

**BETUNES MODIFICADOS
CON POLIETILENO
RECICLADO, PROCEDENTE
DEL “CONTENEDOR
AMARILLO”, ESTABLES
AL ALMACENAMIENTO**

SANTIAGO GIL REDONDO
DITECPESA

ALBERTO CALDEIRO JIMÉNEZ
CICLOPLAST

BETUNES MODIFICADOS CON POLIETILENO RECICLADO, PROCEDENTE DEL “CONTENEDOR AMARILLO”, ESTABLES AL ALMACENAMIENTO

RESUMEN

El reciclado de los plásticos en España va destinado a diversas aplicaciones finales como tuberías, bolsas de basura y mobiliario urbano, algunas de las cuales están llegando a su nivel de saturación, lo cual hace necesario la búsqueda de nuevos mercados finales con el máximo valor añadido.

El uso de plástico reciclado, polietileno en particular, como componente en mezclas asfálticas para carreteras representa un mercado de aplicación de indudable interés.

El empleo de polietileno en la modificación de betunes presenta la dificultad de que éste tiene una estructura química inerte, cuando se intenta ligar a otros compuestos como el betún, lo cual dificulta la obtención de una mezcla estable al almacenamiento. El polietileno confiere muy buenas propiedades a los betunes, pero es incompatible con ellos, dando lugar a una separación de fases, haciendo que tenga que ser usado en el acto inmediatamente después de su fabricación.

Las investigaciones existentes hasta la fecha para la estabilización de distintos polietilenos en el betún son procesos costosos que requieren el uso de recursos técnicos especiales y complejos sistemas químicos que han imposibilitado su aplicación práctica.

El presente estudio muestra una nueva formulación de betún modificado con polietileno reciclado, que

es **estable al almacenamiento** y que presenta **mejores propiedades mecánicas y reológicas** que los betunes convencionales. Dicha formulación está en proceso de obtención de patente. Nº de solicitud: P201131784.

El polietileno reciclado empleado en esta investigación procede de la fracción denominada film, de la recogida selectiva de los plásticos en los contenedores amarillos, para la cual los mercados finales de aplicación no son tan variados como para las fracciones de plásticos procedentes de envases rígidos como el PEAD y el PET, lo cual hace más interesante su empleo al ofrecer una salida de mercado de alto valor añadido para un flujo problemático que, en principio, es más problemático que los mencionados anteriormente.

Para evaluar la estabilidad de los betunes modificados desarrollados se ha empleado la norma UNE-EN 13399, realizando medidas de temperaturas de reblandecimiento y reológicas.

De los ensayos reológicos realizados para todas las formulaciones estudiadas podemos destacar que se obtienen unos mayores valores del módulo complejo $[G^*]$ y unos menores valores de ángulo de desfase δ , en todo el intervalo de temperaturas estudiado, en comparación con los valores del betún base de partida; lo cual indica que se van a dar lugar a mezclas asfálticas más resistentes a sufrir deformaciones plásticas, tal y como se ha comprobado posteriormente.

En definitiva, como resultado de la investigación conjunta llevada a cabo por Ditecpesa y Cicloplast, se dispone de una formulación idónea para su empleo en la fabricación de mezclas asfálticas.

En este proyecto de investigación se ha contado, además, con la colaboración de Ecoembes, PlasticEurope y la Universidad de Alcalá.

INTRODUCCIÓN

El gran aumento del volumen de tráfico y la creciente importancia de la protección medioambiental, ha exigido el desarrollo y creación de materiales para construcción de carreteras cada vez más innovadores y sostenibles.

Habitualmente, la incorporación de materiales poliméricos a los betunes mejora sus propiedades mecánicas y reológicas. Así, un diseño estudiado de la modificación de los betunes con materiales poliméricos conduce a una mejora en propiedades tales como adhesión, resistencia a las deformaciones plásticas, resistencia al envejecimiento, resistencia a la fatiga, etc. Los polímeros que usualmente se emplean para la modificación de los betunes son polímeros de estireno-butadieno-estireno (SBS), caucho de butadieno-estireno (SBR) y etileno vinil acetato (EVA), aunque últimamente se está empleando también polvo de neumático, obtenido a partir de neumáticos reciclados (NFU).

La compatibilidad entre el betún y el polímero es un factor muy importante para asegurar un buen comportamiento en la mezcla asfáltica. El polietileno confiere muy buenas propiedades a los betunes, pero tiene una estructura química inerte, cuando se intenta ligar a otros compuestos como el betún, lo cual dificulta la obtención de una mezcla estable, dando lugar a una separación de fases. Por lo que es muy difícil encontrar una fórmula capaz de estabilizar el polímero en el betún de forma permanente, y por tanto obtener un producto que sea estable al almacenamiento [1].

Se conoce las bondades que aporta el polietileno a la mezcla asfáltica ya que se han construido carreteras usando betún modificado con polietileno

reciclado [2] pero fabricado "in situ", es decir, no fue necesario almacenar ni transportar ese betún modificado. No se conoce ningún tramo de carretera construido con betún modificado con polietileno reciclado, estable al almacenamiento.

