



ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL USO DE POLIESTIRENO RECICLADO COMO SUSTITUTIVO DEL BETÚN EN EL COMPORTAMIENTO DE HORMIGONES BITUMINOSOS Y MEZCLAS POROSAS.

Vila-Cortavitarte, Marta¹; Lastra-González, Pedro¹; Calzada-Pérez, Miguel.A²; Indaecoechea-Vega, Irune¹.

¹ Grupo de Investigación en Tecnologías de la Construcción, GITECO, ETSI Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria, Avd. de los Castros s/n CP39005, España, marta.vila@unican.es

² Grupo de Caminos Santander, GCS, ETSI Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria, Avd. de los Castros s/n CP39005, España, miguel.calzada@unican.es

Resumen

El objetivo principal de este proyecto es la reducción de la cantidad de betún utilizado en mezclas asfálticas. Esta reducción es importante tanto desde el punto de vista medioambiental, ya que los betunes comúnmente utilizados son subproductos del petróleo y por lo tanto un bien finito, como desde el punto de vista económico, ya que a pesar de suponer sólo un 4-5% en mezcla, supone aproximadamente el 60% del coste total material. Por otro lado, al sustituir este betún por poliestireno reciclado se consigue minimizar la retirada a vertedero de dichos residuos plásticos y además, al añadir el poliestireno por vía seca no se requiere de cambios sustanciales en los procedimientos actuales.

El estudio se planteó en base a dos mezclas convencionales, un hormigón bituminoso (AC) y una mezcla porosa (PA) sobre las que se utilizaron porcentajes de sustitución del 1% y el 2% de betún sobre mezcla.

Los principales objetivos del estudio, es decir, la reducción de betún y la reutilización de polímeros reciclados, se han visto satisfechos en las mezclas en las que se sustituyó el 1% de betún sobre mezcla por poliestireno y aunque, debido a los costes actuales del poliestireno reciclado utilizado, la rentabilidad económica no es la esperada, la rentabilidad social desde el punto de vista medioambiental es muy elevada. Se evitan las emisiones a la atmósfera derivadas de la extracción y procesado de los betunes para su puesta en obra y se reutilizan materiales que acabarían ocupando espacio en vertedero.

Palabras clave: *Mezclas asfálticas, betún, residuos poliméricos, valorización de residuos, vía seca.*

1. Introducción.

Una de las construcciones realizadas con mayor frecuencia y que consume mayor tonelaje de material anualmente son las carreteras. En Europa, el 91,9% de las carreteras pavimentadas se ejecutan con mezclas bituminosas, lo cual conlleva una gran demanda de ligante hidrocarbonado, material procedente del petróleo y por lo tanto finito (European Asphalt Pavement Assotiation, EAPA, 2015). La obtención y procesado de estos betunes para su uso arroja 0,048 KgCO₂e/Kg a la atmósfera, cifra muy elevada si tenemos en cuenta que para 1 Km de carretera se requieren 43,7 toneladas de betún y que esto supondría una emisión de 2,13 toneladas de CO₂e emitido (Hammond & Jones, 2011).

Por otro lado, dada su versatilidad los materiales plásticos son cada vez más y más consumidos en todo el globo y, por lo tanto, una gran cantidad de residuos plásticos son generados. Todos estos residuos, en torno a 25,8 Mt/año en Europa, pueden ser reciclados, revalorizados o llevados a vertedero. Tratando siempre de evitar el último de los caminos (European Asphalt Pavement Assotiation, EAPA, 2015).

Atendiendo a la manera en la cual se añaden los polímeros u otros aditivos a una mezcla bituminosa se diferencia entre la vía seca y la vía húmeda. Se denomina adición por vía húmeda (*wet way* o *wet process*) cuando el aditivo se mezcla previamente con el betún y ambos trabajan conjuntamente como ligante de la mezcla. Esta técnica implica el molido del material a añadir hasta granulometrías muy reducidas y un cuidadoso mezclado con el betún, en caliente, para su correcta distribución. Además, para este mezclado se requiere de material específico de homogenización. Existen numerosas investigaciones y avances en torno a esta metodología, especialmente centradas en NFUs aunque también con polímeros de otro tipo como son HDPE, LDPE, PVC, PP, PET y ABS. (Attaelmanan, Feng, & Al, 2011; Panda & Mazumdar, 2002; Punith & Veeraragavan, 2007; Reyes Lizcano, Madrid Ahumada, & Salas Callejas, 2007) .

