

Reutilización de residuos plásticos agrícolas en la fabricación de mezclas bituminosas siguiendo la tecnología por vía seca

Reuse of agricultural plastic wastes for the manufacturing of roads bituminous mixtures, using the “dry way” methodology

M^a José SIERRA LÓPEZ

Jefe de Unidad de Control Técnico de Obras. Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía

Pedro PARTAL LÓPEZ

G.I Ingeniería de Fluidos Complejos. Universidad de Huelva

M^a Elena HIDALGO PÉREZ

Directora de Calidad, Medio Ambiente e I+D+i. EIFFAGE Infraestructuras

Juana TORRES PÉREZ

Técnico de Calidad y Medio Ambiente. EIFFAGE Infraestructuras

RESUMEN

El proyecto *PLASTIC-ROAD* investiga la utilización de residuos plásticos de origen agrícola como modificadores del betún utilizado en los pavimentos, desarrollando los conocimientos científicos y tecnológicos necesarios que permitan la utilización industrial de estos polímeros reciclados. En el estudio se utiliza la denominada *vía seca*; es decir, la adición del polímero durante la mezcla del árido y el betún para obtener una mezcla asfáltica con propiedades mejoradas.

La investigación realizada a nivel de laboratorio se ha iniciado con la caracterización y selección de los materiales de partida (betunes, polímeros de origen agrícola, etc.). A continuación, se han estudiado las interacciones betún-polímero y evaluado el efecto de la formulación (tipo y concentración de plástico en el ligante) y de la temperatura de la mezcla betún-polímero sobre la reología, microestructura y propiedades tecnológicas de los betunes modificados.

A continuación se ha diseñado y evaluado el comportamiento de diferentes mezclas bituminosas, con incorporación de plásticos por vía seca.

Por último, con el fin de validar a escala real el comportamiento de las mezclas modificadas con plásticos de origen agrícola, se ha realizado un tramo experimental en la carretera A-2005, en Jerez de la Frontera.

PALABRAS CLAVE: Mezcla asfáltica, Betún, Ligante, Residuo plástico agrícola, Polímero, Betún-polímero, Mezcla bituminosa mejorada, Modificación, Pavimento.

ABSTRACT

The PLASTIC-ROAD Project researchs about the use of agricultural plastic wastes as modifiers for the bitumen of pavements, developing the scientist and technology knowledge necessary to enable the industrial use of these recycled polymers. In this study we use the “dry way”, in other words, the adition of the polymer during the mix of the aggregate and the bitumen to obtain a bituminous mixture with improved properties.

The laboratory research has started with the characterization and selection of the constituent materials (bitumen, agricultural polymers, etc). Then, polymer-bitumen interaction has been studied. The effect of the formulation (type and concentration of the plastic in the bitumen binder) has been assessed, along with, the mixing temperature polymer-bitumen on the rheology, microstructure and technology properties of modified bitumen.

Then, the behaviour of modified mixes with dry way adition of agricultural plastic wastes has been designed and evaluated.

Finally, in order to assess on the real scale the behaviour of the agricultural plastics modified mixtures, a test section has been performed on the A-2005 road, in Jerez de la Frontera.

KEY WORDS: Asphalt mix, Bitumen, Binder, Agricultural plastic waste, Polymer, Polymer-bitumen, Improved bituminous mix, Modification, Pavement.

Antecedentes

El comportamiento de los pavimentos bituminosos ante las sollicitaciones a las que se ve sometido (cargas del tráfico, condiciones climatológicas,... etc.) está influenciado en su mayor parte por las propiedades del betún, que constituye la matriz continua de la mezcla bituminosa y es el único componente deformable. El continuo aumento del tráfico en las carreteras se ha traducido en una mayor exigencia en las especificaciones de los betunes, con el fin de conseguir una mejor estabilidad mecánica de los pavimentos.

Con el objetivo de mejorar el comportamiento de los betunes y cumplir con las necesidades actuales es necesario modificar el betún. Para ello se utilizan distintos tipos de polímeros (polietilenos de alta y baja densidad, estireno-butadieno, estireno-butadieno-estireno,... etc.) para cambiar las características de estos ligantes bituminosos y conseguir mejorar sus propiedades.

Sin embargo el alto coste de estos polímeros, comparado con el del betún, hace que el uso comercial del betún modificado sea solo atractivo cuando la cantidad de polímero necesaria para mejorar significativamente el rendimiento del pavimento es muy pequeña. Este problema puede ser resuelto en gran parte mediante el uso de polímeros de desecho, como los plásticos de origen agrícola.

Por otra parte, los residuos plásticos de la agricultura se han convertido en un problema medioambiental en aquellos países como el nuestro, en los que el cultivo mediante plásticos en invernaderos es una práctica común. Particularmente, en Andalucía, la reutilización de estos residuos resulta de especial interés tanto en su aspecto tecnológico como medioambiental, ya que se concentra el mayor volumen de utilización de plásticos para cubiertas de cultivo e invernaderos. Los dos tipos de polímeros más empleados son el polietileno de baja densidad lineal (LLDPE) y no lineal (LDPE), y mezclas de LLDPE con copolímeros de etileno vinil acetato (EVA) y LDPE, sin olvidar los policarbonatos y el PVC en el caso de las cubiertas de invernaderos.

Estos residuos plásticos depositados en vertedero no son biodegradables, lo que ha generado que aumente la preocupación por su tratamiento y la búsqueda de alternativas a la eliminación en vertedero, siempre con miras a la gestión basada en el principio de jerarquía: reducción en origen, reutilización, reciclado y recuperación.