Existen procedimientos para la estabilización de distintos polietilenos en el betún [3], pero estos son procesos costosos que requieren el uso de recursos técnicos especiales y complejos sistemas químicos que han imposibilitado su aplicación práctica. Por lo tanto, sería deseable disponer de betunes que sean estables al almacenamiento, evitando así la necesidad de fabricarlos in situ.

El polietileno reciclado utilizado en este desarrollo procede del consumo de plásticos en los hogares españoles. Estos son depositados selectivamente por el consumidor en contenedores diferenciados y, posteriormente, clasificados por familias de polímeros plásticos como paso previo a su reciclado.

Concretamente, y en lo que se refiere a esta investigación, la fracción de polímeros plásticos considerada es la Polietileno de Baja Densidad (PEBD).

Para este proceso de purificación del flujo de plásticos recogidos selectivamente, se dispone de una infraestructura de 89 plantas de selección repartidas a lo largo de la geografía nacional y que disponen de la última tecnología de separación automática mediante tecnología de infrarrojos y visión artificial. Con esto, se consigue a lo largo del proceso generar fracciones de plásticos puros que cumplan con las especificaciones de calidad establecidas a tal efecto. Estas especificaciones, conocidas como Especificaciones Técnicas de los materiales recuperados (ETMR), aseguran la calidad necesaria que requiere el proceso de reciclado posterior de estas fracciones. Dentro de éstas se consideran factores tales como definición del material admitido, riqueza mínima necesaria del material en el flujo de entrada (superior al 90%), humedad (nunca superior al 5% en peso), materiales plásticos distintos del PEBD (máximo de 9%), presencia de materiales que imposibiliten el proceso de reciclado posterior (nunca por encima del 0.05%) así como unas determinadas condiciones de acondicionamiento y presentación del material.

Estas ETMR han sido establecidas por decisión unánime de todos los agentes responsables de la gestión de este flujo de materiales plásticos. Así mismo, éstas son controladas y auditadas para garantizar su estricto cumplimiento.

Posteriormente, estos materiales plásticos previamente seleccionados, únicamente pueden ser enviados a los recicladores homologados por el Sistema del Punto Verde autorizado por la Administración Pública correspondiente. La homologación del reciclador establece su idoneidad técnica, económica y administrativa, aspectos todos ellos sujetos a una auditoría técnica y de procedimientos.

Una vez en las instalaciones del reciclador, el material plástico procedente de la fracción PEBD es sometida a diferentes procesos de limpieza exhaustiva, trituración secado y procesado hasta la obtención del producto considerado para la formulación en la posterior modificación con el betún denominado "granza de polietileno reciclado".

Será esta granza, es decir, un producto ya elaborado, la que se incorporará al proceso de modificación del betún.

RESULTADOS

OBTENCIÓN DE UNA FÓRMULA ESTABLE AL ALMACENAMIENTO

El mayor esfuerzo empleado en este estudio se centró en obtener una mezcla estable al almacenamiento que incorporase el polietileno reciclado en el betún, que como se ha explicado anteriormente es una tarea muy compleja debido a que el polietileno es un compuesto muy inerte.

Tras realizar un alto número de intentos en el laboratorio se desarrollaron varias fórmulas completamente homogéneas y estables al almacenamiento. En esta parte del proyecto ha participado la "planta Piloto de Química Fina" de la Universidad de Alcalá.

Además del aspecto técnico, que se abordará a continuación, cabe destacar que las formulaciones desarrolladas son competitivas económicamente hablando respecto a las alternativas que el mercado dispone actualmente.

Para evaluar cuándo una mezcla es estable o no, se realizó el Ensayo de Temperatura al Reblandecimiento, de las fracciones Superior e Inferior, una