Por su parte, las adiciones por vía seca (*dry way* o *dry process*) son aquellas en las que el aditivo se introduce directamente en el mezclador junto con los áridos y el betún. Este proceso modifica las propiedades de la mezcla bituminosa pero sin modificar el betún previamente (Lastra-González, Calzada-Pérez, Castro-Fresno, Vega-Zamanillo, & Indacochea-Vega, 2016; Mauskar, 2008; Shankar, Koushik, & Sarang, 2013). Además, el método por vía seca permite la adición de porcentajes mayores de aditivo sobre betún, lo que puede hacerlas económicamente más rentables (Desai & Vora, 2013). Esta técnica, a pesar de sus ventajas técnicas, está mucho menos desarrollada que la vía húmeda.

Este artículo reúne los resultados obtenidos de la *sustitución de betún por poliestireno* mediante *vía seca*, dada su simplicidad técnica, sobre dos tipos de mezclas bituminosas (AC-16 S y PA-16). Se sustituyeron porcentajes del 1% y el 2% sobre mezcla para estudiar la viabilidad de la sustitución del ligante por PS, evaluando los cambios en las características de las mezclas experimentales respecto de las mezclas de referencia.

2. Metodología.

En primer lugar, se realizó la dosificación y caracterización de las mezclas de referencia, tanto la AC como la PA, para posteriormente ir bajando el porcentaje de betún y sustituyéndolo, en peso, por las muestras de poliestireno con las que se contaba. Los porcentajes de sustitución utilizados fueron del 1% y 2% sobre mezcla o lo que es lo mismo, aproximadamente un 24% y un 48% respecto del betún total.

2.1. Materiales utilizados.

Los áridos utilizados fueron: ofita en la fracción comprendida entre los 2mm y los 16mm (peso específico: 2,930 g/cm³) y caliza por debajo de los 2mm (peso específico de 2,725 g/cm³)

Se utilizó poliestireno, plástico de naturaleza termoplástica, de tres tipos: Poliestireno reciclado procedente de perchas (HPS), poliestireno cristal (GPPS) y poliestireno reciclado de alto impacto (HIPS) cuyas imágenes y densidades, obtenidas mediante el ensayo EN 1097-2, se muestran en la **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Laj**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Figura 1 recoge su granulometría asociada, obtenida experimentalmente en laboratorio.

Como vemos en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** la única singularidad es la densidad del Poliestireno procedente de perchas, HPS, que es más baja que la esperable de un PS. Esto es debido a las impurezas presentes en la misma. Cabe destacar que todos los polímeros utilizados en esta investigación fueron cedidos por *AIMPLAS, Instituto Tecnológico del Plástico*.

Los ligantes utilizados han sido dos; betún convencional 50/70, con índice de penetración 57 (UNE-1426), temperatura de reblandecimiento 51,6°C (UNE-1427) y punto de fragilidad Fraass -13°C (UNE-125593) para las mezclas tipo hormigón bituminoso y betún modificado con polímeros (PMB 45/80-65), con índice de penetración 45-80, temperatura de reblandecimiento 65°C, punto de fragilidad Fraass de -15 °C y recuperación elástica mayor del 70% (UNE-13398), en el caso de las mezclas porosas.

Tabla 1. Muestras de PS utilizadas y densidades asociadas (EN 1183-1)

HPS	GPPS	HIPS
		
$0,89 \pm 0,16 \text{ g/cm}^3$	$1,048 \pm 0,083 \text{ g/cm}^3$	$1,024 \pm 0,076 \text{ g/cm}^3$