Desde el punto de vista técnico, dos son los principales problemas con que se encuentra el reciclador de plásticos a la hora de abordar la gestión del plástico agrícola:

- Alto grado de contaminación con otros elementos distintos al plástico que, en ocasiones, se convierte en un obstáculo insalvable.
- Nivel excesivo de degradación, fundamentalmente en el caso de plásticos de invernaderos, al estar sometidos al sol durante largos periodos de tiempo.

Ello exige que se adopten las máximas precauciones en la recogida y disposición de los plásticos, definiendo unas especificaciones a cumplir por esa *segunda materia prima*, una vez hayan ultimado su primera vida útil.

Introducción

Para dar respuesta a esta doble problemática, técnica y ambiental, nace el proyecto *PLASTIC-ROAD*, adjudicado en la 1ª Convocatoria de Proyectos de I+D+i de la Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía 2011-2013 a la Universidad de Huelva, con Eiffage como empresa colaboradora y gestionado por la Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía.

En el presente artículo se expone de forma resumida el desarrollo y resultados del proyecto.

La valorización de los residuos plásticos como agentes modificadores en mezclas asfálticas es una de las opciones posibles en la gestión de los residuos plásticos procedentes de la agricultura.

El proyecto constituye una posibilidad clara de contribuir a solucionar el problema medioambiental de los residuos plásticos de invernaderos, pudiendo representar un abaratamiento de los costes del reciclado del plástico agrícola, con la posible eliminación de parte de dicho proceso de reciclado en la fracción usada para modificación de betunes.

La reutilización de estos residuos resulta de especial interés para Andalucía, al ser la Comunidad Autónoma donde en mayor cantidad se generan.

Objetivos

El objetivo fundamental del proyecto es desarrollar los conocimientos científicos y tecnológicos que permitan la utilización industrial de polímeros reciclados, procedentes de residuos plásticos de origen agrícola, como modificadores del betún utilizado para pavimentación de carreteras. Se propone el uso de la denominada *vía seca*, es decir, la incorporación del polímero durante la mezcla del árido y el betún para obtener una mezcla bituminosa con propiedades mejoradas. Para ello, es necesario desarrollar nuevas tecnologías que permitan una adecuada incorporación de los plásticos agrícolas mediante la *vía seca*.

Numerosos estudios y publicaciones han puesto de manifiesto los beneficios de la modificación de betunes con polímeros plásticos como las poliolefinas obtenidas de los plásticos agrícolas. Estos beneficios se resumen en una menor susceptibilidad térmica del ligante bituminoso, lo que se traduce en una mayor resistencia a las deformaciones plásticas en condiciones de altas temperaturas de servicio, así como mayor resistencia a la fractura a bajas temperaturas.

Sin embargo para que la adición del polímero reciclado al betún dé lugar a una modificación óptima, parte de los componentes mal-ténicos del betún deben ser incorporados por el polímero (dando lugar a un hinchamiento de la fase polimérica dispersa en el betún). Para que esto ocurra se requiere llevar a cabo un procesado por *vía húmeda* donde el polímero y el betún se mezclan durante largo tiempo bajo condiciones de alta cizalla y temperatura. Este procesado por *vía húmeda* requiere, antes de su mezcla con el árido, el almacenamiento del betún modificado en tanques a temperaturas entre 160 y 180°C, donde se han detectado procesos de desestabilización de la dispersión con la rápida separación de la fase dispersa. Este problema de inestabilidad al almacenamiento no ha sido resuelto hasta la fecha de forma sencilla, lo que condiciona seriamente el uso de estos plásticos reciclados.

De ahí que en este proyecto, frente a la modificación por *vía húmeda*, se proponga el uso de la denominada *vía seca*, es decir, la adición del polímero durante la mezcla del árido y el betún para obtener la mezcla asfáltica (Figura 1). Sin embargo, dados los cortos tiempos y bajas temperaturas de proceso de la mezcla árido-betún, dicha adición no daría lugar al anteriormente comentado hinchamiento del polímero y, por tanto, a mezclas asfálticas con propiedades mejoradas. Así pues, el reto de este proyecto es desarrollar nuevas tecnologías que permitan una adecuada incorporación de los plásticos agrícolas mediante la *vía seca*.

Metodología

La metodología de investigación ha seguido cuatro fases o etapas:

- Selección y evaluación de los materiales de partida y estado del arte,
- Evaluación de la incorporación del plástico por *vía seca* (estudio de la compatibilidad plástico-betún y estudio de los materiales y diseño de las fórmulas de trabajo),
- Optimización de la incorporación del plástico por *vía seca* (estudio de la formulación del procesado de ligantes y caracterización de las mezclas bituminosas en laboratorio), y



Foto 1. Aspecto del residuo plástico agrícola empleado en el estudio.



Figura 1. Esquema de fabricación de la mezcla bituminosa modificada por *vía seca*.

- Fabricación y puesta en obra de la mezcla bituminosa a escala real y validación de los resultados.

1. Selección y evaluación de los materiales de partida

La investigación realizada a nivel de laboratorio se ha iniciado con la caracterización y selección de los materiales de partida, plásticos agrícolas y betunes, como también distintos aditivos utilizados para mejorar la compatibilidad del plástico con el betún. Así, se han seleccionado dos tipos de polímeros de origen agrícola, ambos polietilenos de baja densidad (Fotos 1 y 2):

- Reciclado 1 (Rec-1): granza de color negro procedente de plásticos agrícolas en un 70% acolchado negro y 30% de invernadero blanco, procedente de la zona occidental de Andalucía (provincias de Sevilla y Huelva).
- Reciclado 2 (Rec-2): plástico triturado de color blanco procedente de plásticos agrícolas en un 98% de invernadero blanco, procedente de la zona oriental de Andalucía (provincia de Almería).