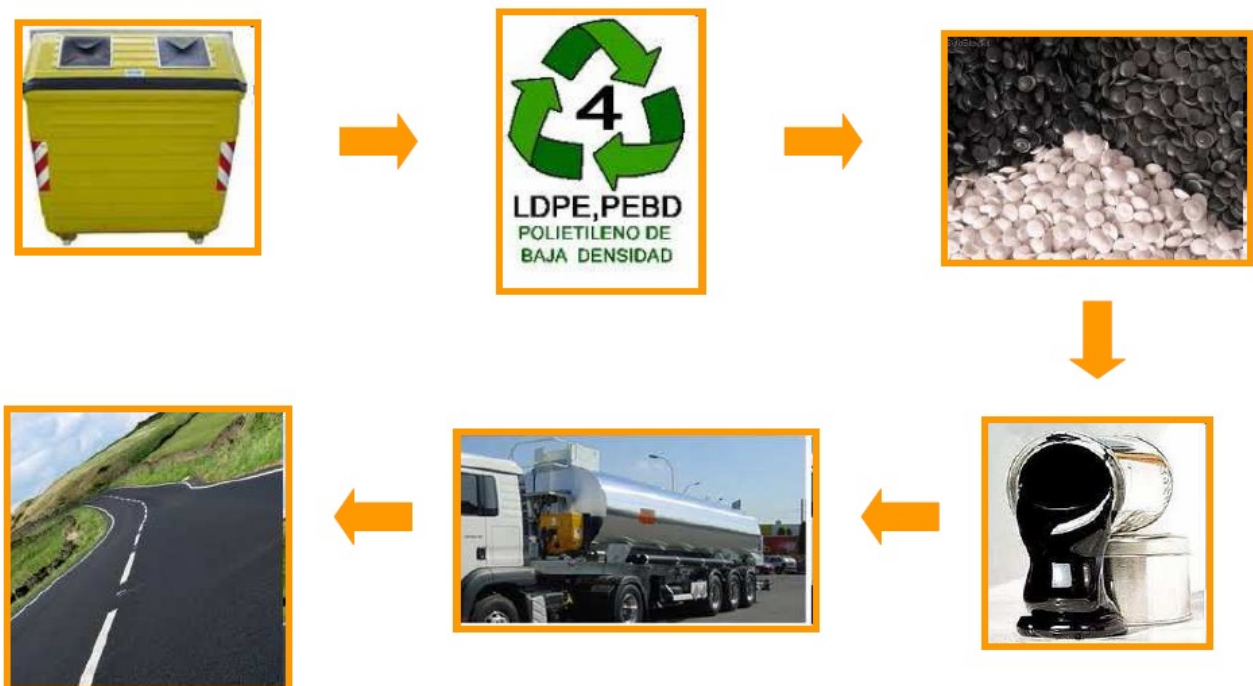


Figura 1. Ciclo del reciclado del polietileno hasta su empleo en carretera.

vez que la mezcla había permanecido almacenada durante 48 h a 165°C, tal y como indica la norma EN 13399. Se consideró que la mezcla era estable cuando la diferencia entre las temperaturas de reblandecimiento de las fracciones superior e inferior era menor o igual que 2 °C,

A continuación, la tabla 1 muestra los resultados obtenidos:

Tabla 1. Medidas de temperaturas de reblandecimiento para comprobar la estabilidad de los ligantes.

Formulación	Temperatura de reblandecimiento			
	Polietileno total (PEt)	fracción superior	fracción inferior	incremento
	%	°C	°C	°C
3	53,5	55,4	-1,9	
6	58,8	59,9	-1,1	
6	57,1	58,9	-1,8	
6,5	60,6	59,8	0,8	
7	59,1	61,1	-2	
8	61,6	61,2	0,4	
6,18	60,5	59,3	1,2	

Como se puede observar se desarrollaron fórmulas con distintos porcentajes de polietileno donde la diferencia de Tª de reblandecimiento fue inferior a 2 °C, cuando la especificaciones exigen que este valor sea menor que 5 °C. Luego se validaron distintas fórmulas que empleó polietileno reciclado que son estables al almacenamiento.

No obstante, además de verificar la estabilidad de estos ligantes realizando mediciones de Tª de reblandecimiento, se realizaron, para todas las formulaciones, distintas medidas reológicas de las fracciones superior e inferior. La figura 2 muestra uno de estos ensayos realizados para una formulación en particular. Como se puede ver en este gráfico los valores de módulo complejo [G*] y ángulo de desfase δ, son casi idénticos en las medidas realizadas en la fracción superior, inferior y total (antes de la separación de las fracciones y después de agitar la mezcla).

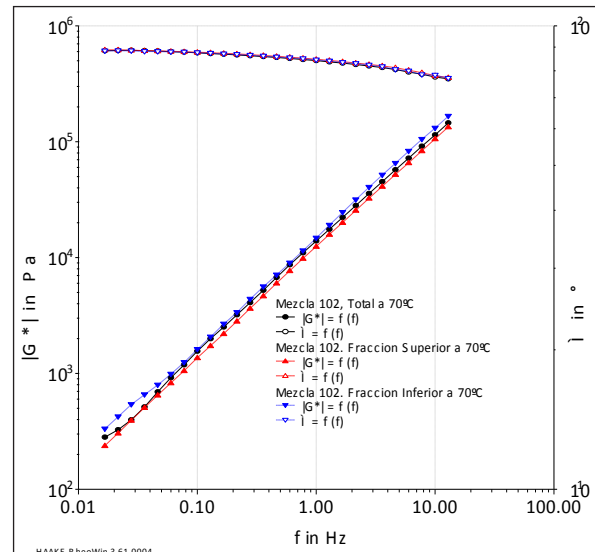


Figura 2. Barrido de Frecuencia a una Temperatura fija de 70°C para un betún modificado con polietileno estable al almacenamiento.

La estabilidad demostrada en estos ensayos, se puso en evidencia, cuando se manipularon estos ligantes en la realización de diversos ensayos y en la fabricación de las mezclas asfálticas estudiadas. Pese a someter a estos ligantes a varios procesos de calentamiento y enfriamiento no se observó la más mínima inestabilidad del polietileno en el betún.

CARACTERÍSTICAS DE LOS BETUNES MODIFICADOS CON POLIETILENO RECICLADO

A los ligantes desarrollados se les ha realizado medidas de las características esenciales, tal y como muestra la tabla 2. Pese a que el polietileno no es un material elastómero confiere al betún cierta recuperación elástica, mayor del 15%, y temperaturas de reblandecimiento superiores a los 58 °C. Estos valores son los exigidos para un BM-3a en estos ensayos.

Además de estos ensayos esenciales, se han realizado ensayos reológicos a estos ligantes, para poder evaluar como se comportan cuando son expuestos a distintas temperaturas de servicio y distintos esfuerzos de cizalla.