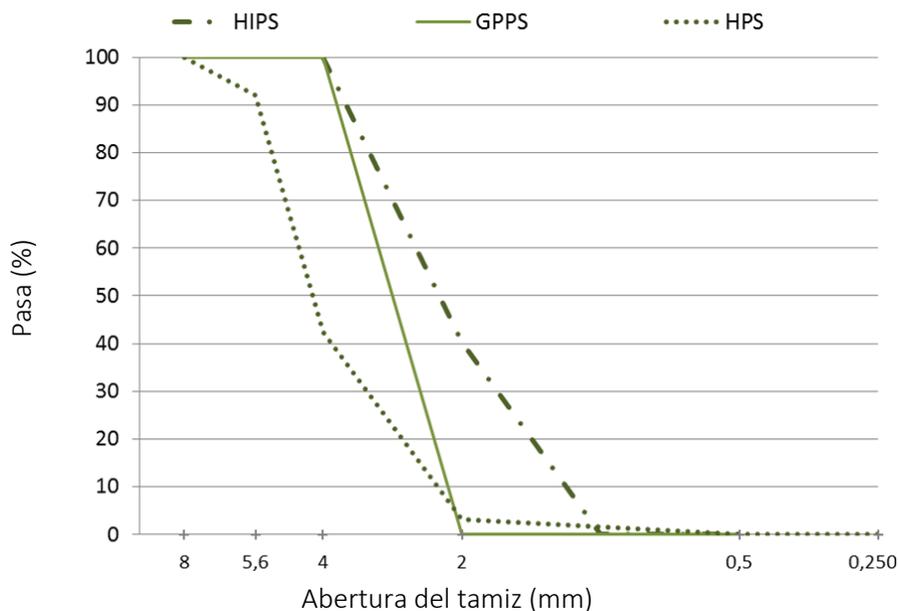


Figura 1. Granulometría de los PS utilizados.

2.2. Proceso de fabricación.

El proceso de fabricación se realizó con el betún a una temperatura de 155°C y los áridos a 170°C , temperatura a la que los polímeros no llegan a emitir gases tóxicos (Vasudevan, Ramalinga Chandra Sekar, Sundarakannan, & Velkennedy, 2012). En cuanto al proceso en sí, difiere del de una mezcla convencional únicamente en el proceso de mezclado. En dicho proceso, una vez dispuesto el árido grueso se espolvorea el PS en frío y se mezclan conjuntamente para posteriormente añadir el árido fino y removerlo para que el PS se distribuya uniformemente. Ya por último, se vierte el betún y se añade el filler como en cualquier mezcla convencional.

2.3. Ensayos llevados a cabo.

Los ensayos realizados coinciden con los contenidos en el Pliego de Prescripciones Técnicas particulares para la Construcción de Obras de Carreteras y Portuarias (PG-3): Ensayo de determinación de huecos en mezcla (UNE 12697-8) para ajustar el óptimo de betún necesario en mezcla, ensayo de sensibilidad al agua (UNE 12697-12) para cuantificar la pérdida de cohesión que provocaría la saturación por agua de las mezclas, el ensayo de rodadura (UNE 12697-22) para cuantificar las deformaciones plásticas y el ensayo cántabro de pérdida de partículas (UNE 12697-17) para analizar la resistencia a la abrasión de las mezclas.

Finalmente y para evitar errores derivados de un análisis meramente visual y cualitativo de los datos, todos y cada uno de los resultados obtenidos fueron sometidos a un análisis estadístico mediante

estadística inferencial, siguiendo los caminos indicados en la *Figura 2*, en función de la naturaleza de los datos. Para ello se utilizó el software MiniTab17.

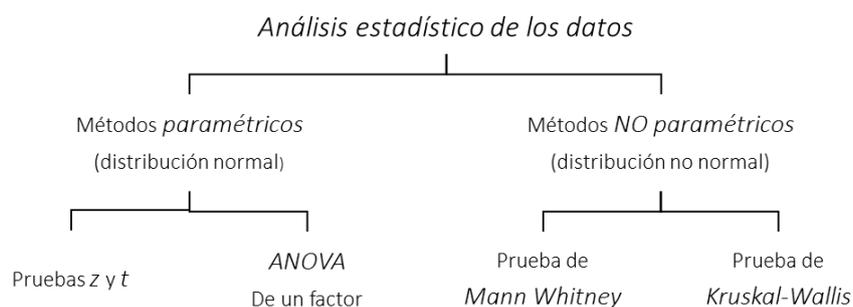


Figura 2. Pasos del estudio estadístico realizado.

