fabricación de dos de los más utilizados que son, BMA-

VC-1 y BMAVC-3. El primero se logra con porcentajes de caucho altos y tiene una viscosidad también muy alta. El segundo sin embargo se fabrica con caucho y polímero, y eventualmente otros aditivos. Se trata de un ligante menos viscoso que el primero, aunque muy por encima de los valores de los betunes convencionales.

También se presenta en esta Guía un tercer tipo de ligante de alta viscosidad, que se ha denominado BMAVC-1b, donde la "b" indica que es una variedad más blanda que el BMAVC-1. El motivo de incluirlo en la Guía es que, después de la aprobación de la O.C. 21/2007 se ha observado que la BMAVC-1 no llega a ofrecer la flexibilidad requerida en zonas con inviernos muy fríos, por lo que se ha aplicado con éxito un ligante similar, pero fabricado a partir de una base más blanda. Éste es el que se ha denominado BMAVC-1b.

Los ligantes de alta viscosidad con caucho están especialmente recomendados cuando se requiere una alta resistencia a la fisuración, especialmente en recrecimientos de pavimentos semirrígidos y de losas de hormigón.

Se trata de ligantes con tendencia a la sedimentación, por lo que deben tomarse las medidas adecuadas durante su fabricación y manejo.

Las formulaciones de estos ligantes se presentan en las **fichas 5, 6 y 7**.

FICHA 5

BMAVC-1

Componentes	Fabricación
Betún Base: B35/50 Caucho: 0/0,8 mm % Caucho (s/betún): 22	Temperatura (°C): 195 Tipo de agitador: hélice, 4.000 rpm Tiempo de digestión: 60 min
Formulación	
Con ciertos betunes base, más ricos en fracciones aromáticas, el contenido de caucho estaría alrededor del 20%.	
Manipulación y almacenamiento	
El producto puede decantar. Es necesario el empleo de tanques provistos de removedor.	

FICHA 6

BMAVC-1b

Componentes	Fabricación
Betún Base: B50/70 Caucho: 0/0,8 mm % Caucho (s/betún): 22	Temperatura (°C): 195 Tipo de agitador: hélice, 4.000 rpm Tiempo de digestión: 60 min
Formulación	
Con ciertos betunes base, más ricos en fracciones aromáticas, el contenido de caucho estaría alrededor del 20%.	
Manipulación y almacenamiento	
El producto puede decantar. Es necesario el empleo de tanques provistos de removedor.	
Nota aclaratoria	
Este ligante no viene recogido en la O.C. 21/2007. Es un betún más blando y ha demostrado mejor comportamiento en zonas frías que el BMAVC-1. Las propiedades básicas de este tipo de ligante son:	<ul style="list-style-type: none"> • Penetración (UNE-EN 1426): 30/40 10-1 mm • TAyB (UNE-EN 1427): ≥ 68°C • Viscosidad dinámica a 170°C (UNE-EN 13302): ≥ 2.000 cP • Recuperación elástica a 25°C (UNE-EN 13398): ≥ 10%

FICHA 7

BMAVC-3

Componentes	Fabricación
Betún Base: B110/120 Caucho: 0/0,8 mm % Caucho (s/betún): 4 - 5 % Polímero C411 (s/betún): 3,5 - 4,5	Temperatura (°C): 185 Tipo de agitador: hélice, 8.800 rpm Tiempo de digestión: 60 min
Formulación	
Dependiendo del contenido de aromáticos del betún base, se precisan ensayos de laboratorio previos para determinar exactamente la dosificación óptima.	
Manipulación y almacenamiento	
El producto puede decantar. Es necesario el empleo de tanques provistos de removedor.	

Los resultados de los análisis se resumen en la tabla siguiente:

	Betún base	Contenido de Caucho ⁽¹⁾ (%)	Contenido de Polímero ⁽²⁾ (%)	T ² (°C) mezclado	Nivel de agitación ⁽³⁾	Tiempo de digestión (min)
BC 35/50	B 50/70	10	-	185	Medio	60
BC 50/70	B 70/100	10	-	185	Medio	60
PMB 45/80-60C	B 110/120	4 - 5	2,5 - 3	185	Alto	60
PMB 45/80-65C	B 110/120	4 - 5	3 - 4	185	Alto	60
BMAVC-1	B 35/50	22	-	195	Medio	60
BMAVC-1b	B 50/70	22	-	195	Medio	60
BMAVC-3	B 110/120	4 - 5	3,5 - 4,5	185	Alto	60

(1) Sobre peso del betún base

(2) Sobre peso del betún base

(3) Se considera medio el agitador de paletas o vórtice; Para conseguir el nivel Alto se recomienda un dispositivo de cizalla.