Estos plásticos reciclados se han caracterizado mediante análisis termogravimétricos y calorimétricos, para identificar los polímeros



Foto 2. Los polímeros plásticos de origen agrícola seleccionados son polietilenos de baja densidad.

presentes en los mismos y su grado de degradación. Ambos polímeros presentan perfiles de descomposición térmica muy similares. Para el Rec-1 se observan dos picos de fusión, lo que indica que este material reciclado resulta ser una mezcla de polímeros: polietileno de baja densidad (LDPE) y polietileno lineal de baja densidad (LLDPE). El Rec-2 presenta únicamente un pico endotérmico, correspondiente a la fusión de los cristales de LDPE (Figura 2).

En cuanto a los ligantes, se han estudiado diversos betunes con diferente penetración, origen y composición química: de baja penetración (B50/70), penetración media (B160/220) y alta penetración (B500) con objeto de determinar los que demuestren mejor compatibilidad con el polímero (Figura 2). Se ha llevado a cabo:

- una caracterización química mediante técnicas cromatográficas,
- una caracterización tecnológica mediante los ensayos normalizados de temperatura de reblandecimiento anillo y bola y penetración y, por último,
- una caracterización reológica mediante ensayos de flujo viscoso y ensayos de barrido de frecuencia y de temperatura en cizalla oscilatoria.

2. Evaluación de la capacidad de incorporación del plástico en función del tipo de betún

La incorporación del plástico por vía seca se caracteriza por tiempos de contacto plástico-betún cortos y condiciones de cizalla y temperatura determinadas por el proceso de mezcla árido-betún seleccionado.

Así, en esta fase se han estudiado en profundidad las interacciones betún-polímero para conseguir una mejora significativa de las propiedades de la mezcla bituminosa y promover la rápida incorporación del polímero en la mezcla bituminosa durante su procesado por vía seca, lo que se ha realizado a través de la modificación física del plástico, mediante la adición de aditivos que faciliten su incorporación en la mezcla bituminosa. Como aditivos modificantes se han analizado aceites de base mineral vírgenes (aceite nafténico SR-10 y aceite parafínico 500-SN) y reciclados (Eco-350; Eco-150; Eco 80), de origen industrial, que se han caracterizado mediante análisis termogravimétricos y calorimétricos. Se estudió también la modificación previa del plástico con un betún de alta penetración B500.

Se han preparado mezclas polímero-betún (utilizando betunes de distinta naturaleza) con distintos porcentajes de plástico (1, 3 y 5% (p/p)), de betún y de agentes compatibilizantes, a distintas temperaturas de mezclado (140, 165 y 180°C), distintos tiempos de procesado (15, 60, 120 y 420 minutos) y distinta velocidad de agitación (100, 250 y 400 rpm), realizándose un seguimiento de la modificación mediante dispositivo de micromezclado en tanque agitado

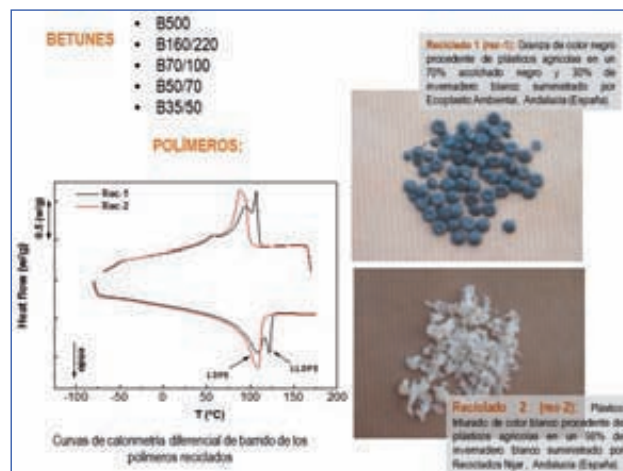


Figura 2. Selección de los materiales de partida.

acoplado a un reómetro de esfuerzo controlado (Foto 3). Este dispositivo permite seguir la modificación de las propiedades mecánicas del sistema betún-polímero por la variación de viscosidad (o par de torsión) que se produce durante la modificación con los polímeros.

Este estudio permite establecer tiempos mínimos de contacto entre el betún y el polímero, para que se produzca una modificación efectiva, en función del tipo de betún y las características del polímero (grado de degradación, suciedad, tamaño de partícula de la granza, mezclas, etc.).

En esta etapa se ha acometido también el diseño y evaluación del comportamiento de las mezclas bituminosas que incorporan por vía seca el plástico *con* y *sin* modificación con agentes compatibilizantes. Para la propuesta de mezclas bituminosas a ensayar también se estudiaron las características de los materiales, definido el diseño y condiciones de fabricación de las mezclas en laboratorio y, finalmente, abordado la fabricación propiamente dicha. En esta fase se ha tomado como referencia una mezcla tipo hormigón bituminoso AC16 Surf offitica con betún convencional B35/50 y una mezcla drenante PA16 offitica fabricada con betún modificado con polímeros BM3c. Los resultados de estas mezclas de referencia se compararán con las correspondientes fabricadas con adición de residuos plásticos por vía seca (Fotos 4 a 6).



Foto 3. Amasadora de laboratorio para la fabricación de las mezclas.