3. Resultados y discusión.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** vemos las dosificaciones asociadas a las mezclas utilizadas como referencia en este artículo. Estas dosificaciones han servido como base para dosificar las mezclas experimentales en las cuales, la granulometría permanece inalterada mientras que se reduce el porcentaje de betún sobre mezcla y se aumenta, en la misma medida, el porcentaje de PS sobre mezcla.

Tabla 2. Dosificación de las mezclas de referencia (REF)

AC-16 S			PA-16		
Áridos		Betún 50-70/ mezcla	Áridos		Betún PMB/ mezcla
Ofita 16#8	33,9%	4,3%	Ofita 16#8	49,1%	4,3%
Ofita 8#4	24,6%		Ofita 8#4	30,0%	
Ofita 4#2	8,0%		Ofita 4#2	5,4%	
Caliza 2#0	32,7%		Caliza 2#0	12,6%	
Filler calizo	0,8%		Filler calizo	2,9%	

3.1. AC-16 S.

La sustitución del 1% de betún por PS supone la reducción de casi un 24% del betún utilizado. Se sustituyó este porcentaje por las tres muestras de PS y se vieron en todas ellas diferencias respecto de las mezclas de referencia, sin embargo, entre ellas las diferencias no son significativas desde el punto de vista estadístico dado que el p_{valor} obtenido mediante estadística inferencial no supera el 0,05. Las mezclas experimentales poseen densidades menores y por lo tanto un mayor índice de huecos (2,7%).

En el ensayo de sensibilidad al agua no se advierten diferencias respecto de las mezclas experimentales ($p_{valor} < 0,05$) teniendo un porcentaje de resistencia conservada en torno al 100% en todas ellas.

Las mayores diferencias se observan en el ensayo de rodadura donde, como vemos en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se reduce la pendiente registrada entre un 40% y un 60% respecto de la muestra de referencia, incrementando la resistencia frente a las deformaciones plásticas.

En el caso de las mezclas en las que se sustituyó el 2% de betún sobre mezcla (aproximadamente el 48% del betún total) el índice de huecos de la mezcla crecía en un 6%. En el ensayo de sensibilidad al agua de las mezclas se observaba una reducción de la resistencia a tracción, tanto en las probetas húmedas (36% respecto del valor de la mezcla de referencia) como en las secas (45%), siendo la resistencia conservada del 84%. En el ensayo de rodadura, las mezclas con 2% de sustitución obtuvieron alta

resistencia frente a las deformaciones plásticas, comparables a los obtenidos en las mezclas con sustitución del 1% del betún (Figura 3). Sin embargo, se observó en las probetas una falta de cohesión muy acusada, pudiendo ser desmenuzadas manualmente.

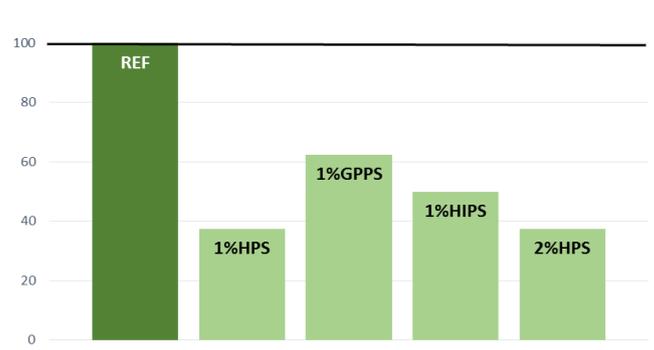


Figura 3. Pendiente del ensayo de rodadura respecto de la mezcla de referencia (%)

Con motivo de cuantificar dicha pérdida de partículas se realizó el ensayo cántabro de pérdida de partículas, ensayo no habitual en hormigones bituminosos. En el caso de las mezclas con 2% de sustitución se obtuvo un porcentaje inadmisiblemente de pérdida de partículas, en torno al 50% de la masa total de la probeta.

3.2. PA-16.

Basándonos en los resultados de las mezclas AC la sustitución del 2% de betún por PS fue descartada, por lo tanto, en el caso de las PA se realizó únicamente el estudio sobre mezclas con sustitución del 1% de betún por poliestireno. Utilizando en este un betún modificado con polímeros, PMB 85-60/20.