Tabla 8. Formulaciones recomendadas para betún con caucho

Equipos de fabricación de betunes con caucho en laboratorio

ANEXO

Existen diversos aparatos y equipos para la fabricación de betunes modificados en laboratorio, desde mezcladores muy sencillos, hasta plantas piloto más sofisticadas que incluyen control computerizado de los principales parámetros de la fabricación.

En este anexo se dan unas pautas generales y se describen varios casos de equipos utilizados frecuentemente para la fabricación de betunes con caucho.

Tipos de mezcladores

Para la modificación de betunes con caucho se pueden emplear dos tipos de mezcladores:

- los que someten a los componentes a un proceso de agitación, más o menos enérgica y,
- los que disponen de un mecanismo de cizalla, que además de mezclar los componentes, corta las partículas de caucho, reduciendo su tamaño

Dado que existen numerosos fabricantes y equipos, la frontera entre un tipo y otro no está siempre clara. Se tendrían por un lado los removedores que con distintos diseños son similares a una hélice, que introducida en el recipiente mueve continuamente una mezcla

de betún y caucho para fomentar su interacción y evitar decantaciones. Estos dispositivos pueden girar, según su diseño y el del tanque, hasta velocidades de unas 1.000 rpm.

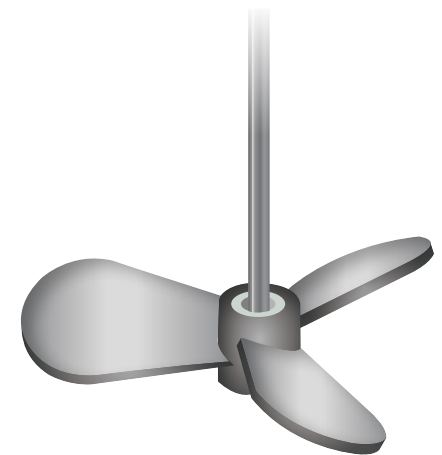


Figura 7. Cabezal de un mezclador de hélice

En el extremo contrario estarían los mezcladores de cizalla que disponen generalmente de una pieza fija (estator) y una parte móvil (rotor) con una pequeña holgura entre ellas, provocando con ello un efecto de succión que obliga a la mezcla de betún y caucho a pasar entre ambas

piezas, produciéndose un efecto de corte muy intenso, que contribuye a disminuir el tamaño de las partículas de caucho e incrementar su superficie específica y a favorecer así la interac-

ción entre el betún y el caucho. En la siguiente figura se observa un cabezal de mezclador con cizalla, y a las etapas a las que el aparato somete a los componentes de la mezcla.

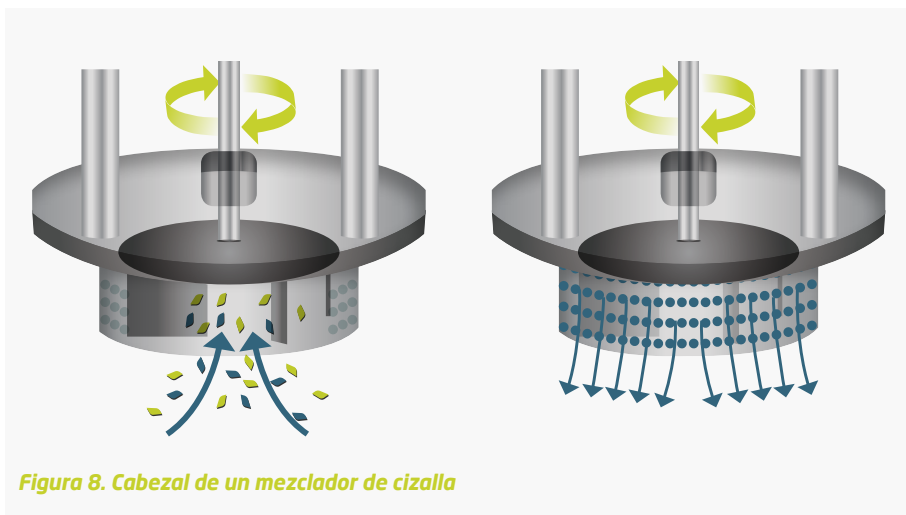


Figura 8. Cabezal de un mezclador de cizalla

Existen diferentes modelos de mezcladores que, dependiendo de la forma del cabezal y de la velocidad de giro seleccionada, pueden actuar únicamente como removedores o bien aportar un efecto de cizalla. Cuando un removedor de hélice se emplea a alta velocidad, en rangos entre 1.000 y 10.000 rpm generan un efecto dinámico que puede cortar las partículas.