Para determinar el contenido óptimo de plástico que se puede incorporar a la mezcla por vía seca, se procedió a un estudio preliminar de las curvas de compactabilidad de las mezclas (aspecto clave para la puesta en obra), incorporando los plásticos seleccionados al 0,5%, 1% y 3% sobre el total de la mezcla, y con un tiempo de maduración de 60 minutos en estufa a 165°C, con el fin de observar el posible efecto en las propiedades de la mezcla durante la digestión del plástico en la mezcla bituminosa.

Las mezclas se caracterizaron utilizando los métodos de compactación por impacto y por giratoria mediante los ensayos de densidad máxima (UNE-EN 12697-5), densidad aparente SSD y geométrica (UNE-EN 12697-6), contenido de huecos (UNE-EN 12697-8) y tracción indirecta (UNE-EN 12697-23).

Como conclusiones de esta etapa, pueden señalarse las siguientes:

- Las curvas reocinéticas muestran una importante interacción entre los polímeros reciclados y los betunes (lo que se manifiesta por el aumento significativo del par de torsión) durante los primeros 100 minutos de procesado, aunque el hinchamiento del polímero continúa durante las 6 horas siguientes a menor velocidad. Este resultado podría estar relacionado con la mejora de propiedades en las mezclas bituminosas que han experimentado un tiempo de maduración superior a los 60 minutos.
- Las variables de procesado que más influencia ejercen en los valores del par de torsión son la temperatura y el tiempo de mezclado, mientras que la velocidad de agitación se ha evidenciado que no tiene un efecto relevante.
- No existen diferencias significativas en los valores del par de torsión de las mezclas entre betunes de distinta penetración y composición química y los dos polímeros reciclados en las condiciones de mezclado empleadas.
- Los ensayos de calorimetría han puesto de manifiesto que los polímeros presentan un alto grado de compatibilidad con los betunes, produciéndose la migración de componentes ligeros de la fracción malténica del betún al polímero.
- Los ensayos de anillo y bola muestran que la adición de un 5% (p/p) de plástico reciclado agrícola provoca un aumento de la temperatura de anillo y bola de 10°C, dando lugar a betunes con características de un BM-3b en cuanto a este parámetro. Estos ensayos también ponen de manifiesto que el tiempo de mezclado tiene una gran influencia en las temperaturas de reblandecimiento anillo y bola, mostrando una evolución exponencial con dicho parámetro.

En cuanto a los estudios de las mezclas, las principales conclusiones generales son:

- Debido a la buena trabajabilidad de la mezcla y los resultados obtenidos en esta etapa tanto para la mezcla AC16S como para la



Foto 4. Incorporación del ligante en la fabricación en laboratorio de las mezclas betún-polímero.



Foto 5. Incorporación del residuo plástico dentro del tanque mezclador en la fabricación en laboratorio de las mezclas betún-polímero.



Foto 6. Muestra de mezcla betún-polímero obtenida en el tanque mezclador para el estudio en laboratorio.

mezcla PA16, se opta por continuar los trabajos de caracterización de las mezclas (ensayos de sensibilidad al agua, fatiga, rigidez, etc.) con el plástico suministrado conocido en el ámbito del proyecto como Reciclado-2.

- Los resultados obtenidos han puesto de manifiesto una mejora en las propiedades de las mezclas bituminosas tras la maduración.

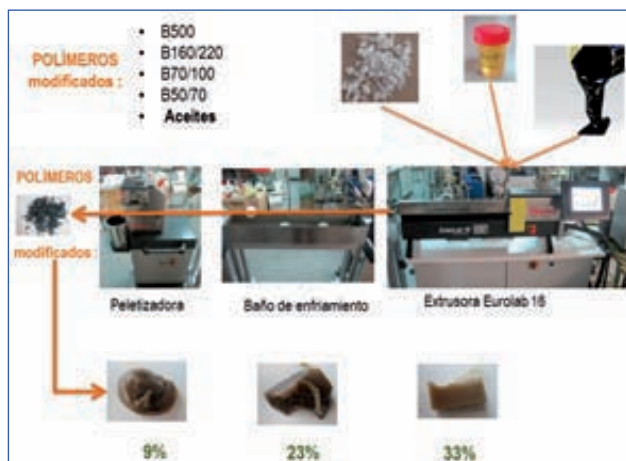


Figura 3. Esquema de obtención de plásticos modificados a partir de Rec-2 y diversos aditivos compatibilizantes.

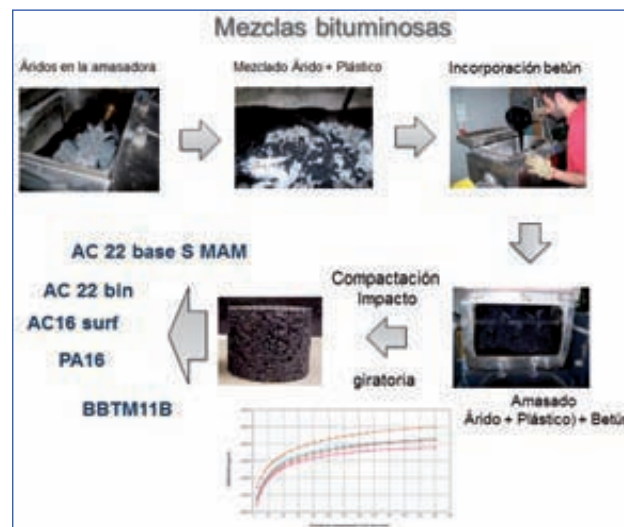


Figura 4. Fabricación de las mezclas con plásticos en el laboratorio.