Se observó en dichas mezclas un índice de huecos comparable al de las mezclas de referencia. Dentro del ensayo de sensibilidad al agua se registraron diferencias significativas desde el punto de vista estadístico ($p_{valor} > 0,05$) sólo en las probetas húmedas, donde se reducía su resistencia a tracción indirecta en un 15%. En el ensayo de pérdida de partículas; las mezclas experimentales con sustitución superaban el porcentaje de masa perdida, respecto de las mezclas de referencia, pero sin registrarse diferencias significativas y además, en cumplimiento de la normativa vigente en mezclas PA.

4. Conclusiones.

Los principales objetivos del estudio, reducción de betún y reutilización de polímeros reciclados, se han visto satisfechos en las mezclas en las que se sustituyó el 1% de betún en mezcla por poliestireno. Sin embargo, se ha descartado la viabilidad de las mezclas cuya sustitución de betún por PS alcanzaba el 2% por su falta de cohesión.

Por otro lado, la rentabilidad económica de este trabajo se ve cuestionada por el elevado precio al que se comercializan los polímeros reciclados utilizados ya que, hoy en día, iguala prácticamente al precio del betún. Sin embargo, su rentabilidad social desde el punto de vista ambiental es muy elevada. Se evitan todas las emisiones a la atmósfera derivadas de la extracción y procesamiento de los betunes para su puesta en obra y se reutilizan materiales que potencialmente acabarían ocupando espacio en vertedero.

El método de incorporación del poliestireno por vía seca no modifica el proceso de fabricación significativamente y podría llevarse a cabo en cualquier instalación convencional. Favoreciendo además la utilización de los polímeros allí donde se producen. Además, se prevé que si ésta y otras tecnologías de reciclaje se pusieran en marcha, se provocaría la generalización y optimización de los procesos de obtención del plástico y por lo tanto, la bajada de precio de los mismos.

5. Referencias.

- Attaelmanan, M., Feng, C. P., & Al, A. (2011). Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2764-2770. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.037>.
- Desai, R., & Vora, N. (2013). Use of plastic in bituminous concrete mixes. *PARIPEX, Indian Journal of Research*, 2 (4), 176-180. ISSN: 2250-1991.
- European asphalt Pavement Assotiation, EAPA. (2015). EAPA, European asphalt pavement association. Retrieved from <http://www.eapa.org/>.
- Hammond, G., & Jones, C. (2011). *Inventory of carbon & energy (ICE) version 2.0*. (No. 7). University of Bath, UK: BSRIA.
- Lastra-González, P., Calzada-Pérez, M. A., Castro-Fresno, D., Vega-Zamanillo, Á, & Indacoechea-Vega, I. (2016). Comparative analysis of the performance of asphalt concretes modified by dry way with polymeric waste. *Construction and Building Materials*, 112, 1133-1140. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.156.
- Central Pollution Control Board, Ministry of Environment & Forest. (2008). *Performance evaluation of polymer coated bitumen built roads*. Parivesh Bhawan, East Arjun Nagar, Delhi: Programme Objective Series :PROBES/122/2008-2009.
- Panda, M., & Mazumdar, M. (2002). Utilization of reclaimed polyethylene in bituminous paving mixes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(6): 527-530. doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:6(527).
- Punith, V. S., & Veeraragavan, A. (2007). Behavior of asphalt concrete mixtures with reclaimed polyethylene as additive. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(6), 500-507. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:6(500).
- Reyes Lizcano, F., Madrid Ahumada, M., & Salas Callejas, S. (2007). Mezclas asfálticas modificadas con un elastómero (caucho) y un elastómero (tiras de bolsa de leche con asfalto 80-100) Revista *Infraestructura Vial, Universidad de Costa Rica* 17: 25-34.
- Shankar, A. U. R., Koushik, K., & Sarang, G. (2013). Performance studies on bituminous concrete mixes using waste plastics. *Indian Roads Congress*, 6, 1-11.
- Vasudevan, R., Ramalinga Chandra Sekar, A., Sundarakannan, B., & Velkennedy, R. (2012). A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way – application in construction of flexible pavements. *Construction and Building Materials*, 28(1), 311-320. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.031>.