A continuación se presentan tres equipos diferentes, que pueden utilizarse en laboratorio para fabricar betunes con caucho.

1. Sistema mezclador de hélice a alta velocidad

Se trata de dispositivos sencillos, que sólo consiguen una agitación continua de la mezcla de betún y caucho. Sin embargo, aumentando la velocidad de giro de algunos de estos dispositivos se consigue una fuerte energía de mezclado que va más allá de la simple agitación, este es el caso de los aparatos provistos de un "propeller" que alcanzan velocidades

de giro de hasta 10.000 rpm. Son como el mostrado en la **Figura 9**.



Figura 9. Mezclador de laboratorio con rango de velocidades de 500 a 10.000 rpm

La fabricación del betún con caucho bajo este esquema se realiza en amasadas sucesivas, introduciendo el accesorio en un recipiente metálico que a su vez está colocado en un baño termostático de aceite. El conjunto quedaría dispuesto como se ve en la **figura 10**:



Figura 10. Disposición de un equipo básico de laboratorio para la fabricación de betunes con caucho

Es muy importante garantizar que el contacto de la muestra del betún con el aire sea el menor posible para minimizar la oxidación del betún durante su fabricación. Esto se puede conseguir mediante el empleo de una tapa perforada que permita introducir el cabezal del mezclador, de modo que durante los 60 minutos que dura aproximadamente la operación, el contacto con el aire esté muy limitado.

Como parámetros de fabricación habrá de seleccionarse la temperatura actuando sobre el termostato del baño de aceite, y la velocidad de giro del mezclador en el selector con que a tal efecto este provisto el aparato.

La operación se desarrolla en dos fases: la primera a alta velocidad (3.000-10.000 rpm) para conseguir un mezclado muy energético, seguida de una segunda fase de digestión, en la que el aparato puede funcionar a baja velocidad (500-1.000 rpm) que evite las sedimentaciones y favorezca la interacción del betún y el caucho. La primera fase dura unos 15 minutos aproximadamente, mientras que la segunda fase duraría unos 45 minutos.

Con el mismo equipo de laboratorio, y atendiendo a conseguir la mayor similitud posible con algunos equipos industriales en los que el mezclador también actúa como tanque digestor, se podría trabajar a alta velocidad durante los 60 minutos. Se trata, en cualquier caso de conseguir en laboratorio unas condiciones lo más similares posible a las de la operación a escala industrial.

Por lo general la mezcla se lleva a cabo en un recipiente metálico de 1 litro de capacidad, que sin embargo no puede llenarse completamente con el betún, ya que al introducir el cabezal del mezclador rebosaría. Además es preciso dejar un espacio entre este y la tapa, para facilitar su manejo, con todo ello la muestra debe prepararse por amasadas que por experiencia se recomienda que no superen los 650 g de betún con caucho. Tampoco es conveniente fabricar amasadas de tamaño mucho menor, puesto que el cabezal no quedaría cubierto.

En cualquier caso se comprobará visualmente que con la capacidad del recipiente elegido y las características del mezclador que se emplea, no queden en la periferia del recipiente "zonas muertas", que reciban menos energía de agitación que el resto de la muestra.

2. Sistema de mezclador de laboratorio con cizalla

Se trata de mezcladores con un cabezal provisto de un dispositivo de cizalla. La operación es similar a la alternativa anterior, excepto por el hecho de que las partículas se someten a un corte más efectivo. La **figura 11** muestra un aparato de este tipo y el detalle de su cabezal:



Figura 11. Mezclador de laboratorio con cizalla

Como en el caso anterior, se precisa un recipiente para contener la muestra, y un baño termostático de aceite para controlar la temperatura durante la fabricación. También se puede seleccionar la velocidad de giro, que puede alcanzar hasta 8.000 rpm.

Estos equipos pueden fabricar el producto bien en una única fase, a alta velocidad (4.000-8.000 rpm) o en dos fases, la primera a alta velocidad y en una segunda fase una velocidad menor (500-1.000 rpm). La decisión de trabajar en una o dos fases dependerá de la configuración del equipo industrial. En cualquier caso, la muestra deberá permanecer en agitación y a alta temperatura durante 60 min hasta que se complete la digestión.

Asimismo es preciso evitar en lo posible el contacto con el aire para minimizar la oxidación del betún durante la fabricación.

La amasada en este tipo de mezcladores también es de unos 650 g, fabricada en un recipiente metálico de 1 litro de capacidad.