DENOMINACIÓN	COMPOSICIÓN
MODIFICADO 1 (MOD1)	P. Níjar + Aceite ECO150 (10,8% (p/p))
MODIFICADO 2 (MOD2)	P. Níjar + 20,5% (p/p) B15/25 + 8,3% (p/p) Aceite ECO 150
MODIFICADO 3 (MOD3)	P. Níjar + 27,8% (p/p) B500

Tabla 1. Denominación de los plásticos modificados.

- A raíz de esta caracterización preliminar y en base a los resultados, y dado que se obtiene un máximo en la resistencia a tracción indirecta en torno al 0,5% de plástico añadido, se opta por definir como contenido óptimo de plástico en vía seca el 0,5% sobre mezcla. Si bien los resultados con el 1% son muy similares, se decide fijar el 0,5% dado que no se aprecian mejoras al aumentar el porcentaje de plástico y, sin embargo, la mezcla se encarece desde el punto de vista de coste de las materias primas.
- Por último, debido a la dificultad de mantener porcentajes de huecos superiores al 20% que muestra la mezcla PA16 con plásticos a nivel de laboratorio, se decide cambiar el estudio de esta mezcla por una tipo BBTM 11B con el contenido óptimo de plástico definido (0,5%).

3. Optimización de la incorporación del plástico por vía seca y diseño y evaluación de las mezclas bituminosas que incorporan por vía seca el plástico, con y sin modificación

El objetivo de esta etapa ha sido reducir los tiempos de incorporación del plástico al betún, lo que se ha estudiado por dos vías:

- por aditivación de los betunes con agentes que mejoren su compatibilidad con el polímero, y
- mediante la modificación física o prehinchado del plástico con fracciones ligeras de betún y/o aceites minerales.

Se ha buscado el desarrollo de un producto *polímero prehinchado* formado por el plástico reciclado y un compatibilizante (lubricante, betún o mezcla de ambos). Este polímero prehinchado se ha obtenido a nivel de laboratorio mediante un mezclador discontinuo de paletas-amasadora, y mediante extrusora de doble husillo a la que se alimenta en continuo el plástico y el aditivo para obtener una granza de plástico modificado, requerido para su fácil aplicación por vía seca. Esta granza se mezclará con diferentes betunes para determinar las formulaciones betún/polímero prehinchado que proporcionen propiedades óptimas a ésta. Esta formulación será utilizada para el desarrollo de las mezclas bituminosas (Figura 3).

Del mismo modo que en la fase anterior, se han realizado como ensayos de caracterización:

- análisis calorimétrico,
- temperatura de reblandecimiento anillo y bola y penetración, y
- curvas reocinéticas de mezclado.

Los ensayos de calorimetría diferencial de barrido ponen de manifiesto que un aumento del contenido de aceite lubricante en el polímero reciclado modificado produce una disminución del punto de fusión del polímero, poniendo de manifiesto el grado de modificación alcanzado en el mismo.

Mediante las curvas reocinéticas se ha podido comprobar que a medida que aumenta el contenido de aceite lubricante en los plásticos modificados, el valor de estado estacionario del par de torsión de los ligantes es menor y se alcanza en tiempos más cortos.

Como resultado de estos ensayos de caracterización, para conseguir un plástico modificado que presente una rápida incorporación al betún y de lugar a valores adecuados de penetración y punto

CARACTERÍSTICA	NORMA (UNE-EN)	AC16						BBTM11B				
		35/50	35/50	50/70	50/70	50/70	50/70	45/80-65	50/70	50/70	50/70	50/70
Tipo betún		35/50	35/50	50/70	50/70	50/70	50/70	45/80-65	50/70	50/70	50/70	50/70
Plástico		-----	Rec-2	MOD1	Rec-2	MOD1	Rec-2	-----	Rec-2	MOD1	MOD2	MOD3
Plástico/mezcla (%)		0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0	0,5	0,5	0,5	0,5
Ligante/mezcla (%)		4,5	4,5	4,5	4,2	4,2	4,2	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7
Densidad máxima (kg/m ³)	12697-5	2.628	2.581	2.582	2.581	2.603	2.587	2.658	2.661	2.653	2.664	2.665
Densidad aproximada SSD (kg/m ³)	12697-6	2.493	2.449	2.494	2.474	2.478	2.476					
Densidad aproximada Dim. (kg/m ³)	12697-6							2.253	2.260	2.305	2.232	2.251
Huecos mezcla (%)	12697-8	5,1	5,2	3,4	4,1	4,8	4,3	15,3	15,1	13,1	16,2	15,6
Tracción Indirecta (KN)	12697-23	27,1	32,9	22,5	25,4	20,3	25,1	14,3	17,4	16,0	18,3	20,1
Estabilidad Marshall (KN)	12697-34	15,0	15,4	15,2	14,8	18,8						
Deformación Marshall (mm)		2,6	2,6	2,5	2,2	2,3						
Pérdida de partículas (%)	12697-17							3,4	9,7	12,2	12,7	11,4
Cántabro húmedo (%)	NLT-362/92							9,7	17,0	14,4	16,7	14,0
Pérdida partículas 5°C (%)								10,9	17,5	19,4	19,7	19,5
ITS Aire (MPa)	12697-12	2,24	2,09	2,05	2,35	1,69	2,54	1,28	1,28	1,52	1,32	1,68
ITSR (%)		85,9	89,7	94,6	84,9	86,6	87,9	97,9	96,8	93,2	85,0	90,8
Rodadura RD (mm)	12697-22	1,79	1,14	0,76	1,18	1,00		1,31	1,10	1,09	1,38	0,94
Rodadura WTS		0,044	0,023	0,017	0,024	0,019		0,037	0,026	0,029	0,025	0,016
Rigidez ajustado (MPa)	12697-26	6.705	8.531	6.789				2.697	4.832	3.986	4.595	4.212
Fatiga (ε _r)	12697-24	141	133	134				263	102	141		