La figura 3 representa los valores de módulo complejo [G*] y ángulo de desfase δ, en un barrido de temperatura, para distintas formulaciones con polietileno reciclado, tomando como referencia un

Tabla 2. Características esenciales de los betunes modificados con polietileno reciclado.

Características esenciales		Método	Unidad	Valor
Penetración a 25°C		EN 1426	0.1 mm	25-55
Punto de reblandecimiento		EN 1427	°C	> 58
Durabilidad. Resistencia al endurecimiento	Penetración retenida	EN 12607-1	%	> 60
	Incremento de punto de reblandecimiento		°C	< 8
	Cambio de masa		%	< 0,8
Recuperación elástica	25°C	EN 13398	%	> 15
	10°C		%	> 15
Estabilidad al almacenamiento	Diferencia Tª reblandec.	EN 13399	°C	< 2,0
	Diferencia de penetración		0.1 mm	< 5

betún base de partida (BB, curvas en negro) que corresponde a un B 50/70. Como se puede observar todas las formulaciones con polietileno presentan unos valores de $[G^*]$ mayores que el betún de referencia, es decir presentan una mayor oposición a ser deformados. Además los valores del ángulo de desfase δ , son menores para estas formulaciones que para el betún B 50/70, lo que indica que éstas tienen una mayor componente elástica (mayor proporción de deformación inducida que se vuelve a recuperar cuando cesa la carga).

Este mismo comportamiento lo volvemos a encontrar cuando realizamos un barrido de frecuencias (figura 4). Las formulaciones que incorporan po-

lietileno reciclado presentan unos valores de $[G^*]$ mayores, mayor rigidez, y unos valores de ángulo de desfase δ , menores, mayor elasticidad, que los obtenidos para un betún convencional (nuevamente representado en negro).

La tabla 3 muestra algunos parámetros utilizados para evaluar la resistencia de huella por rodera que pueden presentar los betunes asfálticos. Estos valores son también obtenidos a partir de medidas reológicas.

El parámetro más utilizado para calcular si un betún posee resistencia a la formación de roderas, es el parámetro SHRP de $[G^*]/\text{sen}\delta$, que cuando es superior a 1kPa a la temperatura de medida, se conside-

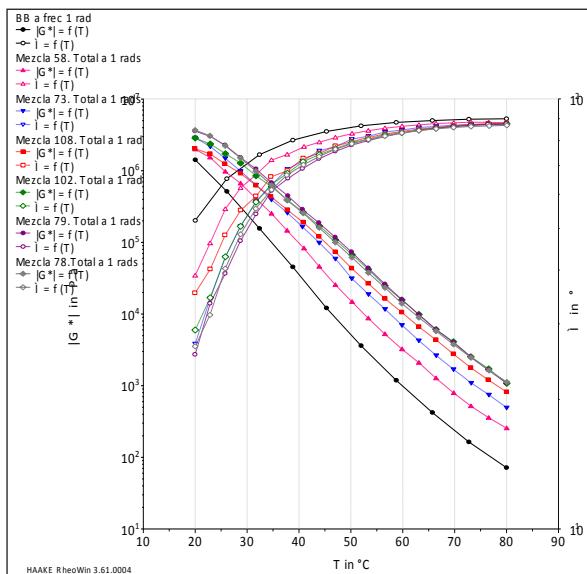


Figura 3. Barrido de Temperatura a frecuencia fija de 1 rad/s, para varios betunes modificados con polietileno reciclado estable al almacenamiento, comparado con el betún convencional de referencia.

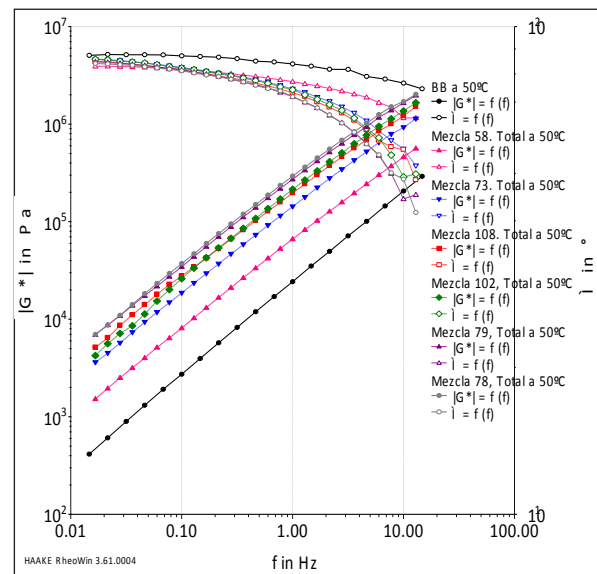


Figura 4. Barrido de Temperatura a frecuencia fija de 1 rad/s, para varios betunes modificados con polietileno reciclado estable al almacenamiento, comparado con el betún convencional de referencia.

Tabla 3. Efectos reológicos a media y alta temperatura: efectos de los factores de huella por rodadura.