3. Planta piloto de fabricación de betunes con caucho

Asimismo existen plantas piloto de laboratorio para la fabricación de betunes con caucho que incorporan un sistema de cizalla. Dadas las dificultades que presenta el caucho para incorporarse en el betún, es frecuente que estos mezcladores trabajen en línea con recirculación, por lo que se precisa un depósito adicional. La siguiente figura presenta uno de estos modelos en los que se combina un sistema en línea con cizalla por el que circula una y otra vez el contenido del depósito superior, que permanece en constante movimiento gracias a un mezclador de hélice.



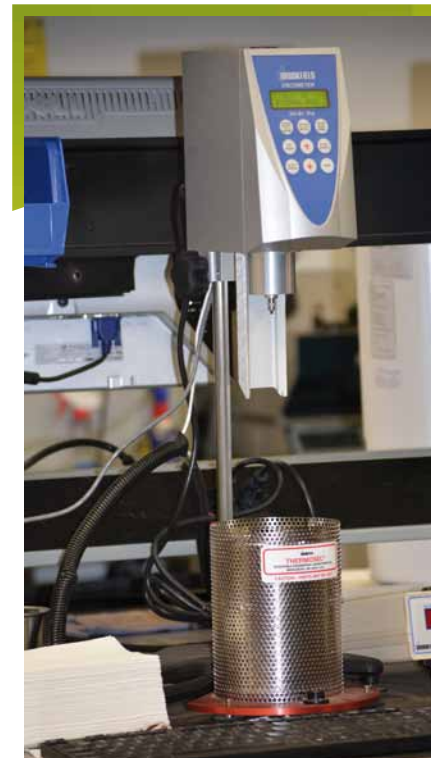
Figura 12. Planta piloto para fabricación de betún-caucho

Estos dispositivos ofrecen la ventaja de una alta tecnificación con control directo de los parámetros más importantes de la fabricación. Es habitual que precisen de una caldera externa para mantener todo el sistema a la

temperatura adecuada a través del encausado térmico que recubre sus principales elementos.

También se cuentan entre sus ventajas que a través de sus circuitos, la muestra no está en contacto con el aire, aunque hay que tener las mismas precauciones que se han explicado en las alternativas anteriores, en su depósito superior.

Entre sus inconvenientes habría que señalar que su limpieza rutinaria puede ser más difícil que en los casos 1 y 2, en los que el recipiente se desecha después de cada amasada, y no existen circuitos por los que fluya el betún con caucho que por consiguiente nunca sufrirán obstrucciones ni precisarán limpieza. Además, el precio de esta última alternativa es muy superior al de los dos primeros equipos que se han descrito.



Recomendaciones sobre el equipo a utilizar en laboratorio

No resulta fácil hacer una recomendación concreta sobre el equipo a emplear en laboratorio, sin embargo sí pueden darse algunas directrices a tener en cuenta a la hora de tomar una decisión al respecto:

1. Para una mayor reproducibilidad del proceso industrial, el equipo de laboratorio debería tener un principio de funcionamiento (por amasadas o en línea, con o sin cizalla) en consonancia con los equipos industriales que se vayan a emplear.
2. En la mayor parte de los betunes con caucho suele ser suficiente el mezclador de hélice, siempre que su diseño le permita funcionar a velocidades medias y altas, por encima de las 3.000 rpm.
3. Cuando se empleen polímeros junto con el caucho es conveniente emplear dispositivos de cizalla, o al menos mezcladores de hélice capaces de funcionar a velocidad de giro alta, superiores a las 8.000 rpm.
4. La decisión también debe estar basada en el uso que se le vaya a dar al aparato: para usos moderados pueden ser suficientes los equipos mostrados en las alternativas 1 y 2. Su precio es del orden de 4 veces inferior al de una planta piloto y su limpieza rutinaria más sencilla.

Equipos para la fabricación a escala industrial de betunes con caucho

ANEXO 2



Los equipos industriales para la fabricación de betunes con caucho deben tener, desde el punto de vista funcional, dos unidades bien definidas: por un lado el mezclador y por otro, el tanque de digestión. En el primero se logra la mezcla entre el betún y el caucho e incluso la disminución del tamaño de partícula, en el caso de que el mezclador esté provisto de un efecto cizalla. En el tanque de digestión, se completa la interacción entre las partículas de caucho y el betún a alta temperatura gracias a la existencia de un sistema removeedor del que debe estar necesariamente dotado.

A partir de este planteamiento básico pueden aparecer distintas configuraciones: mezcladores con dispositivo de cizalla o sin él, mezclador separado del digestor o agrupamiento de ambas funciones en el mismo tanque, e incluso el empleo de tanques auxiliares de almacenamiento, para disponer en obra de una mayor capacidad de regulación del suministro de betún con caucho, ya que en ellos puede almacenarse el betún con caucho hasta que se demande desde la planta de fabricación de mezclas asfálticas.