Tabla 2. Resultados obtenidos en el estudio de las mezclas AC16S y BBTM11B.

de reblandecimiento, se han propuesto tres prototipos de plástico modificado con distinta formulación para ser evaluados en las mezclas bituminosas AC16 Surf y BBTM11B, cuya composición se indica en la Tabla 1:

- En uno de los casos (MOD3) se ha utilizado como lubricante un betún B500;
- en el segundo (MOD1) un aceite mineral reciclado; y
- en el tercero (MOD2) una mezcla de aceite mineral reciclado y betún 15/25.

Estos polímeros preinchados se adicionaron a las mezclas bituminosas AC16 surf y BBTM 11B, ambas con árido grueso de naturaleza ofítica y arena caliza.

Estas mezclas han sido estudiadas también con el plástico Rec-2 sin modificar, con tratamiento de lavado y cortado (no extrusionado). La mezcla AC16S se ha estudiado también con distintos contenidos de betún (4,5% y 4,2% sobre mezcla).

En el estudio de las mezclas fabricadas con estas formulaciones (ver Figura 4), se han obtenido resultados de los que se deducen las siguientes conclusiones :

- En general, la incorporación de plásticos a las mezclas mejora el comportamiento en cuanto a deformaciones permanentes se refiere, obteniéndose una reducción del valor de deformación

de más de un 50% respecto al valor de referencia de la mezcla AC16 Surf.

- En función del tipo de plástico empleado, también se produce un incremento en el valor de la resistencia conservada. Así, en el caso de la BBTM 11B se obtiene un valor óptimo de resistencia conservada para el plástico sin modificar, y para la AC16S con el plástico modificado con el aceite mineral.
- Para la mezcla BBTM11B la incorporación de plásticos provoca, por un lado, un aumento del módulo de rigidez y, por otro, empeora el comportamiento de la resistencia a fatiga, con respecto a las mezclas fabricadas con betún modificado con polímero SBS (mezcla BBTM de referencia). No obstante el comportamiento a fatiga de las mezclas AC16 con o sin polímero reciclado se considera similar en ambos casos, por lo que en este tipo de mezclas cobra peso la mejora en cuanto a la sensibilidad al agua y deformaciones plásticas que se obtiene con el empleo de los plásticos reciclados.

Los resultados de los ensayos de caracterización de las mezclas AC16S y BBTM11B, tanto de referencia como con los plásticos (con y sin modificación) se incluyen en la Tabla 2.

Se ha completado el trabajo con el estudio de una mezcla AC22 Bin S (caliza) y una AC22MAM (caliza), en las que se aprecia también que la incorporación de plásticos produce una mejora de su comportamiento en cuanto a resistencia conservada. La deformación permanente también se ve mejorada considerablemente en la



Foto 7. Tramo de prueba, con un pavimento muy fisurado, donde se extendió directamente la mezcla betún-polímero, para ejecutar los ensayos a escala real.

mezcla AC22 Bin S. La incorporación del plástico en la mezcla de alto módulo permite emplear un betún más blando que el utilizado normalmente, consiguiéndose así una mejora en el comportamiento a fatiga, sin dejar de cumplir por ello las especificaciones exigidas a este tipo de mezclas en cuanto a rigidez y deformación permanente. Los valores de rigidez de la mezcla con plásticos disminuyen respecto a la mezcla de referencia, pero aún así presentan valores superiores a los 11.000 MPa que marca la normativa para este tipo de mezclas de alto módulo (MAM).

4. Fabricación y puesta en obra de la mezcla bituminosa a escala real y validación de los resultados

Los resultados obtenidos en las etapas anteriores del proyecto han permitido la selección de un conjunto de formulaciones adecuadas para la obtención de mezclas bituminosas con propiedades mejoradas para su puesta en servicio. Asimismo se han establecido las condiciones de procesado que deberían utilizarse.

El objeto de esta etapa es evaluar la aplicabilidad de las formulaciones previamente diseñadas y caracterizadas en laboratorio, a través de pruebas de puesta en obra, con el fin de asegurar y validar las características y prestaciones de dichas mezclas a escala real. Al mismo tiempo se evalúa el comportamiento de estas mezclas bituminosas frente al envejecimiento (Fotos 7 y 8).



Foto 8. Extendido y compactación de la mezcla betún-polímero en el tramo a escala real.

Considerando los resultados obtenidos en el trabajo experimental desarrollado a nivel de laboratorio para las mezclas con incorporación de plásticos de origen agrícola (con y sin modificación) por vía seca, se define que el tramo de prueba se realizará con una mezcla de rodadura con un contenido de betún inferior a lo especificado en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG-3) dado los resultados cumplientes obtenidos en todos los parámetros, especialmente en cuanto a deformaciones permanentes se refiere.