Mezcla	$[G^*]/sen\delta$ a 60°C (Pa)	max T ^a , $[G^*]/sen\delta = 1kPa$ (°C)	EVT 1 (°C) 0,1 rad/s	EVT 2 (°C) 0,00063 rad/s	S ₂₅₋₆₀ x10 ⁻²	G* (25°C) x10 ⁵	G* (60°C) x10 ²
Betún 50/70	7016	71,3	52,8	53,2	-7,41	2,14	7,23
Mezcla 58 (3%PEt)	30197	82,11	65,03	65,71	-7,28	9,676	32,19
Mezcla 73 (6%PEt)	60075	85,32	68,17	69,05	-6,84	14,8	69,65
Mezcla 108 (6%PEt)	86674	91,4	74,1	75,5	-6,08	12,36	105,1
Mezcla 102 (6,5%PEt)	123580	93,5	73,96	74,7	-6	17,2	156,7
Mezcla 79 (7% PEt)	172443	97,1	74,7	75,4	-6,33	22,57	157,9
Mezcla 78 (8% PEt)	119279	92,7	75,7	76,9	-6,46	22,11	139,6

ra que a esta temperatura no hay riesgo de formación de rodadura al emplear este ligante en un firme.

Relacionado con este valor se encuentra la Temperatura de Equiviscosidad EVT. La EVT [4], basada en la medida de la LSV (Low Shear Viscosity), es la temperatura a la cual un betún o ligante bituminoso presenta un valor definido de la viscosidad de corte a baja velocidad de deformación, para un valor fijo de tensión o velocidad de deformación de corte, siendo por tanto, un indicador de su susceptibilidad a las deformaciones plásticas, obtenida en ensayos DSR a muy baja frecuencia.

Otros autores [5] prefieren evaluar esta propiedad por medio del cálculo de la pendiente en función de la variación logarítmica de la variación del módulo complejo entre las temperaturas de +25 y +60°C (S₂₅₋₆₀). Dicha pendiente es calculada en ensayos por DSR en barridos de frecuencia a 10 rad/s. El mayor valor de esta pendiente (en valor absoluto) indica una mayor susceptibilidad térmica.

Por lo tanto, a raíz del análisis de los resultados mostrados en la tabla 4, podemos afirmar que los betunes modificados con polietileno reciclado presentan las siguientes ventajas con respecto al betún de referencia convencional:

- **T^a $[G^*]/sen\delta > 1kPa$:** los betunes modificados con polietileno reciclado presentan una mayor temperatura a la cual se cumple esta condición SHRP (unos

20 °C más). Es decir pueden ser aplicados en firmes que van a soportar una mayor temperatura de servicio sin riesgos de sufrir deformaciones plásticas.

- **Temperatura de Equiviscosidad EVT:** analizando este parámetro llegamos a la misma conclusión que en el caso anterior; Estos aportan unos 20 °C que el convencional, por lo que puede ser empleado en firmes con una mayor exigencia térmica.
- **Susceptibilidad térmica S₂₅₋₆₀:** los betunes modificados con polietileno reciclado presentan un

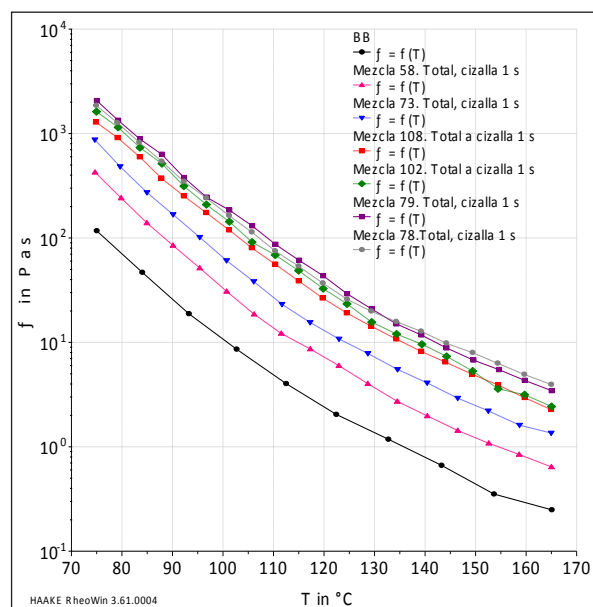


Figura 5. Curva de viscosidad vs temperatura para varios betunes modificados con polietileno reciclado estable al almacenamiento, comparado con el betún convencional de referencia.

menor valor de pendiente S_{25-60} por lo que presentan una susceptibilidad térmica menor.

Como muestra la figura 5, que representa la viscosidad frente a la temperatura, los betunes modificados con polietileno presentan una viscosidad mayor que el betún de referencia (representado en negro). Este hecho permite ir a dosificaciones mayores de betún sobre las mezclas asfálticas minimizando el riesgo de que se produzca escurrimiento de ligante en el aglomerado, durante los procesos de fabricación y puesta en obra de éste.

CARACTERÍSTICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS FABRICADAS CON BETUNES MODIFICADOS CON POLIETILENO RECICLADO

En esta parte del estudio el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) ha realizado un estudio para caracterizar el comportamiento de una mezcla discontinua tipo BBTM 11B fabricada a partir de dos betunes modificados con polietileno reciclado (denominados betunes 102 y 124), y de un betún modificado con polímero tipo BM-3a, que ha servido de referencia. Las características de estos ligantes vienen descritos en la tabla 4.