Se explican a continuación los tipos de mezclador más usuales existentes en el mercado y, a través de un estudio de casos, se muestran varias configuraciones de una unidad de fabricación de betún con caucho, así como su esquema de implantación en la central de mezclas bituminosas.

Mezclador de paletas

Para betunes con bajos contenidos de caucho, por debajo del 10%, pueden ser suficientes

mezcladores de paletas o tipo hélice sinfín, que mantienen agitado (< 1.000 rpm) el betún con el caucho en suspensión durante el tiempo necesario para conseguir la digestión, ya que el tanque en el que se instalan cumple simultáneamente las funciones de mezclador y digestor. Con esquemas tan sencillos, el caucho debería ser fino, con tamaño máximo de 0,5 mm. Además será necesario en muchos casos prolongar el tiempo de fabricación para asegurar la digestión, más allá de los 60 minutos que se manejan habitualmente cuando el sistema de mezclado es más enérgico.

Este sistema carece completamente de cizallamiento y se encuentra sólo en dispositivos para pequeñas producciones. Su uso no está recomendado, tanto por la escasa energía de agitación como por su baja producción. Un ejemplo de árbol de paletas se muestra en la *figura 13*.



Figura 13. Mezclador de paletas

Mezcladores con disco Cowles

Este tipo de mezcladores gracias a su diseño y velocidad de rotación (>3.000 rpm) transmiten una alta energía de mezclado, incluso se produce un cierto efecto cizalla. En la figura 14 se observa un disco tipo Cowles, y su posición en un mezclador de betún.

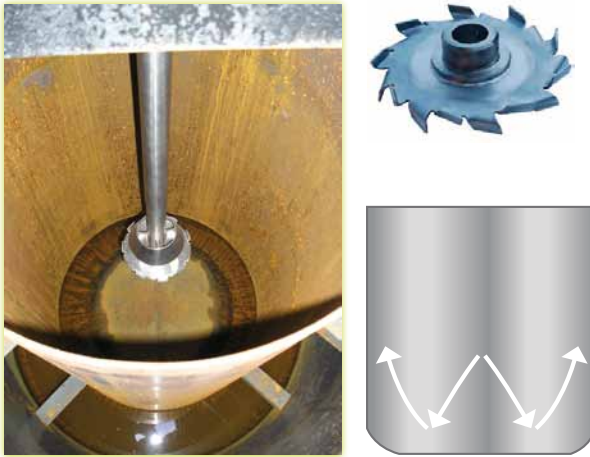


Figura 14. Mezclador con disco Cowles

Este tipo de mezclador produce un vórtice que obliga a la mezcla de betún y caucho a pasar una y otra vez por el disco Cowles, completándose progresivamente la reducción de tamaño de las partículas de caucho y la homogeneización progresiva de la mezcla.

Se instala tanto en mezcladores propiamente dichos como en tanques en los que tiene lugar además de la mezcla también la digestión. La producción horaria es alta y su mantenimiento es sencillo. Su uso está muy extendido en la fabricación de betunes con caucho.

Mezcladores con sistema de cizallamiento a través de rotor-estator

Es sin duda el mezclador más evolucionado, que somete además a la mezcla de betún y caucho a un alto esfuerzo gracias a la alta velocidad de cizallamiento. Entre la parte fija y la

móvil existe una pequeña holgura por la que circula la mezcla.

Los álabes cortan las partículas de caucho, hasta que su tamaño se reduce por debajo del de la holgura existente. Este tipo de mezcladores conocidos con el nombre de Polymill, lejos de instalarse en un tanque, trabajan en línea, a menudo recirculando el betún con caucho del tanque que a su vez suele contar con un removedor de paletas. Una imagen de este tipo de mezclador se puede observar en la figura 15.

Los mezcladores constituyen la pieza clave de la unidad de fabricación de betunes con caucho, que en su conjunto puede adoptar diferentes configuraciones.

Configuraciones más habituales

A través de un estudio de casos a continuación se muestran las configuraciones más habituales.

“ El uso de los mezcladores con disco cowles está muy extendido gracias a su producción horaria alta y su mantenimiento sencillo.”