Así se realizó un tramo de prueba entre los kilómetros 1 y 2 de la carretera A-2005, en Jerez de la Frontera (Cádiz). Este tramo se caracteriza por presentar una importante intensidad de tráfico, unos 9.500 vehículos/día. El tramo de prueba ha sido ejecutado en dos fases (ver Fotos 9 y 10):

- Subtramo 1. Tramo de referencia. Extendido de 500 m de mezcla convencional AC16 Surf 35/50 en un espesor de 4,5 cm. El contenido de betún es del 4,5% sobre mezcla y no lleva adición de polímero reciclado.
- Subtramo 2. Tramo con polímero reciclado adicionado por vía seca. Extendido de 500 m con una mezcla mejorada con residuos plásticos agrícolas AC16 Surf 50/70 en un espesor de 4,5 cm, con el fin de comprobar las mejoras aportadas a la mezcla en condiciones reales. El contenido de betún es del 4,2% sobre mezcla, con



Foto 9. Señalización del tramo experimental.



Foto 10. Aspecto de la mezcla con plásticos.

adición de polímero reciclado (Rec-2) con una dotación del 0,3% sobre mezcla.

Sobre ambos tramos se han realizado todos los ensayos de caracterización de las mezclas a nivel de laboratorio, así como ensayos de densidad y rigidez sobre testigos. Los resultados obtenidos de las muestras tomadas en el extendido se presentan en la Tabla 3.

Hay que indicar que la puesta en obra no ha presentado ninguna incidencia o dificultad adicional respecto a una mezcla convencional sin aditivo.

Analizando los resultados obtenidos se aprecia que:

- El comportamiento de la mezcla AC16S Rec-2 frente al ensayo de resistencia conservada (sensibilidad al agua) y deformación permanente, mejora respecto a la mezcla AC16S de referencia.
- En cuanto al ensayo de rigidez, se obtiene un mayor módulo dinámico para la mezcla aditivada con plásticos respecto a la mezcla de referencia.
- En relación a la fatiga, la mezcla aditivada con plástico presenta una resistencia a fatiga del mismo orden, siendo ligeramente inferior a la de la mezcla de referencia.

El tramo experimental se ha auscultado tras la puesta en obra mediante el *Plan ADAR (Auscultación Dinámica de Alto Rendimiento)* de la Junta de Andalucía, determinándose las deflexiones con el deflectómetro de impacto. Este control se realizará durante los próximos años para analizar su evolución. Los valores de deflexiones obtenidos se representan en la Tabla 4 .

Del análisis de los valores obtenidos se deduce el mejor comportamiento del tramo ejecutado con adición de polímeros reciclados respecto al ejecutado con betún convencional. El incremento de las deflexiones al año de la puesta en servicio ha sido menor en el tramo con los polímeros plásticos que en el convencional (7% frente a 11, ver Figura 5 y Tabla 4).

Así pues, los valores obtenidos en el tramo de prueba validan los resultados de las investigaciones realizadas a nivel de laboratorio a lo largo del proyecto.

CARACTERÍSTICA	MÉTODO DE ENSAYO	AC16S	
		AC16S Referencia	AC16S Rec-2
Tipo de árido		Ofita	
Tipo betún		35/50	50/70
Porcentaje betún s/m		4,5	4,2
Plástico		---	P. Nijar
Curva granulométrica		% pasa	
22,4	UNE-EN 12697-2	100	100
16		93	96
8		68	69
4		45	43
2		33	28
0,5		18	14
0,25		13	10
0,063		6,7	5,2
Relación filler/betún		1,4	1,2
Plástico/mezcla (%)		0,0%	0,3%
Densidad máxima (kg/m³)	UNE-EN 12697-5	2.640,0	2.628,7
Densidad Ap. SSD (kg/m³)	UNE-EN 12697-6	2.534,9	2.488,2
Huecos mezcla (%)	UNE-EN 12697-8	4,0	5,3
Huecos áridos (%)		14,8	15,7
Huecos rellenos (%)		73,2	66,0
Estabilidad Marshall (KN)	UNE-EN 12697-34	18,9	22,6
Deformación Marshall (mm)		2,8	2,1
ITS. Aire (MPa)	UNE-EN 12697-12	2,16	2,07
ITS. Agua (MPa)		1,99	2,01
ITSR (%)		92,4	97,3
Rodadura RD (mm)	UNE-EN 12697-22	1,52	0,82
Rodadura PRD (%)		2,54	1,35
Rodadura WTS		0,030	0,015
Rigidez (MPa)	UNE-EN 12697-26	10.689	12.010
Fatiga (ϵ_p)	UNE-EN 12697-24 (D)	151	144

Tabla 3. Resultados de las mezclas en el tramo de prueba.

FECHA CONTROL	TRAMO	DEFLEXIÓN MEDIA	INCREMENTO
25-06-2014	Sin plástico	18	---
	Con plástico	15	---
10-07-2015	Sin plástico	20	11%
	Con plástico	16	7%

Tabla 4. Evolución de las deflexiones de los tramos con y sin plástico.

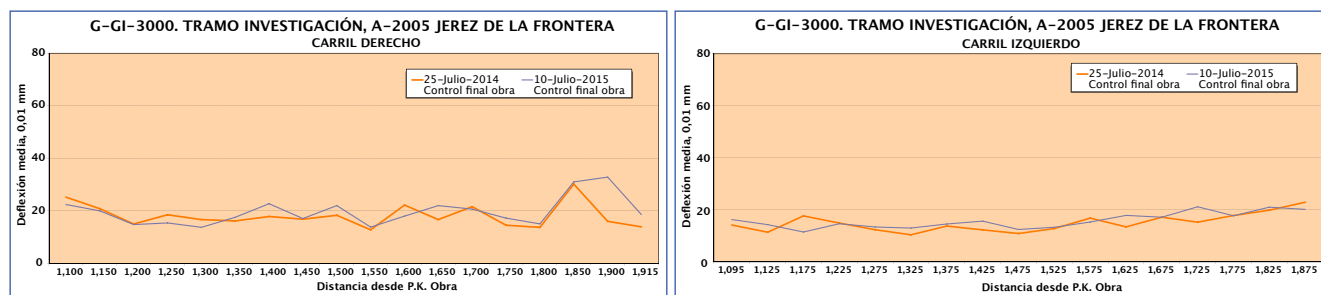


Figura 5. Comparativa de deflexiones de los tramos con y sin plástico.