Las propiedades a evaluar han sido las especificadas en el Pliego General para este tipo de mezclas: contenido de huecos, sensibilidad al agua y resistencia a la deformación permanente. Además, se ha determinado la resistencia a la fisuración a partir de la determinación de la energía

de fractura y la tenacidad de la mezcla mediante la aplicación del ensayo FENIX desarrollado en el Laboratorio de Caminos de la UPC.

A partir de estos betunes se ha fabricado una mezcla discontinua, tipo BBTM 11B, con granulometría centrada en el huso especificado en el artículo 543 "Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas" del PG-3 (OC 24/2008), Tabla 5.

El árido grueso utilizado es un granito, procedente de la cantera Berta (Barcelona), mientras que el árido fino (≤ 2 mm) es de naturaleza caliza, procedente de la cantera Foj (Barcelona). El filler ha sido de aportación en su totalidad, tal como se prescribe para las categorías de tráfico T00 a T2, utilizándose un carbonato cálcico.

Para la realización de los ensayos de sensibilidad al agua y FENIX, se han fabricado series de probetas cilíndricas de acuerdo al procedimiento Marshall (UNE-EN 12697-30) aplicando 50 golpes por cara. El contenido de betún utilizado ha sido del 5.2% en masa sobre el total de la mezcla, lo que supone una relación filler/betún de 1.01, valor situado en la franja inferior del intervalo recomendado para este tipo de mezclas (entre 1.0 y 1.2). Se ha fijado este porcentaje con objeto de enfatizar el efecto del betún y diferenciar mejor el comportamiento de los betunes a evaluar.

De cada una de las probetas cilíndricas se ha determinado su densidad geométrica, y a partir de las pro-

Tabla 4. Características de los betunes empleados en la fabricación de las mezclas asfálticas.

ENSAYOS			LIGANTES		
NORMA	CARACTERÍSTICA	UNIDADES	PMB-102	PMB-124	BM-3a
EN 1426	Penetración a 25°C	dmm	33	32	58
EN 1427	Tª de reblandecimiento	°C	58,1	58,1	58,0
EN 13398	Recuperación Elástica	%	21	18	81
EN 15326	Densidad relativa (25°C/25°C)	-	1,0587	1,0538	1,0314

Tabla 5. Granulometría utilizada. Mezclas BBTM 11B.

Tamiz (mm)	16	11,2	8	4	2	0,5	0,063
Pasa (%)	100	95	70	22	20	12	5

porciones y pesos específicos de los áridos que componen la mezcla, se ha determinado el contenido de huecos en mezcla. Una parte de las probetas (6 probetas) se ensayaron a tracción indirecta, a 15 °C, en seco y tras inmersión en agua, de acuerdo a las normas UNE EN 12697-12 y 23, para determinar la sensibilidad al agua; otras 3 probetas, se serraron por mitad (por uno de sus diámetros) y se acondicionaron para la realización del ensayo FENIX a 20 °C [6].

Para la realización del ensayo de pista de laboratorio se han fabricado series de probetas prismáticas, de 300x400x40 mm, mediante compactador de placa, con el dispositivo de rodillo de acero (UNE-EN 12697-33), utilizando dos contenidos de betún: el mismo 5.2% s.m. utilizado anteriormente para los ensayos de sensibilidad al agua y FENIX; y el 5.7% s.m. con objeto de evaluar la mezcla en condiciones más críticas frente a las deformaciones plásticas (en este caso, al mantener la granulometría y el contenido de filler, la relación filler/betún es de 0.9). Después de determinar la densidad geométrica de cada placa, se han ensayado de acuerdo a la norma UNE-EN 12697-22, empleando el dispositivo pequeño, el procedimiento B en aire, a una temperatura de 60 °C y con una duración de 10000 ciclos.

A continuación se presentan y analizan los resultados obtenidos de cada uno de los ensayos:

Contenido de huecos

En la Tabla 6 se muestran los valores medios de la densidad geométrica y el contenido de huecos, correspondientes a todas las probetas cilíndricas fabricadas para cada uno de los betunes ensayados.

El contenido de huecos está en todos los casos por encima del mínimo especificado (12%), siendo muy similar entre las mezclas fabricadas con los betunes

Tabla 6. Contenido de huecos.

BETÚN	Densidad (g/cm3)	Huecos (%)
102	2,129	13,9
124	2,116	14,3
BM3A	2,138	13,2

102 y 124 y ligeramente inferior para la mezcla con el betún BM-3a de referencia.

Tracción indirecta y sensibilidad al agua

Los resultados muestran (figura 6) que las mezclas con los betunes 102 y 124 presentan una mayor resistencia a tracción indirecta en seco que la mezcla con el betún de referencia (BM-3a), aunque su resistencia conservada -influenciada por la naturaleza del árido- es menor; sólo el betún BM-3a se mantiene por encima del 90% especificado, siendo el betún 124 el que presenta la menor resistencia conservada (74%).

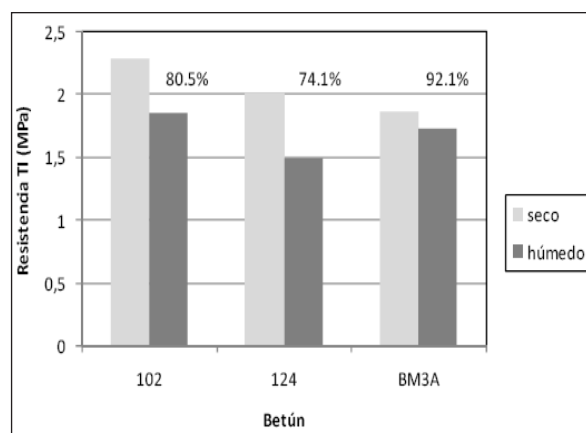


Figura 6. Resistencia a tracción indirecta a 15°C para varios betunes modificados con polietileno reciclado estable al almacenamiento, comparado con el betún BM-3a.

Ensayo Fenix

De los resultados obtenidos del ensayo FENIX (tabla 7 y figura 7) se desprende que las mezclas con los betunes 102 y 124 presentan un comportamiento frente a la fisuración similar, ya que tanto el índice de rigidez a tracción (IRT), como la energía de fractura (GF) son muy similares.

La rigidez de las mezclas con los betunes 102 y 124, evaluada a partir del índice de rigidez a tracción (IRT), es superior a la mezcla con el betún BM-3a (del orden del doble), mientras que tanto la energía de fractura (GF) como el índice de tenacidad (IT) que proporcionan los betunes 102 y 124 son menores que los del betún BM-3a, que presenta un comportamiento más dúctil y tenaz que los primeros. Estos resultados están en concordancia con la penetración y la recuperación elástica de los tres betunes ensayados.

Tabla 7. Resultados de los distintos parámetros del ensayo Fenix.

BETÓN	PROBETAS	Densidad (g/cm ³)	IRT (KN/mm)	GF (J/m ²)	IT (J/mm)
102	4A-102	2,115	11,22	323	339
	5A-102	2,129	14,62	330	285
	9A-102	2,129	10,89	372	329
	PROMEDIO	2,125	12,24	342	318
124	4BIS A-124	2,126	11,52	285	231
	5A-124	2,114	10,55	390	399
	9A-124	2,124	11,34	429	431
	PROMEDIO	2,121	11,14	368	354
BM3A	4A-BM3A	2,122	5,86	462	979
	5A-BM3A	2,143	5,99	514	1039
	9A-BM3A	2,153	6,20	660	1423
	PROMEDIO	2,139	6,02	545	1147

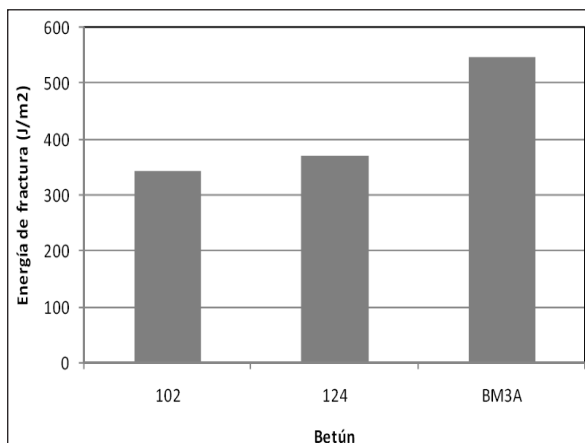


Figura 7. Energías de fractura. Ensayo Fenix.

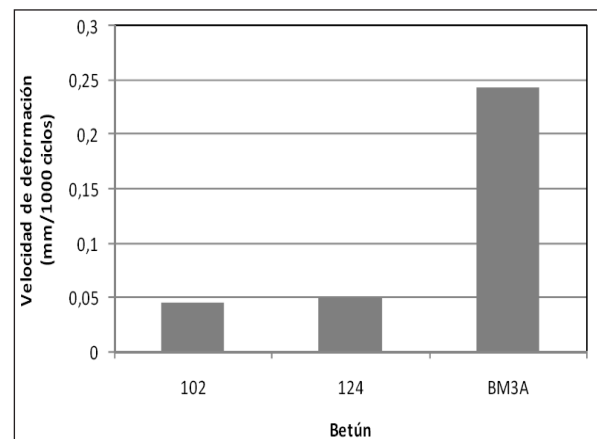


Figura 8. Velocidad de deformación. Ensayo de pista de laboratorio, 5.2% de betún s.m.

Resistencia a las deformaciones plásticas

Como se ha comentado anteriormente para la determinación de este ensayo se ha utilizado dos contenidos de betún: **5.2% s.m.** (y relación filler betún baja de 1,01), el mismo utilizado anteriormente para los ensayos de sensibilidad al agua y FENIX; y el **5.7% s.m.** con objeto de evaluar la mezcla en condiciones más críticas frente a las deformaciones plásticas (en este caso, al mantener la granulometría y el contenido de filler, la relación filler/betún es de 0.9).

a) Mezclas fabricadas al 5.2% de betún s.m:

Como podemos observar en la figura 8 para el contenido de betún del 5.2%, las mezclas fabricadas

con los betunes 102 y 124 presentan una velocidad de deformación inferior a la máxima especificada para las categorías de tráfico más pesado y para cualquier zona térmica estival (0.07 mm/1000 ciclos). Por su parte, la mezcla con el betún de referencia BM-3a presenta velocidades de deformación muy por encima de estos límites (más del triple de lo requerido) lo que ponen aún más en evidencia que estos ligantes modificados con polietileno reciclado son idóneos para mezclas a las que hay que exigir altas resistencias a las deformaciones plásticas.

b) Mezclas fabricadas al 5.7% de betún s.m:

En la figura 9 podemos observar como para este contenido extremo de betún (1 punto por encima del

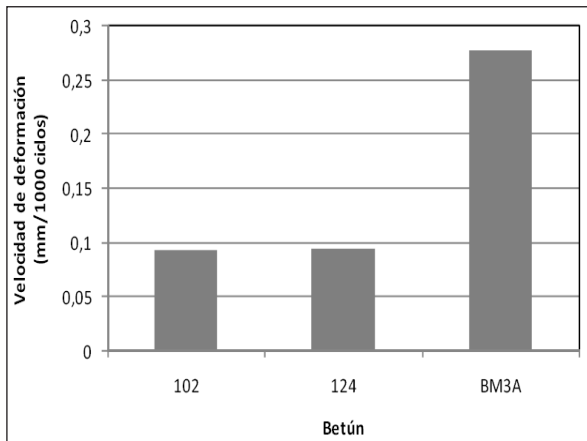


Figura 9. Velocidad de deformación. Ensayo de pista de laboratorio, 5,7% de betún s.m.

contenido mínimo para este tipo de mezclas, y una relación filler/betún por debajo del intervalo recomendado) las velocidades de deformación son algo mayores, superando ligeramente los límites para los tráficos más pesados, pero estando aún por debajo del límite especificado para las categorías de tráfico más ligero, T3 y T4 (0.10 mm/1000 ciclos). De nuevo la mezclas fabricadas con el betún BM-3a muestran unos valores muy superiores a los límites establecidos (casi cuatro veces más que lo requerido).

A la vista de los resultados obtenidos en los ensayos de pista realizados para la mezcla fabricada con el betún BM-3a, podemos afirmar que esta mezcla BBTM 11B estudiada es muy susceptible a sufrir deformaciones plásticas, de acuerdo con las especificaciones requeridas en el PG-3; y la utilización de estos betunes modificados con polietileno reciclado en la fabricación de esta mezcla asfáltica contrarresta esta tendencia obteniendo resultados dentro de lo especificado.

CONCLUSIONES

- La fracción PEBD procedente de la recogida de plásticos del contenedor amarillo es un producto válido para la fabricación de betunes modificados, que esta perfectamente controlada para garantizar una calidad adecuada.
- La sociedad necesita dar una salida sostenible a esta fracción PEBD para evitar que este produc-

to acabe como residuo en un vertedero. La utilización en la modificación de betunes es además una alternativa que da un valor añadido al firme construido con éstos.

- La presente investigación muestra un betún modificado con polietileno reciclado que es estable al almacenamiento, y por lo tanto, puede ser fabricado transportado y almacenado antes de la fabricación de la mezcla asfáltica. Este hecho evita la necesidad de fabricar "in situ" (a pie de planta asfáltica) este tipo de betunes modificados.
- Las formulaciones desarrolladas son técnica y económicamente viables, lo que las hace totalmente competitivas con otros betunes modificados con polímero a la hora de introducirlas en el mercado.
- Los betunes modificados con polietileno reciclados presentan unas muy buenas propiedades reológicas, superiores a la de los betunes convencionales y una menor susceptibilidad térmica. Su mayor módulo complejo y menor ángulo de desfase lo hace muy resistente a sufrir deformaciones plásticas.
- El efecto que introduce el uso de los betunes modificados con polietileno reciclado es aumentar la resistencia a las deformaciones plásticas de la mezcla, reduciendo ligeramente su ductilidad, debiendo analizar en cada caso su sensibilidad al agua, que puede variar dependiendo de la naturaleza del árido utilizado.
- A la vista de los resultados podemos considerar que estos betunes modificados con polietileno reciclado dan lugar a mezclas asfálticas con una calidad adecuada para su empleo en firmes.

REFERENCIAS

- [1] Polymer Engineering and Science (2007) 47, 2, 181, García-Morales, M; Partal, P; Navarro, F.J.; Martínez-Boza, F.J.; Gallegos, C.
- [2] Betunes modificados con polietileno en el tramo Chirivel (Almería) - límite de provincia con Murcia de la A-92 norte. A. Cernuda, A. Recio,

- R. López y J.J. García. Primer Congreso Andaluz De Carreteras. Granada, Febrero 1998.
- [3] Jun, L.; Yuxia, Z. y Yuzhen, Z.; (Construction and Building Materials, 22 (2008) 1067-1073).
- [4] Franesqui, M.A., Guiliani, F., 2007. Nuevas Especificaciones europeas para la caracterización de betunes asfálticos frente a las deformaciones plásticas. Revista Carreteras. Vol. 152, pp. 62-74
- [5] Edwards, Y., Tasdemir, Y., Isacsson, U. 2007. Rheological effects of commercial waxes and polyphosphoric acid in bitumen 160/220- high and medium temperature performance. Construction and Building Materials, Vol 21, pp. 1899-1908.
- [6] Valdés, G. [et al.]. Aplicación del ensayo Fénix para dosificar mezclas resistentes al fallo por fatiga. A: Jornada Nacional de ASEFMA. "V Jornada Nacional de ASEFMA". Madrid: 2010, p. 219-228.