Figura 15. Mezclador tipo rotor-estator con cizalla

Configuración 1. Mezclador de pequeño volumen y tanque de digestión

En este caso las dos funciones necesarias para llevar a cabo la fabricación están separadas:

En primer lugar un mezclado energético llevado a cabo en un mezclador provisto generalmente de un disco Cowles, y desde éste, el producto pasa a un tanque digestor de mayores dimensiones donde el betún con caucho permanece en agitación con un árbol de paletas o un agitador helicoidal sinfín, hasta completar los 60 minutos de digestión necesarios.

El equipo se completa con tolvas para el almacenamiento y dosificación del caucho para los eventuales polímeros o aditivos, bombas de impulsión e incluso una caldera para el caso de equipos móviles, que le permita funcionar de modo autónomo, sin que sea preciso conectarse con el circuito de aceite térmico de la planta de fabricación de mezclas asfálticas.

La figura 16 muestra un equipo de este tipo que en este caso es móvil, por lo que se desplaza hasta la planta de fabricación de mezclas para fabricar y suministrar el betún con caucho, y se retira una vez acabada la obra. En otros casos el equipo con idéntica configuración es fijo y permanece siempre en la misma planta de mezclas asfálticas.



Figura 16. Unidad de fabricación con mezclador y tanque digestor

En cuanto a su integración en la central de mezclas asfálticas, este tipo de equipos toma betún puro de los tanques de almacenamiento, lo mezcla con el caucho y lo dispensa a demanda de la central de mezclas gracias a una bomba de impulsión manejada desde el cuadro de control de la central. En la **figura 17** se observa un esquema de implantación, en el que se ve cómo la instalación de un equipo de este tipo no afecta sustancialmente

a ninguno de los elementos de la central de mezclas.

El caucho suele servirse en big-bags, de capacidad aproximada de 1 tonelada (2 m³) que se descargan en la tolva de la unidad de mezclado desde la que se dosifica el caucho (**figura 18**). En instalaciones fijas también se puede suministrar a granel y ser almacenado en silos verticales, provistos de dosificador.