LA
CARRETERA
DEL
FUTURO

Conclusiones

En este artículo se ha presentado parte del desarrollo y resultados obtenidos del proyecto de I+D+i *PLASTIC-ROAD* en el que se han propuesto estrategias que permiten una adecuada incorporación de polímeros reciclados de procedencia agrícola mediante la vía seca en mezclas asfálticas para uso en carreteras.

Para conseguir una mejora significativa de las propiedades de la mezcla bituminosa y promover la rápida incorporación del polímero en la mezcla bituminosa durante su procesado por vía seca, ha sido necesario conocer en profundidad la interacción betún-polímero. Esta incorporación de plástico al betún (descrita como un proceso de hinchamiento de la fase polimérica dispersa en el betún, producida porque parte de los componentes malténicos del betún son incorporados por el polímero plástico) ha resultado ser un proceso lento, que requiere de un tiempo de maduración de la mezcla bituminosa durante el que mejoran sensiblemente sus propiedades. Dicho proceso podría acelerarse a través de la modificación física del plástico, mediante la adición de aditivos que han facilitado su incorporación a la mezcla bituminosa.

Tanto los plásticos reciclados como los modificados con agentes compatibilizantes se han incorporado y caracterizado a nivel de laboratorio para formar parte de las diferentes mezclas bituminosas que son habitualmente utilizadas en la mayor parte de nuestras carreteras.

En general, se ha comprobado que la incorporación de plásticos a las mezclas bituminosas mejora las prestaciones relativas a la resistencia conservada y a la deformación permanente, respecto a las mezclas de referencia. En el caso de la AC16 Surf, mezcla empleada en el tramo de prueba de investigación tecnológica, la mezcla aditivada con plástico reciclado (0,3% Rec-2, 4'2% betún sobre mezcla) se alcanza hasta:

- un 50% de mejora en la deformación permanente con la aditivación;
- una mejora considerable en el valor de resistencia conservada;
- un mayor módulo dinámico, y
- un comportamiento ligeramente inferior, aunque del orden, respecto a fatiga.

Una vez puesto en servicio el tramo, esta mejora en las prestaciones se ha visto corroborada con el mejor comportamiento en cuanto a las deflexiones dinámicas al cabo de un año, en relación al tramo ejecutado con la mezcla de referencia, sin plásticos. La Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía tiene previsto continuar la auscultación en los próximos años para el seguimiento de la evolución del tramo.

Este proyecto ha obtenido el premio (compartido con otro proyecto del Ayuntamiento de Madrid) a las *Mejores Prácticas Medioambientales* en la Jornada Nacional de ASEFMA de 2016 y a la Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía.

Agradecimientos

Los autores agradecen a FEDER-Unión Europea el apoyo financiero recibido a través del Proyecto *Plastic-Road* del Programa Operativo FEDER de Andalucía 2007-2013.

Bibliografía

- I. S. Gil Redondo y A. Caldeiro Jiménez. "Betunes modificados con polietileno reciclado, procedente del contenedor amarillo, estables al almacenamiento". Jornada Técnica de ASEFMA 2012, Madrid 2012.
- II. M.A. Blázquez. "Los residuos plásticos agrícolas". Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía, 2003.
- III. F.J. Navarro, F.J. Martínez Boza, P. Partal, C. Gallegos, J.C Bordado y A.C. Diogo. "Influence of temperature on the rheological behaviour of reactive polyurethane modified bitumens".
- IV. F.J. Navarro, P. Partal, F.J. Martínez Boza y C. Gallegos. J. "Appl Polym Sci n.º 104", pp 1683-1691. 2007.
- V. J.J. García, A. Cernuda, A. Recio y R. López. "Betunes modificados con polietileno en el tramo Chirivel (Almería), límite de provincia con Murcia. A-92 Norte". I Congreso Andaluz de Carreteras. Granada, 1998.
- VI. M.A. del Val. "Estudio de laboratorio para la caracterización como material de firmes de carreteras de los plásticos procedentes del tratamiento de residuos sólidos urbanos". Madrid, 1985.
- VII. Sabina, T.A. Khan, Sangita, D.K. Sharma y B.M. Sharma. "Performance evaluation of waste plastic/polymer modified concrete mixes". J Sci \$ Ind Research, vol 68, pp 975-979, 2009.
- VIII. "Evaluation of thermal and mechanical properties of recycled polyethylene modified bitumen", Polymer Testing, 27, 1005-1012. 2008.
- IX. "Envejecimiento en laboratorio de mezclas asfálticas fabricadas con betunes-polímeros. Aplicación al estudio de un caso". Revista Carreteras N.º 116, 2001.
- X. S. Gil Redondo. "Estudio de ligantes modificados con ceras mediante técnicas reológicas y calorimétricas". Revista Carreteras N.º 176, 2011.
- XI. A. Pérez-Lepe, F. Martínez Boza, C. Gallegos. "Reología y microestructura de betunes modificados con polietileno". Revista Carreteras N.º 142, 2005. ■