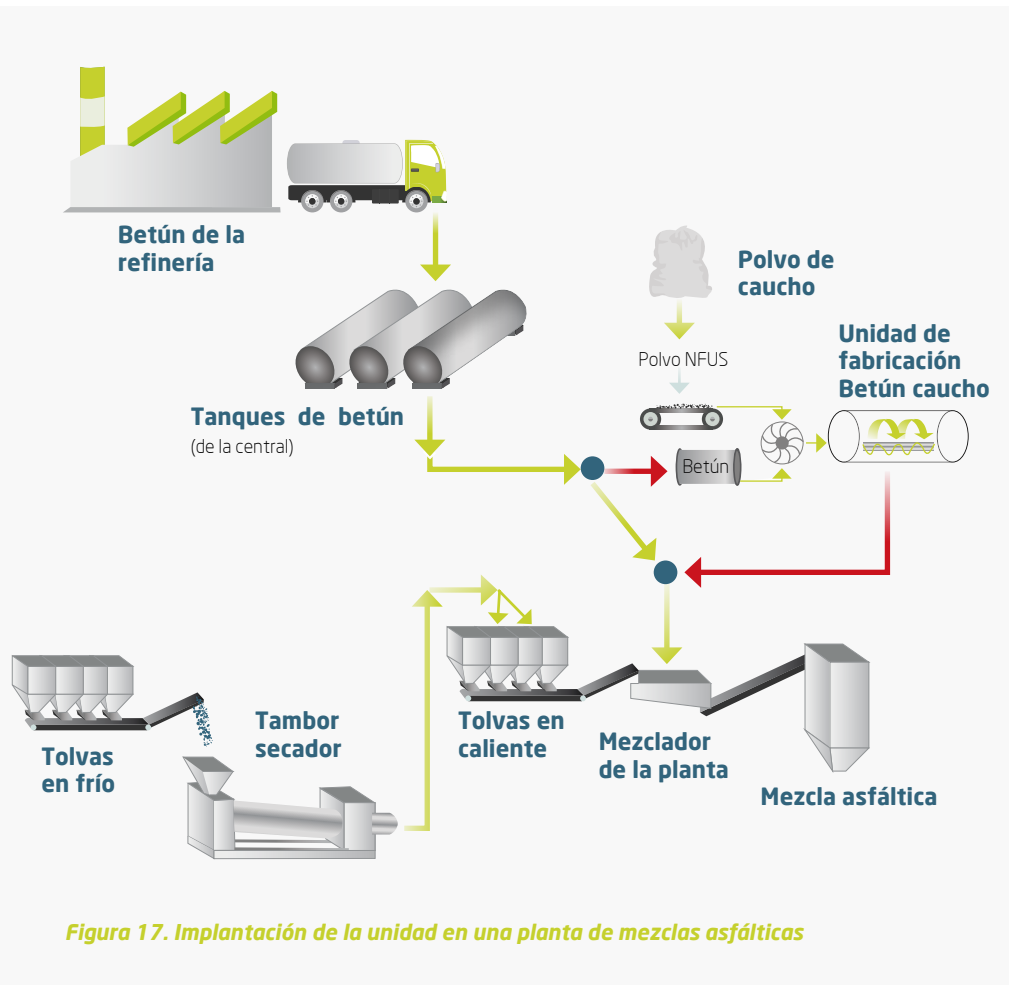


Figura 18. Detalle de la carga de caucho en las tolvas de la unidad

En cuanto a la producción horaria (t/h), en estos equipos coincide con la capacidad del tanque de digestión. Si se dispone de un tan-

que de digestión de 15 toneladas, ésta será la producción horaria de betún con caucho del equipo.

Configuración 2. Tanques gemelos mezcladores y digestores

En este caso, el mezclado y la digestión se completan en el propio tanque, si bien para tener una mayor operatividad y producción horaria, el esquema se duplica existiendo dos tanques gemelos de modo que mientras uno de ellos suministra el betún que ya ha cumplido los 60 minutos de digestión, el segundo tanque está fabricando una nueva amasada, de tal manera que alternativamente uno de los tanques fabrica y el otro sirve el betún a la central de mezclas asfálticas. Se observa un esquema en la **figura 19** y también en la **figura 6 de esta guía**.

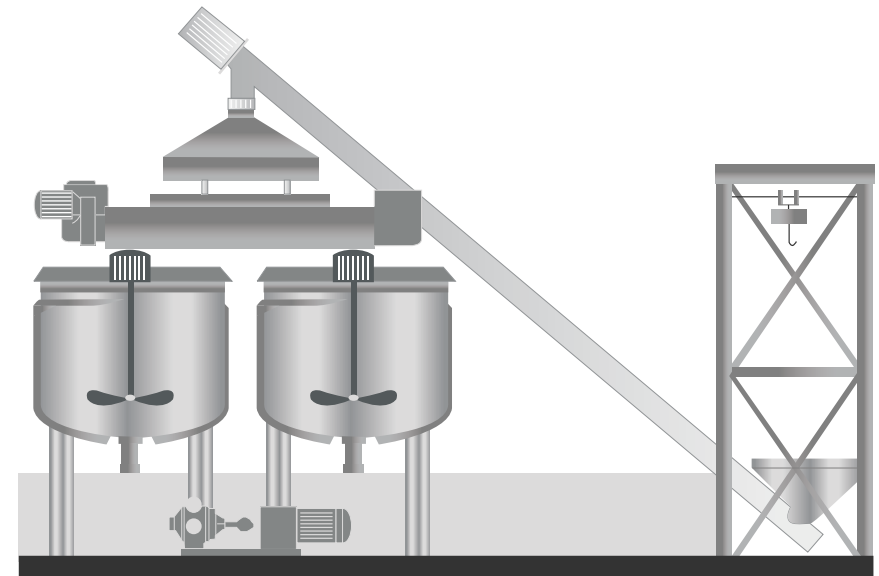


Figura 19. Esquema de una unidad de tanques gemelos



Requisitos mínimos de una unidad de fabricación de betunes con caucho

Para que cualquiera de los tipos de unidades de fabricación de betún con caucho anteriores pueda garantizar la calidad y homogeneidad del producto, resulta imprescindible poder dosificarlo, mezclarlo y permitir el control de calidad rutinario del mismo. Se considera que al menos debe estar equipado con los siguientes elementos:

- Dispositivos de dosificación ponderal para el caucho y el polímero.
- Dispositivos de dosificación ponderal/volumétrico para el betún.
- Termómetros en:
 - » El punto de entrada del betún base
 - » Interior del mezclador
 - » Interior del tanque digestor, si es distinto del mezclador
 - » El punto de salida del betún con caucho hacia la central de mezclas
- Viscosímetros en:
 - » El tanque digestor
 - » En el punto de salida del betún con caucho (existen viscosímetros en línea)
- Bocas para toma de muestras en la salida del digestor

Tanques auxiliares de almacenamiento

Aunque cualquier unidad de fabricación de betunes con caucho debe garantizar que el producto alcanza un grado de digestión suficiente, lo que sucede transcurridos 60 minutos, incluyendo en este tiempo tanto el mezclado como la digestión, puede ser conveniente por motivos logísticos disponer de tanques auxiliares para el almacenamiento del betún con caucho ya fabricado. Estos tanques no deben confundirse con el tanque de digestión de la unidad de betún con caucho.

Cuando se dispone de tanques auxiliares, la unidad de fabricación de betún con caucho suministra el producto al tanque de almacenamiento en lugar de hacerlo directamente a la báscula de la central de mezclas asfálticas para su descarga en el mezclador.

Las ventajas de estos tanques auxiliares son, la disponibilidad de una mayor capacidad de regulación del suministro de betún con caucho a la central de fabricación de mezclas y la fácil solución a cualquier problema que surja en el equipo de fabricación de betún con caucho gracias al betún almacenado en los tanques auxiliares.

Para el cumplimiento de las exigencias de almacenamiento, estos tanques auxiliares deben disponer de un sistema de calefacción, que permita mantener la temperatura del producto durante horas o días y de un elemento removedor que evite las sedimentaciones.



Figura 20. Tanques auxiliares de almacenamiento

Los tanques suelen estar provistos con un disco Cowles y adicionalmente, dependiendo de su diseño, con árbol de paletas.

Al igual que en la configuración 1, este tipo de equipos pueden ser fijos o móviles y su implantación en la central de mezclas asfálticas es también similar. Su capacidad horaria (t/h) suele estar en torno al 150% de la capacidad de un tanque y depende en último término de la velocidad de llenado y otros aspectos del diseño del ciclo de producción que vendrán definidos por el fabricante del equipo y afectados por las condiciones de suministro a la obra.

Configuración 3. Equipos de tanque único con polymill en el conducto de recirculación

Este esquema, propio de las plantas tradicionales de modificación de betunes con polímeros, consiste en un tanque al que se incorporan el betún y el caucho que permanecen en constan-

te movimiento mediante un árbol de paletas. El contenido del tanque se hace recircular a través de un conducto en el que se ha insertado un mezclador del tipo rotor-estator de alta velocidad de cizalla. La recirculación continúa hasta que el producto ha alcanzado la homogeneidad deseada, momento en que puede servirse para comenzar el ciclo de nuevo.

El equipo es el mostrado en la figura 5 de esta Guía, dónde se observa cómo el mezclador está insertado en la línea de recirculación.

Esta configuración es propia de plantas fijas. Su producción horaria está en torno al tonelaje del tanque, puesto que se fabricará una amasada cada 60 minutos, para asegurar la digestión. No obstante, la producción horaria podría incrementarse en el caso de que el producto vaya a ser transportado hasta la central de mezclas asfálticas dónde se va a consumir, siendo en este caso el tiempo de transporte el que sirve para completar la digestión.

Elección de la unidad de fabricación de betún con caucho

Para la selección del equipo más adecuado a las necesidades de cada central de mezclas, el usuario debe tener en cuenta los siguientes criterios básicos:

- El mezclador de paletas suministra poca energía de mezclado y su aplicación más apropiada es su empleo como removedor, para mantener en movimiento el producto mientras completa la digestión. Los equipos dotados sólo con este dispositivo de mezclado resultan del todo inapropiados si se desea emplear polímero junto con el caucho.
 - Los equipos provistos de un mezclador y un digestor o con dos tanques mezcladores digestores gemelos, son los más empleados para la fabricación de betunes con caucho. Pueden recomendarse indistintamente, y permiten fabricar tanto betunes con caucho como los modificados también con polímero. Son válidos en la mayoría de los casos, no obstante, son precisas unas pruebas iniciales para determinar si en el caso de uso de polímero, éste debe emplearse en polvo, o el sistema es capaz de integrar los pellets o gránulos de polímero en el betún.
 - Los equipos dotados con molino de cizalla constituyen el escalón más alto en equipamiento de mezclado, consiguen una gran homogeneidad, puesto que son capaces de recircular el producto las veces necesarias para hacer que el tamaño de la partícula de caucho disminuya. Además en caso de trabajar con polímeros, éstos pueden utilizarse en forma de pellets o gránulos.
- En cualquiera de los casos anteriores deberá tenerse muy en cuenta:
 - » La producción horaria del equipo, para no limitar la de la central de mezclas asfálticas.
 - » Si el equipo es autónomo o precisa de un suministro de aceite térmico o electricidad desde la central de mezclas asfálticas.
 - » El espacio que ocupe en la central de mezclas asfálticas y cómo puede afectar su implantación a la operatividad de la central: carga y descarga de los camiones que transportan la mezcla asfáltica, acceso del suministrador de betunes puros a los tanques de almacenamiento de la central, etc.



SIGNUS

SISTEMA INTEGRADO DE GESTIÓN DE NEUMÁTICOS USADOS

SIGNUS Ecovalor, S.L.

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

www.signus.es

Síguenos en:

