



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Análisis de la influencia del uso de poliestireno reciclado como sustitutivo del betún en el comportamiento de hormigones bituminosos y mezclas porosas.

Trabajo realizado por:

Marta Vila Cortavitarte

Dirigido por:

Daniel Castro Fresno

Pedro Lastra González

Titulación:

**Máster Universitario en Ingeniería
Caminos, Canales y Puertos**

Santander, diciembre de 2016

TRABAJO FINAL DE MASTER

I. Agradecimientos.

En primer lugar me gustaría agradecer a Daniel Castro Fresno, director del Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO), el haberme brindado la oportunidad de realizar mi trabajo fin de master bajo su dirección y por haber facilitado mi acogida en el grupo de la mejor de las maneras.

En segundo lugar, agradezco a Pedro Lastra González, también director de este trabajo, su disponibilidad para ayudarme durante la ejecución del mismo. Estando disponible en todo momento aportando correcciones al documento escrito y por resolverme las dudas que me han ido surgiendo. De igual manera, agradecer a Miguel Ángel Calzada su disponibilidad en cuanto a la resolución de dudas.

Agradecer también a todo el personal de laboratorio con el que he tenido la suerte de trabajar, en especial a Javier Menocal Allende por haberme enseñado a realizar todos los ensayos de laboratorio necesarios para sacar adelante el trabajo. Por todas y cada una de tus explicaciones y por ese buen humor tan contagioso Javi, muchas gracias.

Muchas gracias a Daniel Jato Espino, por enseñarme a aplicar la estadística a la investigación en general y a este trabajo en particular. Pero no sólo por eso, por tu entera disponibilidad, por tu compañía durante las comidas y por todos y cada uno de tus consejos para que este trabajo saliese mejor, mil gracias.

Israel Rodríguez Fernández, tú mereces más que éstas líneas. Por haber estado desde que entramos a la escuela en 2009, por haber compartido nuestros éxitos en la escuela pero especialmente por haber estado también en los malos momentos, esos en los que yo no imaginaba que llegaría a presentar este trabajo. Me resulta complicado imaginar cómo hubiese sido mi paso por esta escuela sin ti ¿Y sabes qué? De eso sí que me alegro.

Todos los compañeros de GITECO merecen su espacio también aquí, no sólo por haberme aconsejado cuando les he preguntado algo sobre el trabajo, si no por esos ratos tan necesarios en los que, con un café de por medio, los temas de la conversación no giraban en torno al trabajo. Por las risas y por haberme hecho sentir una más dentro del grupo, muchas gracias.

A mis amigos, por haber estado siempre ahí y ayudarme a continuar y por último y no por ello menos importantes son todos los miembros de mi familia. Gracias por haberme hecho como soy y haber contribuido enormemente a que llegase hasta aquí.

II. Resumen.

Título: *Análisis de la influencia del uso de poliestireno reciclado como sustitutivo del betún en el comportamiento de hormigones bituminosos y mezclas porosas.*

Analysis of the influence of the use of recycled polystyrene as a substitute for bitumen in the behaviour of asphalt concrete and porous asphalt mixtures.

Autor: Marta Vila Cortavitarte

Directores: Daniel Castro Fresno

Pedro Lastra González

Convocatoria: Diciembre de 2016

Palabras clave: Mezclas asfálticas, hormigones bituminosos, mezclas porosas, reducción de betún, asfalto, residuos poliméricos, poliestireno, poliestireno cristal, poliestireno de alto impacto, adición por vía seca.

Planteamiento del problema y desarrollo de la solución adoptada.

El objetivo principal del proyecto es la reducción de la cantidad de betún utilizado en mezclas asfálticas. Es muy importante tratar de reducir el uso de los betunes no sólo desde el punto de vista medioambiental, ya que los comúnmente utilizados son subproductos del petróleo y por lo tanto, tóxicos y un bien finito; sino también desde el punto de vista económico, ya que, a pesar de suponer sólo un 4-5% del peso material, implican del orden del 60% del precio total de la mezcla y por lo tanto cualquier disminución en su uso supondría un ahorro sustancial en el grueso de un proyecto.

Por otro lado, se busca la minimización de retirada a vertedero de residuos plásticos. Las propiedades y la versatilidad de los materiales plásticos han motivado su uso para productos y aplicaciones de lo más variados; sin embargo, dicha proliferación en su fabricación y uso han hecho que también haya crecido el tonelaje de residuos con los que la sociedad debe lidiar, lo que implica un coste social y medioambiental muy elevado una vez dichos productos dejan de ser utilizados.

Motivado principalmente por estas dos razones y respaldado por las conclusiones del proyecto de investigación PolyMix, en el que se planteó la posibilidad de que el poliestireno trabajase como ligante, comenzó el trabajo que nos compete, en el que se estudia la viabilidad de reemplazar betún por partículas poliméricas de tipo poliestireno.

El estudio se planteó en base a dos mezclas convencionales de entre las incluidas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares para Obras de Carreteras y Puertos (PG-3), concretamente sobre un hormigón bituminoso (mezcla AC-16 S) y sobre una mezcla drenante (PA-16).

Los áridos utilizados para la dosificación de ambos tipos de mezcla fueron ofita para las fracciones superiores a 2mm y árido calizo para la fracción de árido inferior (incluida la fracción filler). En lo que respecta al ligante, se utilizó ligante convencional de penetración 50/70 en el caso de las dos mezclas y, además, un ligante modificado PMB 45/80-65 en las mezclas PA, ya que para este tipo de mezclas suelen utilizarse betunes modificados.

En cuanto a los poliestirenos añadidos, se utilizaron 3 muestras diferentes: poliestireno reciclado procedente de perchas (HPS), poliestireno reciclado de alto impacto (HIPS) y poliestireno cristal (GPPS), todos ellos proporcionados por AIMPLAS, Instituto Tecnológico del Plástico.

El proyecto se desarrolló en varias fases. En una primera etapa se dosificaron las mezclas iniciales en base a proporciones comúnmente utilizadas para los tipos de mezcla estudiados (AC y PA). Cabe destacar que la dosificación se ha realizado siempre en peso. Posteriormente, las mezclas fueron caracterizadas mecánica y dinámicamente para utilizar dichos resultados como valores de referencia.

La fase experimental comenzó en una segunda etapa en la que se reemplazó un 1% de betún sobre mezcla por los diferentes tipos de poliestireno con los que se contaba. Dicha etapa comenzó con la mezcla AC de referencia, manteniendo inalterada la granulometría de éstas últimas. Se realizaron sobre todas ellas los ensayos del PG-3 (determinación de huecos en mezcla, sensibilidad al agua y ensayo de rodadura) para valorar si estas mezclas experimentales, modificadas con PS, cumplían los requisitos mínimos establecidos por la normativa española, y si se conseguía mejorar o empeorar las propiedades de las mezclas de referencia. Además, para evaluar correctamente el impacto que supone reemplazar betún por PS, se fabricaron unas mezclas en las que retirando el 1% de betún no se realizaba el cambio por las partículas de PS; es decir, mezclas con déficit del 1% de betún en comparación con las mezclas de referencia.

En base a los resultados, se seleccionó con cuál de las tres muestras de poliestireno se continuaría la investigación. La muestra elegida fue el poliestireno reciclado procedente de perchas (HPS), que se consideró el más adecuado por las siguientes razones: obtuvo una densidad y un porcentaje de huecos en mezcla intermedio entre las opciones evaluadas, presentó mejores resultados frente al ensayo dinámico de rodadura y su método de obtención es presumiblemente más simple que el del otro tipo de muestras de PS utilizadas.

En la tercera etapa, ya únicamente con el poliestireno seleccionado, se realizó el análisis dinámico de la mezcla (ensayo de compactabilidad de las mezclas en máquina giratoria, ensayo de determinación de módulo dinámico por flexión en cuatro puntos y ensayo de fatiga). Se encontró también una respuesta suficiente de las mezclas en estos ensayos, incluso para utilizarse con la mayor de las categorías de tráfico contempladas por la normativa española, T00.

Posteriormente, se incrementó la retirada de betún sobre mezcla hasta un 2% dentro de las mezclas AC (aproximadamente un 50% del betún total). Se realizaron, de nuevo, todos los ensayos recogidos en el PG-3. Dentro de estas mezclas, se observó una falta de cohesión, especialmente en las esquinas de las probetas. Por este motivo, se descartó la sustitución de tal cantidad de betún y se propuso, dada la singularidad del proyecto, la realización del ensayo Cántabro de pérdida de partículas sobre las mezclas AC-16, ensayo que no está en normativa en este tipo de mezclas.

Por otro lado, se realizó el estudio sobre las mezclas PA. Cabe destacar que el estudio se realizó en paralelo para los dos betunes utilizados. Se estudió su comportamiento mecánico en primer lugar, retirando y sustituyendo el 1% de betún, aunque dentro de los ensayos dinámicos sólo se realizó el ensayo de trabajabilidad de las mismas. Debido a los resultados obtenidos en las mezclas AC, no se consideró necesario llegar a valores de sustitución del 2% de betún sobre mezcla dentro de las mezclas porosas.

Por último y no menos importante para la interpretación de los datos, se realizó un análisis mediante software estadístico en base a métodos y procedimientos propios de la estadística inferencial.

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. Se ha descartado la viabilidad de las mezclas cuya sustitución de betún por PS alcanzaba el 2% debido a la falta de cohesión percibida en las mismas.

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

El método de incorporación del poliestireno por vía seca tampoco incrementaría los costes respecto a la fabricación de mezclas convencionales, ya que no se necesitaría modificar el proceso significativamente y podría llevarse a cabo en cualquier instalación convencional. Además, en caso de que esta y otras tecnologías de reciclaje se pusieran en marcha, provocarían la generalización y optimización de los procesos de obtención del plástico y su bajada de precios.

En cuanto a las conclusiones particularizadas para cada tipo de mezcla podemos destacar las siguientes:

Hormigones bituminosos (AC-16 S):

Las mezclas con 1% de sustitución, aun teniendo un mayor porcentaje de huecos, cumplen con el resto de restricciones normativas recogidas en el PG-3, siendo realmente buenos los resultados obtenidos en los ensayos de rodadura donde se reducen a la mitad las deformaciones registradas. En los ensayos dinámicos vemos que los esfuerzos de compactación a los que deben someterse estas mezclas son mayores para alcanzar la densidad de las muestras de referencia. No obstante, se alcanzan valores de resistencia suficientes a pesar de su menor densidad. En los ensayos de módulo dinámico y fatiga, el resultado, sin ser sobresaliente, encaja perfectamente en el rango de resultados que se obtendrían en cualquier mezcla convencional AC.

Una vez se alcanza el valor de sustitución del 2%, se detecta una falta de cohesión en las mezclas provocada por la sustitución del ligante por PS, por lo que se concluye que habría que realizar ensayos extra para este tipo de mezcla, en relación a los que se establecen en el PG-3. Durante la ejecución de este trabajo suplimos esta deficiencia realizando el ensayo cántabro de partículas que figura en norma para mezclas drenantes.

Mezclas porosas (PA-16):

Vemos que, dentro de los ensayos de caracterización mecánica, al igual que sobre las mezclas AC, se obtienen resultados dentro de norma para la sustitución del 1% de betún por poliestireno, incluyendo también en este caso el ensayo de huecos. No obstante, se ha observado un comportamiento poco uniforme en los resultados de sensibilidad al agua en las mezclas con betún 50/70. Este problema, debido a contratiempos imprevistos con los equipos, está pendiente de estudiar en detalle.

En el ensayo de compactabilidad de las mezclas, único ensayo dinámico realizado sobre las muestras porosas, se observó que el incremento del esfuerzo de compactación producido sobre las AC no era tal sobre las mezclas porosas. Esto es debido a que al tratarse de mezclas de granulometría más abierta, con mayor porcentaje de huecos y menor cantidad de finos, requieren, en general, un menor esfuerzo de compactación.

En base a todas las actividades y los resultados analizados durante la ejecución del proyecto se detectaron los siguientes frentes abiertos, sobre los que se podría seguir trabajando en un futuro.

- En primer lugar, queda pendiente en el presente trabajo la caracterización dinámica completa de las mezclas porosas.

- En segundo lugar, comentar los estudios con los que podría continuarse este trabajo sin cambiar los materiales ni la finalidad del mismo; es decir, modificaciones al presente trabajo como: calcular el porcentaje óptimo de sustitución del PS, estudiando también la posibilidad de añadir porcentajes de poliestireno no equivalentes a los del betún que se retira; y estudiar las mezclas AC diseñadas con PS incrementando la energía de compactación para analizar el comportamiento de las mezclas con una proporción de huecos comparable a las convencionales.
- Y, por último, en lo que respecta a líneas de investigación derivadas del trabajo, se plantea la posibilidad de cambiar el material utilizado como sustitutivo. Por un lado, utilizando muestras poliméricas tipo poliestireno recuperadas directamente de los RSU y, por otro lado, mediante partículas de PS más pequeñas para poder analizar si hay diferencias en la interacción con el betún en función del tamaño de la partícula. Además, se plantea la posibilidad de utilizar este tipo de polímeros en mezclas con otros fines constructivos diferentes (no enfocadas al tráfico pesado), así como el ajuste y diseño de un método de análisis de la pérdida de partículas en hormigones bituminosos.

III. Abstract.

Title: *Analysis of the influence of using recycled polystyrene as a substitute for bitumen on the behaviour of bituminous concretes and porous mixtures.*

Análisis de la influencia del uso de poliestireno reciclado como sustitutivo del betún en el comportamiento de hormigones bituminosos y mezclas asfálticas.

Author: Marta Vila Cortavitarte

Supervisors: Daniel Castro Fresno

Pedro Lastra González

Call: Desembre de 2016

Keywords : Asphalt mixes, Polystyrene, Porous Asphalt, Asphalt concrete, High Impact Polystyrene, Crystal Polystyrene, polymeric wastes, dry way, dry method, scrim on bitumen, lower bitumen, Recycled Polystyrene.

Problem and development of the proposed solution.

The main objective is to scrimp up the amount of bitumen used in asphalt mixtures. This reduction is important not only from an environmental perspective (bitumen is a petrol compose so it is a toxic product and its reservoirs are limited), but also from an economical point of view (despite of being just 4-5% of total mixture's weight, it involves about 60% of its cost). That is why any save of bitumen usage would be a notable quantity of money saved.

On the other hand, this project is aimed at minimizing the amount of plastic wastes sent to landfills. Properties and versatility of plastic materials have fostered their use for a huge list of different products and applications; however, the growth in their fabrication and use has made the tonnage of this kind of wastes increase a lot. This involves high costs in both social and environmental terms, once these products are no longer useful.

This research started mainly due to the two previous reasons, but also supported by a previous project in which polystyrene could be used as a binder. In this project, the viability of using polystyrene as a substitute of bitumen is studied.

The study was carried out for two different type of asphalt mixtures. On the one hand, an asphalt concrete mixture (AC-16 S) and, on other hand, a porous asphalt mixture (PA-16).

The aggregates used for the dosage of both mixtures were ophite for sizes above 2mm and limestone for the lower particles (even filler). Two types of binder were used in this project: a conventional one (penetration 50/70) and a polymers modified binder (PMB 45/80-65). The second one was only used in the porous asphalt mixes, whilst the conventional one was used in both cases.

With respect to polystyrene, three different samples were used: Recycled polystyrene from Hangers (HPS), High Impact Recycled Polystyrene (HIPS) and General Propose Polystyrene or Glass polystyrene (GPPS). Every polymer sample was provided by AIMPLAS, the Institute of Plastic Technology of Valencia.

The Project was developed in several phases. Initial mixtures were dosed in the first stage according to common proportions used for the mixtures studied (AC-16 and PA-16). Dosage throughout the project has always been done by weight. Once dosed, the mixtures were tested both mechanically and dynamically, using the results of the tests as reference values for the study.

The experimental stage came just after having the reference values and it started by replacing 1% bitumen in mixture (about the 25% of all the bitumen) for the three polystyrene samples separately. This stage was only done for Asphalt Concrete mixtures. Every mechanical test was done according to Spanish standards for the three different mixtures, i.e. quantification of voids in mixture, water sensibility test and rutting test. Hence, we could determine whether the modified mixtures satisfied the requirements of the current regulation of asphalt mixes or not. A mixture with less bitumen than the reference but with no addition of polystyrene was dosed, in order to determine the real impact that PS makes in mixtures.

According to the results obtained so far, the best plastic sample among the three considered was selected. The selected one was the HPS due to the following reasons: its void content and density were within the range of the values obtained for the other samples studied, whilst it had the best performance in the rutting test (although every result were good) and its preparation is supposed to be simpler than that associated with the other samples under consideration.

Once the type of polystyrene was selected, the third stage consisted of conducting the dynamical analysis of the mixture (UNE-EN 12697, UNE-EN 12697-24. Annex D y UNE-EN 12697-26. Annex B). The results proved that the mixtures had a good response in relation to this tests too.

The next step focused on increasing the removal of bitumen from the mixture up to 2% in the AC mixtures (about 50% of the total amount of bitumen). Again, all the tests included in the PG3 were carried out. The results for these mixtures revealed a lack of cohesion, especially in the corner point of the samples. For this reason, the replacement of such a percentage of bitumen was discarded and the application of the Cántabro test on the AC mixtures was proposed instead.

Moreover, the PA mixtures were studied in parallel for the two types of bitumen used. Their mechanical behavior was analyzed replacing 1% of bitumen, although their dynamical response was only studied through the workability test. According to the results obtained for the AC mixtures, the replacement of 2% of bitumen was not considered necessary for the porous mixtures.

Last but not least for the discussion of the data, inferential analyses were done using a statistical software package to validate the results.

Conclusions.

The main objectives of the research, which were the reduction of bitumen and the reuse of recycled polymers, have been met for the mixtures in which 1% of bitumen was replaced by PS. The viability of the mixtures whose replacement of bitumen by PS reached 2% was discarded due to their lack of cohesion.

Furthermore, the cost effectiveness of this research is compromised by the high price at which the recycled polymers are sold after processing, which nowadays is almost equal to that of the bitumen. However, its social profitability is very high, especially from the environmentally point of view. All the emissions to the atmosphere derived from the extraction and processing of bitumen are avoided and materials that would potentially be sent to a landfill are reused.

The method of incorporating the PS by dry way would not increase the costs in relation to the manufacturing of conventional mixtures either, since the process would not require significant modifications and might be

carried out at any conventional facility. Besides, the emergence of this and other recycling technologies would result in the generalization and optimization of the processes required to obtain plastics and their price decrease.

Regarding the specific conclusions for each type of mixture, the most remarkable ones were the following:

Asphalt concrete mixtures (AC-16 S):

Even having a higher percentage of voids, those mixtures in which 1% of the bitumen was replaced by PS satisfied the standard requirements. The results obtained for the rutting test were the best ones so far due to the reduction of 50% in the registered deformation. The dynamical tests revealed that a higher stress is needed to achieve the same density that in the reference samples. However, the values of resistance reached were enough despite their less density. The results for the dynamical modulus and fatigue fitted perfectly in the range of values that would be obtained in any conventional AC mixture.

Once the replacement of 2% was reached, a lack of cohesion in the mixtures is detected due to the substitution of bitumen by PS, which means that further tests would be required for this type of mixture, in relation to those included in the PG-3. This deficiency was overcome carrying out the Cántabro test considered in the standard for porous mixtures.

Porous mixtures (PA-16):

Like in the AC mixtures, the results obtained for the mechanical tests met the requirements of the standards when replacing 1% of bitumen by S, including in this case the void test as well. Nevertheless, the results for the water sensitivity test in the mixtures with 50/70 bitumen were not uniform. This fact needs could not be studied in detail due to unforeseen setbacks with the equipment.

The workability test, which was the only dynamical test conducted for the porous mixtures, revealed that the increase in compaction required for the AC was not necessary in the case of the porous mixtures. This circumstance is a result of the open gradation of porous mixtures, which have greater percentage of voids and less amount of fine aggregates and, therefore, require less compaction.

Based on all the activities and results analyzed throughout the project, the following future lines of action were identified to give continuity to this research:

- To accomplish the comprehensive dynamical characterization of porous mixtures.
- To analyze the studies without changing the materials and their purpose with which this research might continue, i.e. modifications of the present work like: calculate the optimal percentage of replacement of PS, considering the possibility of adding percentages of polystyrene not equivalent to those of the bitumen which is replaced; and study AC mixtures designed with PS increasing the energy of compaction to analyze their behavior with a void content comparable to the reference ones.
- To pose the chance of changing the material used as a substitute. On the one hand, using polystyrene samples directly recycled from MSW and, on the other hand, through smaller PS particles to analyze whether there are differences in the interaction with the bitumen according to the particle size. Finally, the possibility of using this kind of polymers in mixtures with other purposes than heavy traffic is also considered as a future line of research, as well as the design of a method to analyze the loss of particles in asphalt concretes.

IV. Índice.

I.	Agradecimientos.....	iii
II.	Resumen.....	v
III.	Abstract.	ix
IV.	Índice.	1
V.	Índice de tablas.....	3
VI.	Índice de gráficos.....	5
VII.	Índice de ilustraciones.....	5
1.	Introducción.	8
1.1.	Antecedentes.....	8
1.2.	Objetivos.....	8
2.	Estado del arte.....	10
2.1.	Mezclas Bituminosas AC y PA.....	10
2.1.1.	Mezclas bituminosas en caliente.....	10
2.1.2.	Mezclas bituminosas para capas de rodadura.	10
2.2.	Residuos plásticos. Producción y utilización.	13
2.2.1.	Poliestireno utilizado.....	13
2.3.	Adición de polímeros en mezclas bituminosas.	14
2.3.1.	Adición por vía húmeda.....	14
2.3.2.	Adición por vía seca.....	15
2.4.	Betún utilizado en mezclas asfálticas y motivación para reducir de su consumo.....	16
3.	Metodología de la investigación.	18
3.1.	Proceso de fabricación.	18
3.2.	Materiales utilizados.	19
3.2.1.	Áridos.....	19
3.2.2.	Ligante.	20
3.2.3.	Poliestirenos añadidos.....	20
3.3.	Ensayos realizados.....	21
3.3.1.	Ensayos de dosificación de las mezclas.	21
3.3.2.	Ensayos de caracterización dinámica de las mezclas.	24
3.4.	Análisis estadístico de los datos.	25
4.	Resultados y discusión de los mismos.....	28
4.1.	Mezclas tipo AC-16 S.	28
4.1.1.	Mezclas tipo AC-16 con sustitución del 1% de betún.....	28
4.1.2.	Mezclas de tipo AC-16 con sustitución del 2% de betún.....	34

4.2.	Mezclas tipo PA-16.	36
4.2.1.	Mezclas tipo PA-16 con sustitución del 1% de betún.....	37
5.	Conclusiones generales.	42
5.1.	Conclusiones particulares.....	42
5.2.	Futuras líneas de investigación.	43
6.	Referencias.	46

V. Índice de tablas.

Tabla 1. Precio material AC-16 S para 100 m de carretera y porcentaje respecto del gasto total.	16
Tabla 2. Precio material PA-16 para 100 m de carretera y porcentaje respecto del gasto total.	16
Tabla 3. Características de los betunes utilizados para el proyecto.....	20
Tabla 4. Densidades de los diferentes tipos de PS utilizados.....	21
Tabla 5. PG-3 Tabla 542.13/543.10.....	21
Tabla 6. Especificaciones según PG-3 para el ensayo de sensibilidad al agua.	22
Tabla 7 . Pendiente media de deformación en Pista. Tabla 543.11 PG-3	22
Tabla 8. Limitaciones del ensayo cántabro de pérdida de partículas	23
Tabla 9. Explicación tablas de doble entrada	26
Tabla 10. Dosificación AC-16 S de Referencia	28
Tabla 11. Resultados AC-16 S de referencia	28
Tabla 12. Dosificación AC-16 S con sustitución por 1%PS*	29
Tabla 13. Dosificación AC 16 S sin 1% de betún.	29
Tabla 14. Resultados AC-16 S con sustitución por 1% PS*	29
Tabla 15. p valores de las mezclas SIN 1%, 1%HPS y 2%HPS de los ensayos marcados por el PG-3.	30
Tabla 16. Resultados de las AC-16 S con sustitución del 1% por PS.	31
Tabla 17. p valores ensayo cántabro. Mezclas REF, SIN1% y 1%HPS	31
Tabla 18. Resultados del Ensayo de módulo dinámico.....	33
Tabla 19. Resultados del ensayo de resistencia a la fatiga.	33
Tabla 20. p valores de las mezclas REF y 1%HPS de los ensayos dinámicos.....	33
Tabla 21. Dosificación AC-16 S con sustitución por 2%PS.	34
Tabla 22. Dosificación AC-16 S sin 2% de betún.....	34
Tabla 23. Resultados de las AC-16 S con sustitución del 2% por PS.	34
Tabla 24. P valores de las mezclas REF, 1%HPS y 2%HPS de ensayos recogidos en el PG-3.	35
Tabla 25. Resultados de las mezclas AC-16 S con sustitución del 2% de betún.....	36
Tabla 26. p valores ensayo cántabro. Mezclas REF, SIN1%, SIN2%, 1%HPS y 2%HPS.....	36
Tabla 27. Dosificación PA 16 de Referencia.	36
Tabla 28. Resultados de ensayos mecánicos sobre las mezclas PA-16 de referencia.....	37
Tabla 29. Dosificación de mezcla PA-16 con sustitución del 1% de betún por PS	37
Tabla 30. Dosificación de mezcla PA-16 sin 1% de betún.	37

Tabla 31. Resultados de los ensayos mecánicos de las probetas PA-16 con sustitución del 1% de betún PMB por HPS	37
Tabla 32. p valores de las mezclas PA-16 con betún modificado con polímeros PMB.	38
Tabla 33. Valoración estadística del ensayo de compactabilidad PA-16 REF con PMB.	39
Tabla 34. Resultados de los ensayos mecánicos de las probetas PA-16 con sustitución de 1% de betún 50/70 por HPS	39
Tabla 35. p valores de las mezclas PA-16 con betún convencional 50/70.....	40
Tabla 36. Valoración estadística del ensayo de compactabilidad PA-16 REF con 50/70.	40

VI. Índice de gráficos.

<i>Gráfico 1. Variación de los valores de la pendiente en el ensayo de rodadura.</i>	30
<i>Gráfico 2. Resultados de ensayo de compactabilidad de las mezclas.</i>	32
Gráfico 3. Variación de los valores de la pendiente en el ensayo de rodadura.	35
Gráfico 4. Resultados del ensayo de compactabilidad de las mezclas PA-16 con betún PMB.	39
Gráfico 5. Ensayo de compactabilidad de las muestra PA-16 con 50/70.....	40

VII. Índice de ilustraciones.

Ilustración 1. Estructura de una mezcla AC.....	11
Ilustración 2. Huso granulométrico para la mezcla AC-16 S.....	11
Ilustración 3. Estructura de una mezcla PA.....	12
Ilustración 4. Huso granulométrico para la mezcla PA-16	12
Ilustración 5. Adición del poliestireno por vía seca dentro del proyecto.....	19
Ilustración 6. Muestras de Poliestireno utilizadas en el proyecto.	20
Ilustración 7. Granulometría de los distintos tipos de PS (UNE EN 933-2)	21
Ilustración 8. Probetas compactadas tipo Marshall	21
Ilustración 9. Fases del Ensayo de Sensibilidad al agua	22
Ilustración 10.. Ensayo de Pista.	23
Ilustración 11. Ensayo Cántabro de pérdida de partículas.....	23
Ilustración 12. Ensayo de flexión en cuatro puntos. (A: Probetas; B y C: Máquina de ensayo).....	24
Ilustración 13. Ensayo de compactabilidad de las mezclas (A: máquina giratoria; B: Probetas resultantes) ...	25
Ilustración 14. Esquema resumen del análisis mediante estadística inferencial.	26
Ilustración 15. Disgregación de las probetas (A: probetas de pista; B: probetas Marshall).....	35

1 Introducción.

1. Introducción.

1.1. Antecedentes.

El siguiente trabajo, realizado en las instalaciones de la Universidad de Cantabria, es parte de la línea de investigación e innovación en la construcción de firmes llevada a cabo en los últimos años por el Grupo de Investigación en Tecnología de la Construcción, GITECO y el Grupo de Caminos Santander, GCS.

Durante su amplia trayectoria dichos departamentos han realizado, y están realizando, proyectos enfocados a una mayor sostenibilidad de las obras de nueva construcción mediante el uso de materiales reciclados o menos nocivos para el medioambiente que los convencionales. Prueba de ello son, por ejemplo, el proyecto GREENROAD, el proyecto DURABROAD o el proyecto POLYMIX. Proyectos descritos brevemente a continuación:

- GREENROAD, Fostering green public procurement in road construction through the validation of high-performance asphalt eco-mixtures: Proyecto basado en el diseño de diferentes mezclas bituminosas compuestas por áridos reciclados y material fresado (en torno al 90%), betún modificado con caucho procedente de neumáticos fuera de uso, y aditivos (ceras) para lograr su fabricación a una menor temperatura.
- DURABROAD, Cost-effective DURABLE ROADS by green optimized construction and maintenance: basándose en el uso de la nanotecnología busca diseñar un betún experimental con propiedades mejoradas, dirigiéndose también a la optimización de técnicas de reciclaje en la construcción. Su objetivo principal es la reutilización de materiales, el mantenimiento y la rehabilitación de firmes de una forma más segura, ecológica y duradera.
- POLYMIX, Polymer wastes in asphalt mixes: a way to increase sustainability of roads infrastructures: proyecto que gira en torno al empleo de polímeros procedentes de residuos plásticos y neumáticos fuera de uso, incorporados a la mezcla bituminosa para mejorar sus características mecánicas.

Tras los estudios realizados en el proyecto PolyMix se planteó la posibilidad de que el poliestireno, PS, trabajase como ligante. Esto motivó el caso del trabajo que nos compete, donde se estudia la viabilidad de reemplazar un porcentaje del betún sobre la mezcla por polímeros de tipo Poliestireno. Es por esto que el presente trabajo puede entenderse como un paso más allá del Proyecto PolyMix.

1.2. Objetivos.

El presente trabajo gira en torno al objetivo de reducir el contenido de betún utilizando poliestireno, sin que las propiedades mecánicas se vean afectadas negativamente.

Se plantea el estudio en base a dos mezclas convencionales, una AC 16 S y una PA 16. Los poliestirenos de sustitución que utilizaremos son tres: Poliestireno reciclado procedente de perchas (HPS), poliestireno Cristal (GPPS) y Poliestireno reciclado de alto impacto (HIPS). El proveedor en todos los casos ha sido AIMPLAS, Instituto Tecnológico del Plástico. El carácter reciclado de los polímeros persigue un segundo objetivo, la revalorización de dichos productos y evitar con ello que acaben en vertedero.

Cabe destacar la importancia de la reducción de betún, no sólo desde el punto de vista medioambiental, ya que los betunes comúnmente utilizados son subproductos del petróleo, y por lo tanto tóxicos y un bien finito, sino también desde el punto de vista económico ya que suponen aproximadamente el 60% del precio de la mezcla, por lo que cualquier disminución en su uso supondría un ahorro sustancial en proyecto.

2 Estado del arte.

2. Estado del arte.

2.1. Mezclas Bituminosas AC y PA.

2.1.1. Mezclas bituminosas en caliente.

Se define como mezcla bituminosa en caliente la combinación de un ligante hidrocarbonado, áridos y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante. Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los áridos (excepto, en algunos casos el polvo mineral u otros aditivos) y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la temperatura ambiente.

Existen una amplia variedad de combinaciones entre los materiales que componen una mezcla bituminosa (cantidad, tipo, etc.) sin embargo, las proporciones se encuentran habitualmente en torno al 95% de áridos y el 5% de ligante. Siendo el ligante, a pesar de su reducida proporción respecto de la mezcla, la porción más cara y menos respetuosa con el Medio Ambiente dado su procedencia del petróleo.

Nos encontramos mezclas bituminosas principalmente en el sector transporte (carreteras, aeropuertos, etc.), pero también podemos encontrar su uso en recreación (pistas de tenis, carriles bici, pistas de juegos, etc.), industria (puertos, naves industriales, etc.) o edificación (pavimentos).

De todos los usos posibles, parece evidente que el más importante, en cuanto a volumen de producción se refiere, es el uso en pavimentación de carreteras. En Europa, más del 90% de las carreteras utilizan firmes compuestos por mezclas bituminosas, en detrimento de otras tipologías de firmes, como pueden ser los firmes rígidos (fabricados con Hormigón).

Según datos proporcionados por la “European Asphalt Pavement Association (EAPA)”, en 2013, se produjeron en Europa 277,3 millones de toneladas de mezclas bituminosas en caliente (Hot and Warm Mix Asphalt) para su uso en carreteras, frente a los 318,1 millones de toneladas producidos en Estados Unidos ese mismo año. En España, pese al desplome de los últimos años, la producción se situó en 13,2 millones de toneladas, siendo el séptimo país con más producción de toda Europa.

Con más de 5 millones de kilómetros de carreteras construidos en toda Europa, y pese a que no se construyera ningún nuevo tramo de carretera, solamente con la conservación y renovación del firme de las carreteras existentes se precisaría de una producción considerable de mezcla asfáltica. Dicha producción viene acompañada de un importante desembolso económico y una enorme demanda de materiales, tanto de áridos como de ligante.^{1,2}

2.1.2. Mezclas bituminosas para capas de rodadura.

En una sección de firme, si hubiese que destacar una capa por encima del resto sería la capa de rodadura. Es esta capa la que se encuentra en contacto directo con los vehículos, y por tanto la que recibe las sollicitaciones de forma más directa. Además, debe mantener unas características mínimas, no solo estructurales, sino también funcionales, y por ello, las exigencias serán mayores que las impuestas al resto de capas, con el objetivo de garantizar un buen comportamiento del pavimento.

La normativa Española permite el uso de tres tipos distintos de mezclas bituminosas para la capa de rodadura, las mezclas tipo hormigón bituminoso (AC), las mezclas porosas (PA) y las mezclas discontinuas (BBTM). Cada tipo de mezcla tiene sus peculiaridades y se ajusta mejor o peor a unas determinadas condiciones, en este sentido, en cada caso será necesario evaluar que tipología es la más apropiada. Según la “European Asphalt Pavement Association (EAPA)”, el 51,9% de la producción de mezclas bituminosas en

España es utilizado en capas de rodadura, siendo el 91,9% mezclas de tipo hormigón bituminoso, el 7,7% mezclas de tipo discontinuo y el 0,4% restante, mezclas porosas. ²

El presente trabajo se ha realizado en base a las mezclas tipo AC y tipo PA cuyas características y granulometrías asociadas más relevantes son las siguientes:

2.1.2.1. Hormigón Bituminoso (AC).

Son mezclas cerradas con un porcentaje de huecos entre el 4% y el 6%, son por lo tanto mezclas impermeables. Para capas de rodadura su espesor está limitado entre 4cm y 5cm, aunque pueden tener espesores mayores en capas de base o intermedias. Pueden utilizar tanto betún convencional como modificado, y la proporción mínima de betún en peso sobre la masa es del 4,5% para mezclas con áridos cuya densidad media sea de 2,65 gr/cm³. En las siguientes ilustraciones (Ilustración 1 e Ilustración 2) vemos la estructura y un uso granulométrico tipo de esta clase de mezclas.

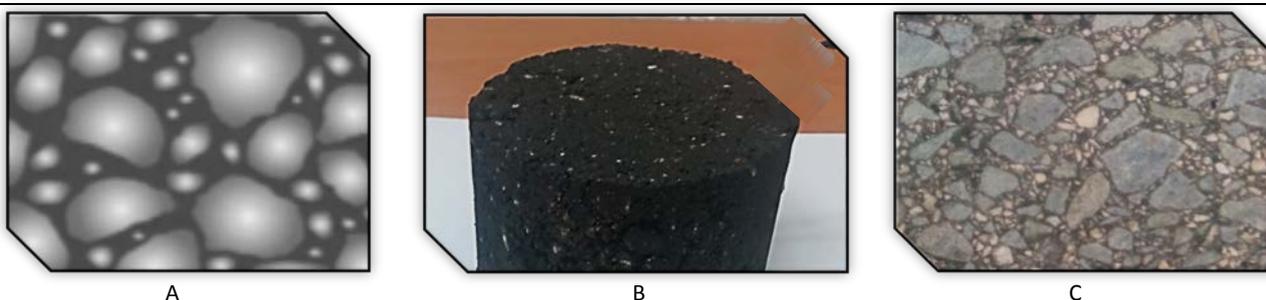


Ilustración 1. Estructura de una mezcla AC

(A: estructura teórica²; B y C: probetas fabricadas en laboratorio)

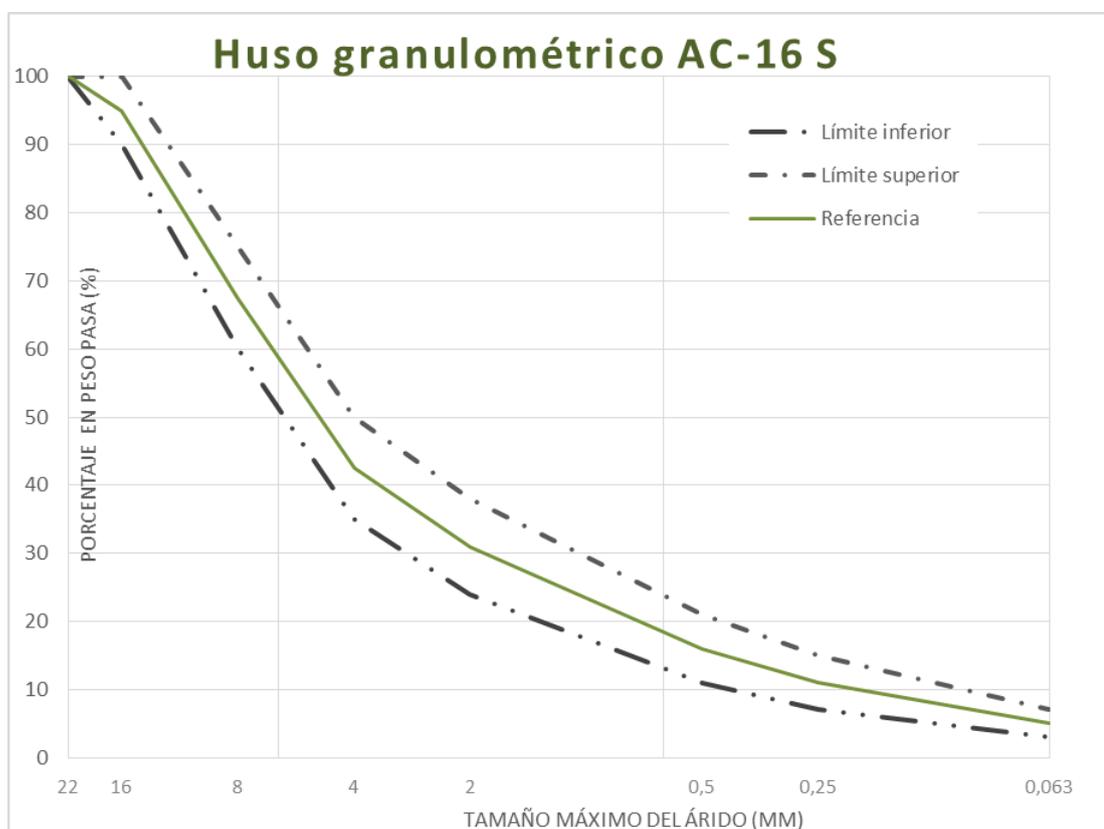


Ilustración 2. Huso granulométrico para la mezcla AC-16 S

2.1.2.2. Mezclas Porosas (PA).

La característica principal de estas mezclas es su alto contenido de huecos (superior al 20%), esto provoca que el agua drene por su interior. Convirtiéndolas en mezclas más seguras con una mayor resistencia al deslizamiento, una mayor reducción del espray que produce el agua al paso de los vehículos y una reducción significativa del ruido del tráfico. A pesar de esto hay que destacar que también tienen una menor durabilidad.

Generalmente se emplean en zonas lluviosas templadas, ya que las heladas continuadas pueden provocar su fragmentación. Se utilizan sólo como capa de rodadura y generalmente con betún modificado con polímeros para garantizar una buena cohesión a pesar de los huecos. Su proporción mínima de ligante sobre la masa total de la mezcla es del 4,3% (para áridos con una densidad media de 2,65 gr/cm³) y tienen un espesor de entre 4cm y 5cm. A continuación podemos observar (Ilustración 3 e Ilustración 4) la estructura y la granulometría asociada que presentan este tipo de mezclas. A continuación podemos observar (Ilustración 3 e Ilustración 4) la estructura y la granulometría asociada que presentan este tipo de mezclas.

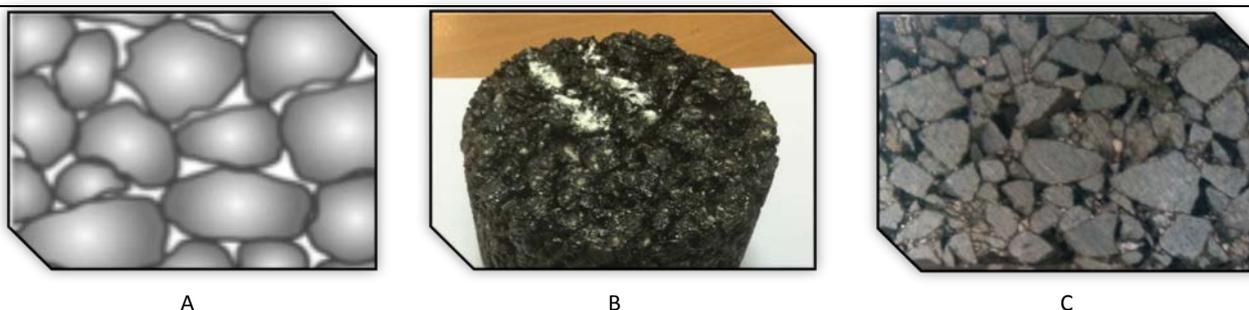


Ilustración 3. Estructura de una mezcla PA.

(A: estructura teórica²; B y C: probetas fabricadas en laboratorio)

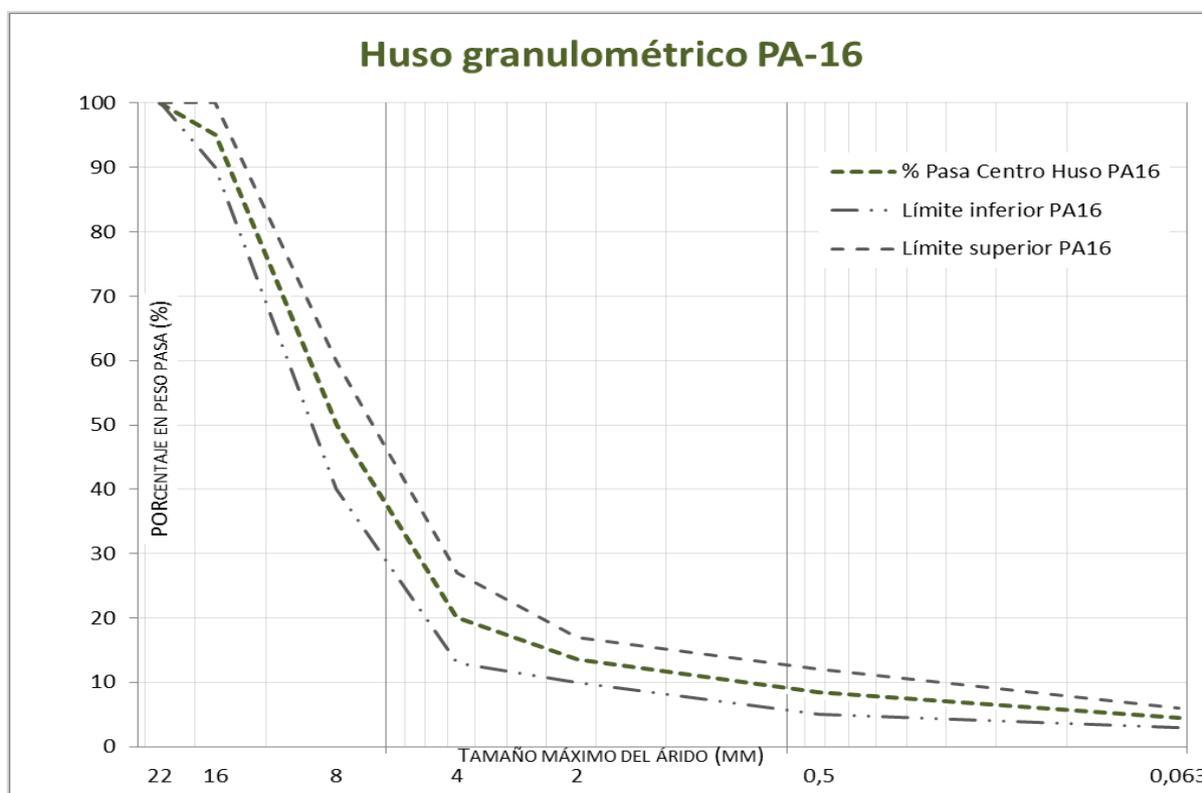


Ilustración 4. Huso granulométrico para la mezcla PA-16

2.2. Residuos plásticos. Producción y utilización.

Las propiedades y la versatilidad de los materiales plásticos han motivado su uso para productos y aplicaciones de lo más variados, sin embargo, dicha proliferación en su fabricación y uso han hecho que también haya crecido el tonelaje de residuos plásticos con los que la sociedad debe lidiar, es decir, un coste social y medioambiental muy elevado una vez dichos productos dejan de ser utilizados.

En 2014 aproximadamente 47,8 millones de toneladas de plástico al año fueron consumidas en Europa, de las cuales el 3,4% corresponde a la demanda española. Dentro de esta demanda el poliestireno (PS) se coloca en cuarta posición suponiendo un 7% del total de la demanda a nivel global, por detrás del polietileno, el polipropileno y el PVC. De entre todo lo demandado se convierten en desecho, y por tanto material susceptible de ser reciclado, revalorizado como energía o depositado en vertedero, 25,8 millones de toneladas al año. Los porcentajes medios a nivel europeo para cada uno de los tres fines mencionados son 29,7%, 39,5% y 30,8% respectivamente mientras que en España son 34%, 16% y 50%.³

En base a estos datos, y a pesar de que se haya mejorado mucho desde 2006, se observa que España supera casi en un 70% a la media europea en envío de residuos plásticos a vertedero. Por tanto la necesidad de mejorar este dato justifica el estudio de cualquier aplicación económicamente más ventajosa que las existentes de los materiales plásticos residuales.

2.2.1. Poliestireno utilizado.

El poliestireno (PS) es un polímero termoplástico que se obtiene de la polimerización del estireno monómero y que se reblandece a partir de los 90°C para convertirse en un líquido viscoso en torno los 140 °C.

Existen cuatro tipos principales: el PS cristal o GPPS (del inglés: General Purpose Polystyrene), que es transparente, rígido y quebradizo; el poliestireno de alto impacto o HIPS (del inglés: High Impact Polystyrene), resistente al impacto y opaco blanquecino, el poliestireno expandido o EPS (del inglés: Expandable Polystyrene, muy ligero, y el poliestireno extruido, similar al expandido pero más denso e impermeable. A continuación definiremos los dos tipos de poliestireno que competen a éste trabajo.

2.2.1.1. Poliestireno Cristal (GPPS).

El poliestireno Cristal es el producto de la polimerización del estireno puro y se denomina a su vez. Es un sólido transparente, duro pero frágil. Se caracteriza por ser vítreo por debajo de 100 °C y fácilmente moldeable por encima de dicha temperatura.

2.2.1.2. Poliestireno reciclado de alto impacto (HIPS).

El poliestireno de alto impacto es el resultado de la adición de hasta un 14% de polibutadieno, a la polimerización del estireno puro. Se obtiene como resultado un material más resistente y menos quebradizo que soporta mayores impactos que el PS Cristal sin romperse. Su desventaja reside en que éste material es más opaco y por lo tanto menos estético para ciertos usos. En nuestro caso, no es ningún problema.

En el caso de éste proyecto, como ya expuse anteriormente, todos los plásticos utilizados proceden de AIMPLAS, Instituto Tecnológico del Plástico. Cabe destacar que se nos proporcionaron los plásticos pero no su caracterización por lo que se decidió calcular su densidad⁴ así como su granulometría en laboratorio.

2.3. Adición de polímeros en mezclas bituminosas.

Cada vez es más habitual añadir a las mezclas bituminosas un tercer componente con el que se mejore alguna de sus características físicas y mecánicas. Atendiendo a la manera en la cual se añaden estos materiales diferenciamos entre la adición por vía húmeda o la adición por vía seca ^{1,2}De igual manera el caso de la adición de polímeros plásticos a las mezclas bituminosas está siendo cada vez más desarrollado atendiendo a la, también cada vez más creciente, necesidad de reutilización y reciclaje de estos materiales. Todo ello a consecuencia de la extensión de su uso para la fabricación de objetos cuya vida es limitada (embalajes de todo tipo, juguetes, etc.). Dichos polímeros son potencialmente adecuados para la adición en mezclas asfálticas dado que no desarrollan ningún gas tóxico por debajo de los 180°C, temperatura que no se alcanza durante la fabricación de las mezclas llevadas a cabo. ⁵

2.3.1. Adición por vía húmeda.

Se denomina vía húmeda, “wet way” o “wet process”, cuando el aditivo, se mezcla previamente con el betún para su posterior empleo como ligante. En éste campo se han realizado numerosas investigaciones y avances. En el campo de la reciclabilidad de polímeros se han centrado especialmente en la modificación de betunes con caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU).

En el año 2007 se ensayó una mezcla bituminosa para capa de rodadura modificada con caucho proveniente de NFU, con poliestireno (PE) obtenido a partir de bolsas de plástico, y con el caucho y el PE de forma conjunta. Concluyeron que las menores deformaciones plásticas y el módulo dinámico más alto se obtenían modificando el betún únicamente con el Polietileno, mientras que la adición de caucho empeoraba el comportamiento plástico de la mezcla de referencia⁶.

En cuanto a la adición de polímeros reciclados como modificadores del betún, en la University College de Dublín se realizaron ensayos con los plásticos más consumidos en Irlanda (HDPE, LEPE, PVC, PP, PET y ABS). De estos ensayos se dedujo que, de entre todos esos residuos plásticos, eran ambos tipos de polietileno los más adecuados, ya que mejoraban los resultados frente a betunes convencionales aunque no frente a los betunes modificados por polímeros vírgenes. ⁷

Existen, además del anterior, varios artículos en los que se modifica el betún con PE procedente de los residuos domésticos, concretamente de bolsas de plástico, en los que éstas se adicionaban al betún a una temperatura de entre 160°C y 200°C. Se obtuvieron en estos casos mejores respuestas frente al envejecimiento del betún y frente a cargas estáticas ^{8,9}. De la misma manera, otros autores encontraron sobre probetas tipo Marshall un aumento del módulo resiliente, del índice de resistencia conservada en ensayos de sensibilidad al agua y de la resistencia a fatiga¹⁰. A pesar de lo positivos que son los ensayos de laboratorio y la cantidad de estudios que se han realizado al respecto, la utilización de polímeros residuales como modificadores de betunes no se ha generalizado debido a que el proceso de mezclado sigue siendo complejo y costoso, especialmente en casos de escala superior a la del laboratorio¹¹.

Para la elaboración de estas modificaciones se necesita, en primer lugar, moler el polímero que se quiera añadir hasta convertirlo en polvo y posteriormente, maquinaria específica capaz de mezclar uniformemente el betún caliente con la adición. Es por esto por lo que resulta un proceso más farragoso que consumirá mucho más tiempo y energía y no podrá llevarse a cabo en instalaciones convencionales. Aparte de todo lo anterior, algunos autores dentro de estudios cualitativos y genéricos de mezclas con polímeros indican que la adición de los mismos está físicamente limitada a un 15% sobre betún. ⁵

Cabe destacar que el uso del poliestireno como adición a las mezclas asfálticas está menos desarrollado debido a los problemas de compatibilidad que presenta con el betún¹².

2.3.2. Adición por vía seca.

Por su parte las adiciones por vía seca son aquellas en las que el aditivo se introduce directamente en el mezclador junto con los áridos y el betún. Este proceso no modifica el betún previamente dotando a la mezcla bituminosa de unas propiedades especiales. Además permitiría la adición de porcentajes mayores al 15% sobre betún, lo que puede hacerlas económicamente más eficientes. Este 15% es una frontera teórica establecida entre algunos autores como límite de la decantación de partículas y por ende la pérdida de homogeneidad dentro de la vía húmeda no refiriéndose a ningún material específicamente.⁵

Estas mezclas, a pesar de no estar tan desarrolladas aún como las adiciones por vía húmeda, poseen una gran ventaja y es que son mezclas técnicamente más sencillas de producir. Se pueden producir directamente en planta sin grandes modificaciones, y además son más baratas. Su tecnología es por lo tanto más accesible a todas las plantas de fabricación y no sólo a aquellas que producen ligantes modificados. Además, siempre atendiendo a su contenido, se podría trabajar con los residuos plásticos de cada zona sin tener que realizar largos trayectos de transporte.

En India, país en el que se construyeron más de 1200 km de carreteras pavimentadas con mezclas modificadas con polímeros residuales (PE, PP y PS) entre 2002 y 2007, se elaboró uno de los mayores estudios sobre la modificación de mezclas con polímeros mediante vía seca. Este estudio fue llevado a cabo por el Ministerio de Medioambiente y Bosques en 2008. En dicho estudio realizaban la mezcla separando en primer lugar los fragmentos plásticos que estaban aproximadamente entre 1mm y 4 mm, fragmentos que posteriormente eran espolvoreados sobre los áridos a 170°C para posteriormente añadir el betún para completar la mezcla. Los resultados arrojados por ésta y otra investigación realizada en 2013, también en la India, fueron positivos y las vías pavimentadas siguen en funcionamiento aunque no por ello se garantiza la adecuación en otros climas o en base a otras normativas.^{13,14}

En el ámbito nacional ya se han llevado a cabo pruebas similares de adición por vía seca de una mezcla de polímeros de diferentes características. En este caso se reemplazaba parte del filler. En dicho estudio se decidió ensayar cada tipo de plástico de la mezcla mencionado anteriormente por separado. Centrándonos en los resultados que se obtuvieron en las mezclas AC-22 con poliestireno destacaremos la variabilidad de los resultados frente a deformaciones plásticas así como un aumento de rigidez sin verse modificado su comportamiento a fatiga, y además, una menor resistencia al deslizamiento (comportamiento detectado de manera general en todas las muestras modificadas del proyecto PolyMix).¹²

En el año 2012 se presentó un estudio sobre este sistema de mezcla mediante vía seca en el que se mejoraban sustancialmente los valores Marshall frente a los resultados de la mezcla de referencia. Además se evitaban deformaciones plásticas y se reducía la necesidad de betún en torno a un 10% del total. También en 2012 se llevó a cabo un proyecto en el que los mejores resultados para PS se obtenían para el 5% sobre mezcla añadido por vía seca a los áridos antes de añadir el betún. En este proyecto se obtuvo un incremento de estabilidad Marshall del 11% mientras que por otro lado, cuando era vertido el PS después que el betún se obtuvieron los valores más bajos de entre los estudiados.¹²

Otros autores presentaron en 2013 otro estudio en el que dosificaban entre un 0 y un 18% de desechos plásticos sobre betún. Concluyendo que el porcentaje óptimo se obtenía para el valor de 6% sobre betún, obteniendo una estabilidad Marshall un 12% mayor y mejorando su resistencia a fatiga y disminuyendo su profundidad de rodera en el ensayo de pista. Además cumplían holgadamente con las restricciones normativas del resto de ensayos.¹³

2.4. Betún utilizado en mezclas asfálticas y motivación para reducir de su consumo.

El betún es una sustancia pegajosa, de color negro y altamente viscosa de apariencia semisólida a temperatura ambiente. Puede encontrarse en depósitos naturales o bien como subproducto de la destilación del petróleo.⁵ Las propiedades de un betún para pavimentación son básicamente las dos siguientes; buena cohesión, es decir, propiedad adhesiva como ligante y naturaleza termoplástica (rigidez estando frío y fluidez estando caliente).

Teniendo en cuenta su procedencia vemos que se trata de un material procedente de combustibles fósiles o depósitos naturales por lo tanto de un bien finito cuya reserva viene disminuyendo enormemente en los últimos años a costa de la gran demanda de nuestra sociedad. Pero esa no es la única razón por la que, según los expertos, se recomienda la limitación de su consumo sino que el uso indiscriminado de estas fuentes de energía también está teniendo un fuerte impacto a nivel medioambiental, fomentando y agravando la evolución del cambio climático. Numéricamente, la extracción y procesado del betún hasta su puesta en obra

Además, el precio de mercado de los betunes oscila entre los 450€/t y los 600€/t en función de si están modificados o no, por lo que, aún suponiendo un pequeño porcentaje de cantidad respecto de las mezclas, constituye la partida más cara dentro de la mezcla. En la siguiente tabla (Tabla 1 y Tabla 2) podemos observar, a modo de ejemplo, el coste que supone cada material en la construcción de 100 m de carretera con una mezcla convencional AC-16 con betún 50/70 convencional y con una mezcla PA-16 con betún modificado con polímeros. Añadir que en base al *Inventory of Carbon & Energy (ICE) v2.0* el betún consta de una cantidad de carbono embebida, incluyendo todo su proceso de obtención y procesado hasta estar listo para poner en obra, de entre 0'43 y 0'55 KgCO₂e/kg de material, siendo CO₂e una unidad que contempla además del carbono otros gases nocivos para la atmosfera. Este dato será útil de cara a cuantificar el ahorro que supone la retirada del betún.¹⁵

Por ambos motivos, ambiental y económico, es por lo que en el presente trabajo estudiaremos la posibilidad de sustitución de parte del betún dentro de la mezcla asfáltica con residuos poliméricos, de tipo poliestireno particularmente.

Tabla 1. Precio material AC-16 S para 100 m de carretera y porcentaje respecto del gasto total.

Ofita	1.155,56 €	32%
Caliza	254,73 €	7%
Betún 50/70	2.195,63 €	61%
Total	3.605,92 €	100%

*Precios de 2015 con carácter orientativo dada la variabilidad del precio del petróleo.

Tabla 2. Precio material PA-16 para 100 m de carretera y porcentaje respecto del gasto total.

Ofita	1.257,67	33%
Caliza	136,10	4%
Betún PMB	2.381,96	63%
Total	3.775,3	100%

*Precios de 2015 con carácter orientativo dada la variabilidad del precio del petróleo.

3 Metodología de la investigación.

3. Metodología de la investigación.

El proyecto se desarrolló en varias fases, en una primera etapa se dosificaron dos mezclas convencionales AC 16 S y PA 16 utilizando los ensayos que especifica el PG-3 para este tipo de mezclas: Ensayo de huecos (UNE 12697-8), Ensayo de sensibilidad al agua (UNE 12697-12) y ensayo de rodadura (UNE 12697-22) para el hormigón bituminoso, y ensayo de huecos (UNE 12697-8), ensayo de sensibilidad al agua (UNE 12697-12), y ensayo de pérdida de partículas para la mezcla porosa (UNE 12697-17). Además, se analizó su comportamiento dinámico con los ensayos de módulo (UNE-EN 12697-26) y fatiga (UNE-EN 12697-24), y su trabajabilidad con la máquina giratoria (EN 12697-10). Dichas mezclas se utilizaron como referencia.

La fase experimental comenzó en una segunda etapa en la que, de la dosificación de referencia, se reemplazó un 1% de betún sobre mezcla por distintos tipos de PS (lo que supone prácticamente el 25% del betún empleado), permaneciendo inalterada la granulometría. Se repitieron los ensayos del PG-3 para valorar si estas mezclas experimentales, modificadas con PS, cumplían los requisitos mínimos que establece la normativa española, y si mejoraban o empeoraban las propiedades de las mezclas de referencia.

Además, para evaluar correctamente el impacto de reemplazar betún por PS, se fabricaron las mismas mezclas de referencia pero reduciendo el porcentaje de betún un 1% sobre mezcla, sin incorporar el PS. Así se pudo analizar el impacto real que supone añadir o no el PS sobre la mezcla, sin la influencia que supone la reducción del betún.

En este punto, con los resultados obtenidos, se analizó qué tipo de polímero de PS era el más adecuado para ser utilizado en las mezclas bituminosas, el cual pasaría a utilizarse en el resto del proyecto.

A continuación, se procedió a repetir el proceso pero incrementando el betún reemplazado hasta un 2% sobre mezcla, es decir, sustituyendo más del 45% del betún por PS). De esta forma, se volvieron a fabricar las mezclas de referencia reemplazando un 2% de betún por el PS seleccionado, y también reduciendo un 2% el porcentaje de betún de las mismas, sin incorporar dicho polímero.

Para valorar correctamente si era factible llegar a reemplazar estos porcentajes de betún, además de los ensayos que marca el PG-3 se decidió analizar la posible pérdida de cohesión mediante el ensayo Cántabro de pérdida de partículas en los hormigones bituminosos, dado que algunas probetas presentaron problemas de disgregación cuando se reemplazó un 2% de betún sobre mezcla. Finalmente, este porcentaje de sustitución se realizó únicamente sobre las mezclas AC, en el caso de las mezclas porosas no se llegó a estudiar, puesto que se comprobó que era demasiado alto y no se consideró viable.

En una última etapa se analizaron dinámicamente las mezclas experimentales reemplazando el 1% de betún por el PS seleccionado, por ser el porcentaje que obtenía unos mejores resultados mecánicos. De esta forma se pudo valorar si la rigidez, la resistencia a fatiga y la trabajabilidad de la mezcla, eran significativamente modificadas.

3.1. Proceso de fabricación.

El proceso de fabricación se realizó con el betún a una temperatura de 155°C, y los áridos a 170°C. En cuanto al proceso de fabricación difiere de una mezcla convencional únicamente en el proceso de mezclado. Dicho proceso se ha llevado a cabo incorporando, en los tres casos, los polímeros en frío siguiendo la siguiente secuencia:

- Disposición del árido grueso y espolvoreado del poliestireno para garantizar una distribución uniforme (Ilustración 5).
- Incorporación del árido fino y remoción de nuevo con la espátula.
- Vertido del betún e inicio del mezclado en la amasadora (1min).
- Adición del filler, que como es habitual, se dispone pasados unos segundos del inicio del amasado para la correcta impregnación de todos los áridos, y continuación del proceso de mezclado (4min)



Ilustración 5. Adición del poliestireno por vía seca dentro del proyecto.

(A: Incorporación del PS espolvoreándolo sobre el árido grueso; B: Mezcla somera con espátula. Previa adición del árido grueso).

3.2. Materiales utilizados.

En éste proyecto hemos ensayado probetas AC-16 S y PA-16 compuestas por árido grueso ofítico árido fino calizo y un betún convencional 50/70 como ligante, además, en el caso de la PA16 se utilizó también un betún modificado con polímeros, más habitual en este tipo de mezclas. Realizando un estudio paralelo de ambas mezclas PA. Previos a los ensayos de las mezclas han tenido que llevarse los ensayos relativos a la caracterización de los materiales que componen la mezcla. Se expone a continuación una descripción de cada uno de los materiales utilizado.

3.2.1. Áridos.

3.2.1.1. Ofita.

La ofita es una roca ígnea subvolcánica formada durante la cristalización bajo la superficie de la Tierra, en condiciones de baja presión y temperatura moderada. Generalmente proceden de machaqueo y son áridos con buen comportamiento al desgaste y alta resistencia al deslizamiento, por lo que son adecuados para la capa de rodadura. En éste proyecto se utiliza ofita en la fracción gruesa de los áridos, es decir de 2mm a 16mm, los cuales cuentan con las siguientes propiedades: Un coeficiente de los Ángeles (LA), de 15 (UNE - EN 1097-2), un índice de lajas (IL) de en torno al 8% (UNE - EN 933-3), un coeficiente de pulimento acelerado (CPA) de 56 (UNE-EN 1097-8) y un peso específico de 2,937 (UNE – EN 1097-6).

3.2.1.2. Caliza.

Se trata de un material de naturaleza calcárea obtenido directamente en cantera. Se ha utilizado en la fracción fina y como filler. Cuentan con un valor de equivalente de arena (SE) de 78 (UNE - EN 933-8) y un peso específico es 2,725 gr/cm³ (UNE – EN 1097-6).

3.2.2. Ligante.

El ligante elegido para nuestra dosificación es el Betún convencional de penetración 50/70 para las mezclas AC y en el caso de las PA, el mismo betún citado anteriormente además de un betún modificado con polímeros PMB 45/80-65. A continuación, en la Tabla 3, vemos las características iniciales de cada tipo de betún utilizado.

Tabla 3. Características de los betunes utilizados para el proyecto.

Ensayo	Betún Convencional 50/70	Betún modificado PMB*45/80-65
Penetración (25°C;100g,5s) UNE-EN-1426 (mm/10)	57	45-80
Temperatura de reblandecimiento. UNE-En-1427	51,6	65
Punto de fragilidad Fraass. UNE-EN-12593.	-13	-15
Recuperación elástica a 25°C UNE-EN 13398	-	> 70%

3.2.3. Poliestirenos añadidos.

En el presente proyecto se han utilizado el poliestireno cristal (GPPS), el poliestireno de alto impacto (HIPS) y un poliestireno reciclado procedente de perchas (HPS), este último compuesto a su vez por un porcentaje elevado de poliestireno de alto impacto. En las imágenes de la siguiente página (Ilustración 6 e Ilustración 7) podemos ver las muestras utilizadas y su granulometría correspondiente.

AIMPLAS, Instituto Tecnológico del Plástico ha sido el proveedor de todas las muestras de residuos poliméricos de tipo poliestireno utilizadas en este proyecto. La densidad de cada muestra (Tabla 4) se obtuvo mediante el ensayo de laboratorio UNE-EN ISO 1183-1:2004, ensayo realizado en las instalaciones de LAGUC (Laboratorio de Geosintéticos de la Universidad de Cantabria) ya que es uno de los ensayos para lo que está acreditado.

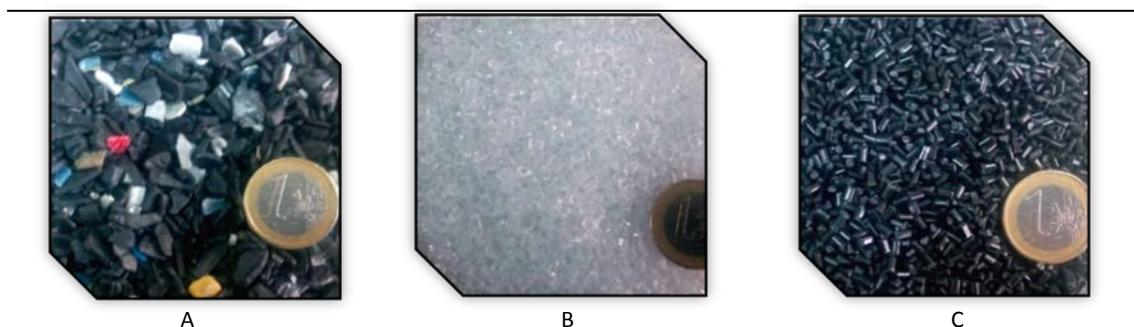


Ilustración 6. Muestras de Poliestireno utilizadas en el proyecto.
A: PS Recycled from Hangers, PS, B: Crystal Polystyrene, GPPS; C: High Impact Polystyrene, HIPS.

Tabla 4. Densidades de los diferentes tipos de PS utilizados.

	HPS	GPPS	HIPS
Densidad (g/cm ³)	0,890 ± 0,16	1,048 ± 0,083	1,024 ± 0,076

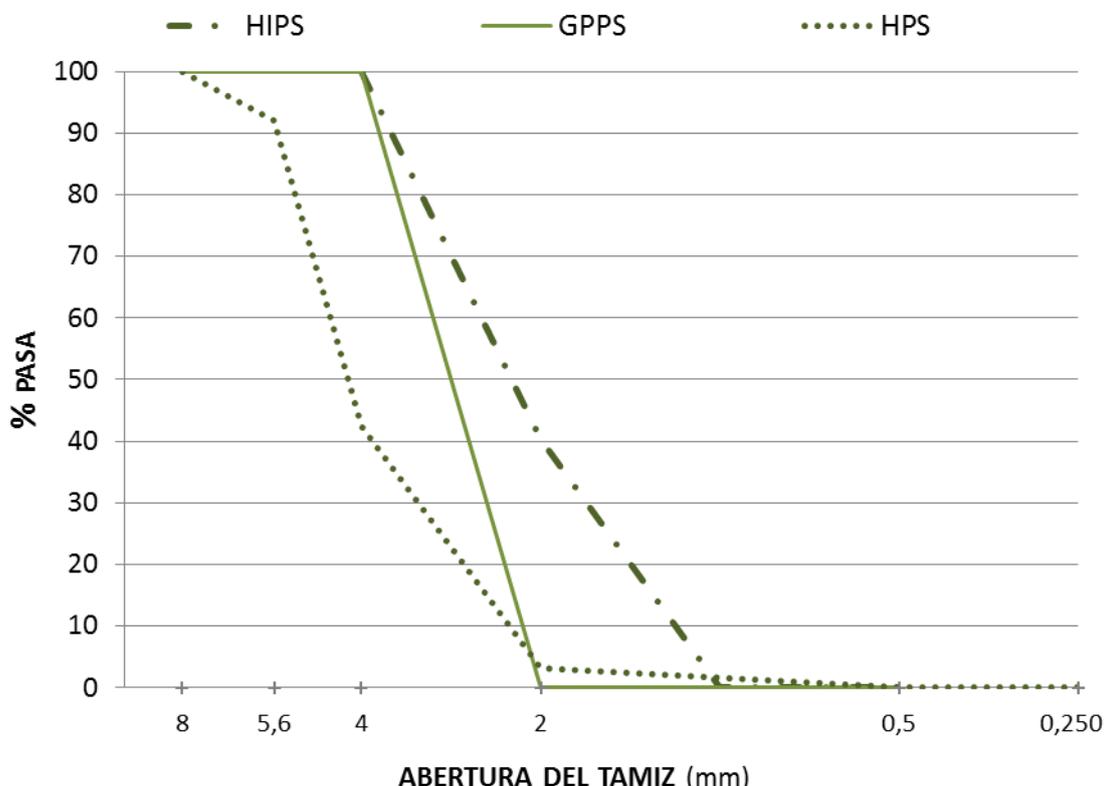


Ilustración 7. Granulometría de los distintos tipos de PS (UNE EN 933-2)

3.3. Ensayos realizados.

3.3.1. Ensayos de dosificación de las mezclas.

Para dosificar las mezclas se utilizaron los ensayos definidos por el PG-3. A continuación se exponen los parámetros que deben cumplir considerando que son mezclas para capa de rodadura y asumiendo una localización correspondiente a una zona climática cálida por ser la más restrictiva.

3.3.1.1. Huecos en mezcla (UNE 12697-8):

Según las especificaciones del PG-3, los huecos en mezcla deben cumplir las especificaciones dispuestas en la Tabla 5. Hemos realizado este ensayo sobre cuatro probetas.

Tabla 5. PG-3 Tabla 542.13/543.10

Características	Categoría del tráfico pesado				
	AC	T00 & T0	T1 & T2	T3 & arcenes	T4
Huecos en mezcla (%)	PA	4-6		3-6	
		≥20			



Ilustración 8. Probetas compactadas tipo Marshall

3.3.1.2. Sensibilidad al agua (UNE 12697-12):

El objetivo de este ensayo es determinar la pérdida de cohesión de las mezclas causada por la saturación del agua. Las especificaciones mínimas pueden verse en la Tabla 6. Para este ensayo fabricamos 8 probetas de cada mezcla y las dividimos en dos grupos. Dichos grupos se preparan, para romperse por tracción indirecta, de diferentes formas (vía húmeda y vía seca) con la finalidad de comparar las resistencias a tracción indirecta de los dos grupos de probetas. En la Ilustración 9 vemos diferentes etapas del ensayo.

Tabla 6. Especificaciones según PG-3 para el ensayo de sensibilidad al agua.

Característica	Mezcla	Normativa
Sensibilidad al agua (%)	AC	≥85
	PA	≥85

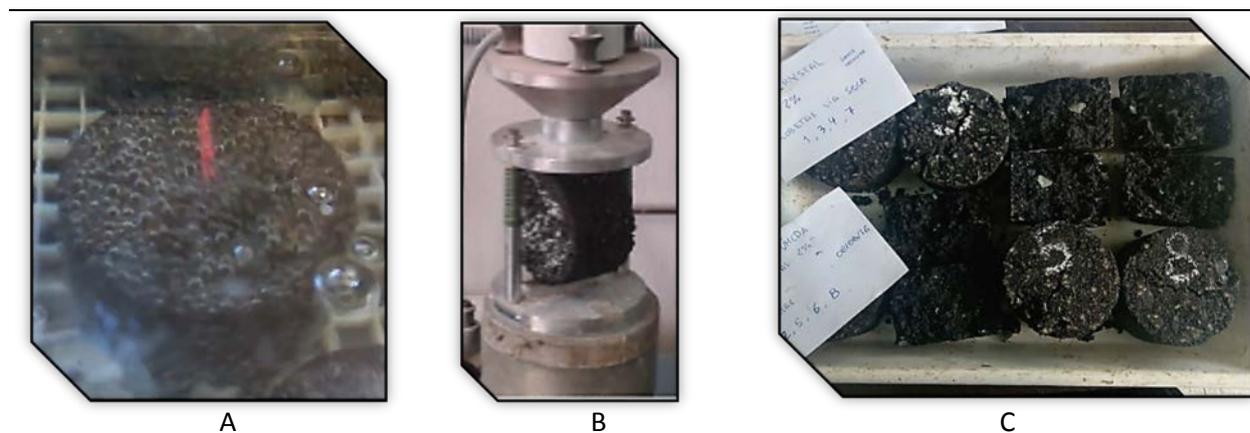


Ilustración 9. Fases del Ensayo de Sensibilidad al agua

(A: Probeta sumergida en el tanque de vacío; B: Rotura de la probeta; C: Probetas rotas tras el ensayo)

3.3.1.3. Ensayo de rodadura (UNE 12697-22):

Este ensayo (Ilustración 10) determina la resistencia frente a las deformaciones plásticas de las mezcla. La susceptibilidad a deformarse se evalúa por la pendiente de la rodera que forma una rueda sometida a carga sobre una probeta mediante la repetición de pasadas a temperatura constante. No se aplica sobre mezclas porosas, por lo tanto dentro de nuestro proyecto sólo lo llevaremos a cabo sobre las mezclas de tipo AC.

Este ensayo ha sido realizado sobre 3 probetas de cada mezcla y siempre teniendo en cuenta los valores mínimos establecidos por el PG3 (Tabla 7).

Tabla 7. Pendiente media de deformación en Pista. Tabla 543.11 PG-3

Características		Categoría del tráfico pesado	
		T00 a T1	T2, T3 & arcenes
Ensayo de rodadura	AC	≤ 0,07	≤ 0,1

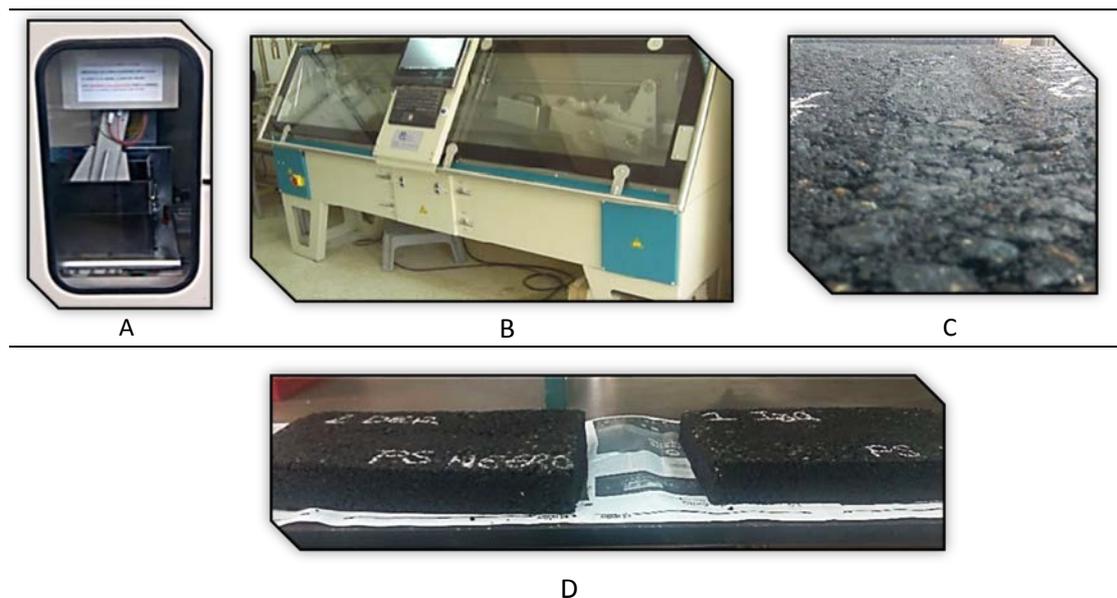


Ilustración 10. Ensayo de Pista.

A: Compactación de las probetas; B: Máquina de ensayo; C y D: Resultados tras el ensayo.

3.3.1.4. Ensayo cántabro de Pérdida de partículas (UNE 12697-17):

Este ensayo evalúa la resistencia de las mezclas porosas frente a la disgregación, en función de la categoría del tráfico pesado para la que se esté diseñando la mezcla el porcentaje de pérdida de partículas máximo admitido en norma es el presentado en la Tabla 8.

Es importante destacar que generalmente éste ensayo no se realiza sobre mezclas AC, sin embargo, dada la singularidad del proyecto y la falta de cohesión percibida en alguna de las probetas a causa de la reducción de betón, se decidió realizarlo sobre ellas.

Se llevó a cabo, como vemos en la Ilustración 11, sobre cuatro probetas tipo Marshall de cada una de las dosificaciones estudiadas en el proyecto.

Tabla 8. Limitaciones del ensayo cántabro de pérdida de partículas

Características		Categoría del tráfico pesado	
		T00 a T1	T2, T3 & arcenes
Pérdida de partículas (%)	PA	< 20	< 25



Ilustración 11. Ensayo Cántabro de pérdida de partículas.

A: Tambor de los Ángeles en el que se realiza el ensayo; B: Probetas antes y después del ensayo.

3.3.2. Ensayos de caracterización dinámica de las mezclas.

3.3.2.1. Ensayo de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas. Módulo Dinámico (UNE-EN 12697-26. Anexo B):

Ensayo que consiste en determinar la rigidez de la mezcla. Este ensayo se lleva a cabo con unas frecuencias entre 0,1Hz y 30Hz en la máquina universal hidráulica *Zwick Z1000* que se encuentra en una sala acimatada a 20°C. Se utilizaron 8 probetas de cada mezcla estudiada. La máquina utilizada podemos verla en la Ilustración 12.

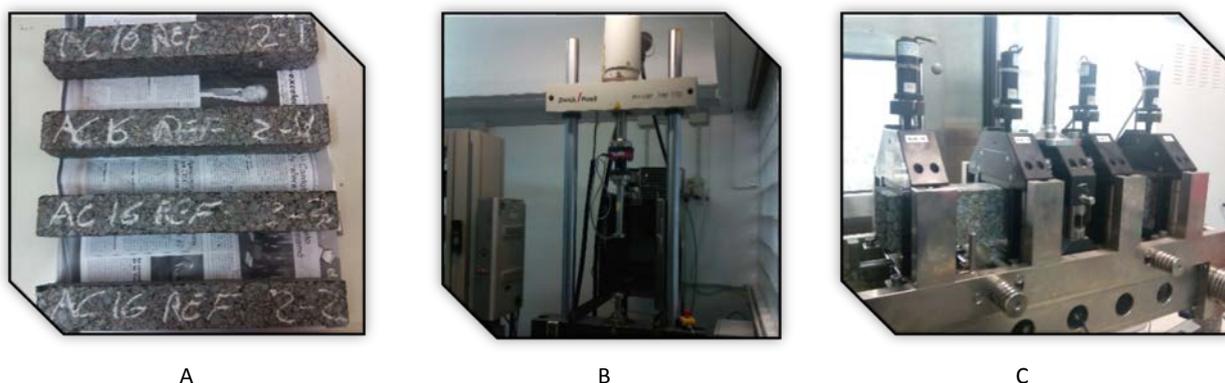


Ilustración 12. Ensayo de flexión en cuatro puntos. (A: Probetas; B y C: Máquina de ensayo)

3.3.2.2. Ensayo de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas. Resistencia a la fatiga (UNE-EN 12697-24. Anexo D):

Este ensayo se utiliza para obtener un valor de la resistencia frente al desfallecimiento por fatiga. Se utilizó el mismo equipo que para el ensayo de módulo dinámico, montado tal y como se muestra en la Ilustración 12. Se ensayaron 8 probetas de cada mezcla con una frecuencia de 30 Hz y una temperatura de 20°C.

3.3.2.3. Ensayo de compactabilidad de las mezclas (EN 12697-10).

Se realizó un ensayo de compactabilidad a las mezclas tanto de referencia como de las mezclas modificadas para comprobar si la incorporación de los polímeros suponía diferencias sustanciales en la trabajabilidad de las mezclas. El ensayo se realizó con una máquina giratoria *Controls ICT* (Ilustración 13) sobre dos probetas de cada tipo de mezcla. Se emplearon moldes de 150 mm diámetro, una presión de 600KPa, una velocidad de rotación de 30 rpm y un ángulo de 0,82°.

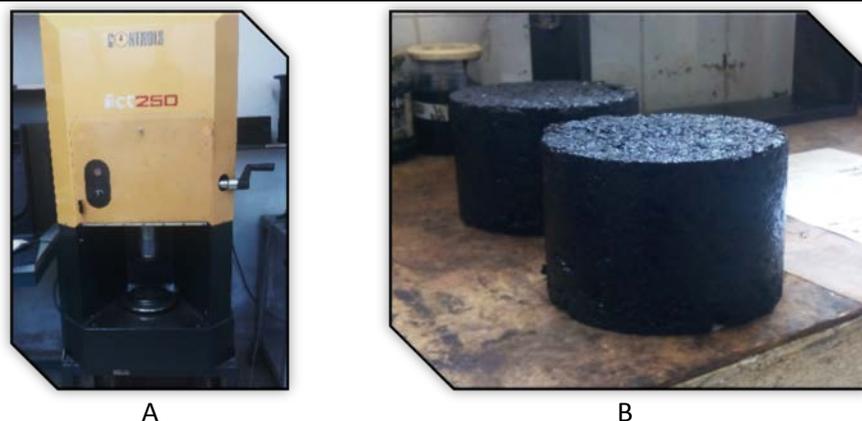


Ilustración 13. Ensayo de compactabilidad de las mezclas (A: máquina giratoria; B: Probetas resultantes)

A partir de los resultados obtenidos se calculó la energía acumulada de compactación utilizando el modelo desarrollado por del Río ¹⁶:

$$\frac{W}{m} = \sum_1^N \frac{W_i}{m} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot A}{m} \sum_1^N h_i \cdot S_i$$

Dónde:

W (KJul): energía acumulada de compactación.

m (Kg): masa.

N : Número total de ciclos aplicados.

α (rad): ángulo de inclinación de la probeta cilíndrica.

A (m²): área de la probeta.

h_i (m): altura de la probeta en cada ciclo i .

S_i (KN/m²): esfuerzo cortante medido en cada ciclo i .

3.4. Análisis estadístico de los datos.

La mera valoración cualitativa y visual de los datos puede inducir a deducciones erróneas y no válidas de cara a sacar conclusiones y patrones de comportamiento de las mezclas. Por lo tanto, antes de concluir nada, todos y cada uno de los datos son analizados en base a la estadística inferencial.

Estadística inferencial o inductiva es aquella que utiliza la teoría de las probabilidades para generalizar las características de una muestra de datos representativa. Este análisis estadístico puede dividirse en dos caminos diferenciados en función de que las muestras que tengamos sigan una distribución normal y cumplan el principio de homoestaticidad (métodos de análisis paramétricos) o no cumplan alguna de estas premisas (métodos de análisis no paramétricos). En el siguiente esquema (Ilustración 14) vemos, a modo de resumen, los caminos a seguir en función de las características de nuestra muestra.



Ilustración 14. Esquema resumen del análisis mediante estadística inferencial.

Durante la realización de este trabajo y dadas la característica de las muestras a analizar se han utilizado los caminos del esquema resaltados en negrita.

Es conveniente destacar que el software utilizado para este análisis de datos ha sido *MiniTab 17 Statistical Software*, un programa de uso bastante extendido para el procesado de datos ya que, a pesar de su manejo intuitivo cuenta con una gran potencia para el análisis estadístico.

La disposición en el trabajo de las relaciones estadísticas, para cada par de muestras y ensayo, se realizará mediante tablas de doble entrada cuya lectura se realizará como se muestra a continuación, donde el p valor que relaciona la mezcla tipo B con la tipo C para el ensayo 1 sería "5".



Tabla 9. Explicación tablas de doble entrada

Ensayo	P(valor)	Mezcla A	Mezcla B	Mezcla C
Mezcla D		1	2	3
Mezcla C		4	5	-
Mezcla B		6	-	-

4 Resultados y discusión.

4. Resultados y discusión de los mismos.

El siguiente apartado en el que se exponen los resultados está dividido en función del tipo de mezclas estudiadas (AC-16 S y PA-16) y dentro de cada una de ellas se diferenciará en función del porcentaje de betún reemplazado.

4.1. Mezclas tipo AC-16 S.

En primer lugar se diseñó una mezcla AC-16 S tipo cuya dosificación se presenta en la tabla a continuación (Tabla 10). Se realizaron sobre esta mezcla los ensayos recogidos en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), cuyos resultados se exponen en la Tabla 11. Estos valores se tomarán como los valores de referencia.

Tabla 10. Dosificación AC-16 S de Referencia

	Áridos	Betún/ mezcla
Ofita 16#8	33,9%	4,3%
Ofita 8#4	24,6%	
Ofita 4#2	8,0%	
Caliza 2#0	32,7%	
Filler calizo	0,8%	

Tabla 11. Resultados AC-16 S de referencia

Ensayo	Parámetro	Resultado
Determinación de Huecos en mezcla (UNE 12697-8)	Densidad aparente (kg/cm ³)	2,522
	% Huecos	5,1%
	% Huecos en árido	15,7%
Ensayo de Sensibilidad al agua (UNE 12697-12)	Rt(Kp) Secas	1991
	Húmedas	1965
	% ITSr	99%
Ensayo de Rodadura (UNE 12697-22)*	1000 ciclos	0,08
	Prof. Rodera (mm)	2,9
Ensayo cántabro**	% pérdida de partículas	3,8%

* Ensayo realizado sobre probetas de 50 mm.

** Ensayo no recogido en el PG-3 para este tipo de mezclas.

A su vez se realizaron sobre estas muestras los ensayos de flexión en cuatro puntos diseñados para obtener los valores de módulo dinámico y fatiga de la mezcla así como el ensayo de compactabilidad de la mezcla en máquina giratoria. Estos valores se tomarán en este proyecto como los valores de referencia y por lo tanto serán comparados con todos los que obtengamos de las mezclas experimentales.

4.1.1. Mezclas tipo AC-16 con sustitución del 1% de betún.

Las mezclas estudiadas en este trabajo se caracterizan por la sustitución de un porcentaje en peso del betún por poliestireno triturado. En este caso del 4'3% de betún sobre mezcla que lleva la mezcla original se sustituyó un 1%, lo que supone unos valores nada despreciables de sustitución ya que se reduce la cantidad de betún en un 23'25%.

Aparte de éstas mezclas entorno a las que gira el grueso de la investigación también se realizaron, para alguno de los ensayos, mezclas en las que únicamente se realizó la retirada del betún sin sustitución alguna. Dichas mezclas se ejecutaron únicamente con el objetivo de que, en caso de que se produjesen mejoras en las fabricadas con poliestireno, pudiésemos achacarlas a la adición del PS y descartar que hubiesen sido causadas por la mera retirada del betún.

Con todo esto las dosificaciones para las mezclas experimentales quedan tal y como vemos en las siguientes tablas (Tabla 12 y Tabla 13).

Tabla 12. Dosificación AC-16 S con sustitución por 1%PS*

	Áridos	Betún/mezcla	PS*/ Mezcla
Ofita 16#8	33,9%	3,3%	1%
Ofita 8#4	24,6%		
Ofita 4#2	8,0%		
Caliza 2#0	32,7%		
Filler calizo	0,8%		

* PS del tipo que sea en cada caso

Tabla 13. Dosificación AC 16 S sin 1% de betún.

	Áridos	Betún/ mezcla
Ofita 16#8	33,9%	3,3%
Ofita 8#4	24,6%	
Ofita 4#2	8,0%	
Caliza 2#0	32,7%	
Filler calizo	0,8%	

4.1.1.1. Caracterización mecánica de las mezclas con sustitución del 1% de betún por PS.

Los resultados de los principales ensayos realizados sobre estas muestras se encuentran resumidos en la Tabla 14. Para estas mezclas se utilizaron las tres muestras de poliestireno diferentes con las que se contaban.

Tabla 14. Resultados AC-16 S con sustitución por 1% PS*

Ensayo	Parámetro	Resultado					
		REF	SIN 1%	1% HPS	1% GPPS	1% HIPS	
Determinación de Huecos en mezcla (UNE 12697-8)	Densidad aparente (kg/cm ³)	2,522	2,489	2,452	2,449	2,46	
	% Huecos	5,1%	6,4%	7,80	7,90	7,30	
	% Huecos en árido	15,7%	16,8%	18,00	18,10	17,60	
Ensayo de Sensibilidad al agua (UNE 12697-12)	Rt(KPa)	Secas	1991	1935	1810	1872	1960
		Húmedas	1965	1749	1836	1878	2023
	% ITSR	99%	85%	101%	100%	102%	
Ensayo de Rodadura (UNE 12697-22)*	Pendiente (mm/1000 ciclos)	0,08	0,11	0,03	0,05	0,04	
	Prof. Roderá (mm)	2,9	3,2	1,5	2,3	1,8	

Se observa que con la retirada del 1% de betún (muestras "SIN") todos los resultados empeoran, respecto de los obtenidos para la mezcla de referencia. Obteniendo un menor ITSR en el ensayo de sensibilidad al agua, unos valores superiores de pendiente y profundidad de la rodera en los ensayos de pista.

En lo que concierne a las mezclas con sustitución por poliestireno (muestras "HPS", "GPPS" o "HIPS") vemos como en los tres casos se producen variaciones en los resultados de referencia, sin embargo, se observa que

la diferencia entre ellas, en la mayoría de los casos, es despreciable. Datos que se comprueban tras el análisis estadístico (Tabla 12) donde vemos que la comparación de estas tres muestras entre sí no tienen diferencias significativas desde el punto de vista estadístico ($p_{valor} > 0,05$).

En cuanto a la densidad, observamos una menor densidad en todas ellas, incluso menor a la mezcla sin el 1% de betún, y consecuentemente un mayor porcentaje de huecos. Sin embargo, este mayor porcentaje de huecos no incide negativamente en el comportamiento de las mezclas experimentales.

Dentro del ensayo de sensibilidad al agua observamos que la resistencia de las probetas con poliestireno es similar a las probetas de referencia, y que siempre obtienen un índice de resistencia conservada próximo al 100%, es decir, resultan mezclas con valores próximos a las mezclas convencionales, y que no se ven significativamente afectadas por la acción del agua. Todas ellas cumplen holgadamente con el valor establecido en normativa (>85%). De hecho, consideramos que dichos valores, en algunos casos, son superiores al 100% por la propia variabilidad del ensayo y en ningún caso, porque el agua mejore las mezclas en presencia del poliestireno.

En el ensayo de rodadura es donde encontramos las mejoras más interesantes de nuestras mezclas ya que, como se aprecia en el Gráfico 1, se reduce la pendiente alcanzada entre un 40 y un 60% respecto de los valores de referencia.

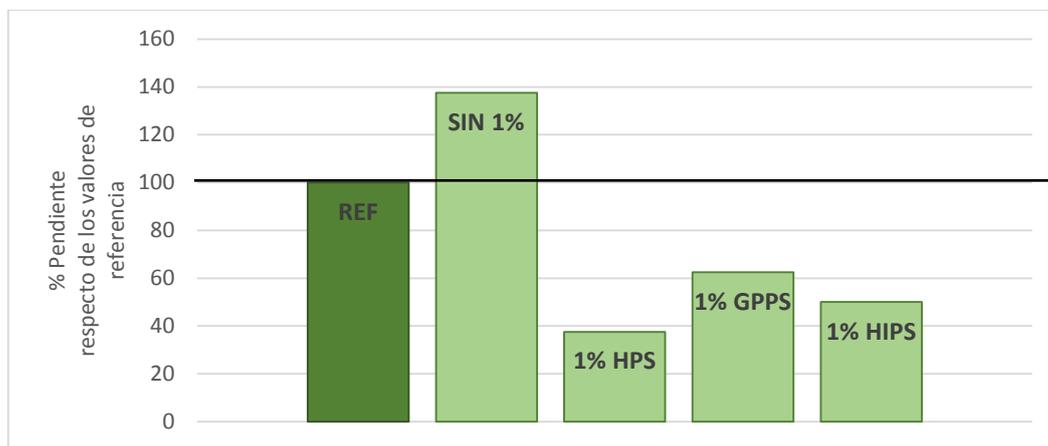


Gráfico 1. Variación de los valores de la pendiente en el ensayo de rodadura.

El análisis estadístico (Tabla 15) respalda estos datos para el caso de HPS y HIPS y no así para el GPPS, a pesar del incremento en la resistencia que experimenta.

Tabla 15. p valores de las mezclas SIN 1%, 1%HPS y 2%HPS de los ensayos marcados por el PG-3.

Ensayo	P(valor)	REF	SIN 1%	1%HPS	1%GPPS
Ensayo de determinación de huecos en mezcla (UNE 12697-8)	1% HIPS	0,000	0,001	0,103	0,052
	1%GPPS	0,000	0,000	0,388	-
	1%HPS	0,000	0,000	-	-
	SIN 1%	0,000	-	-	-
Ensayo de Sensibilidad al agua (UNE 12697-12) (probetas por vía seca)	1% HIPS	0,414	0,531	0,231	0,635
	1%GPPS	0,117	0,681	0,232	-
	1%HPS	0,032	0,965	-	-
	SIN 1%	0,269	-	-	-
Ensayo	P(valor)	REF	SIN 1%	1%HPS	1%GPPS

Ensayo de Sensibilidad al agua (UNE 12697-12) (probetas por vía húmeda)	1% HIPS	0,250	0,069	0,050	0,701
	1%GPPS	0,728	0,076	0,149	-
	1%HPS	0,127	0,243	-	-
	SIN 1%	0,091	-	-	-
Ensayo de rodadura (UNE 12697-22)	1% HIPS	0,044	0,051	0,242	0,211
	1%GPPS	0,106	0,061	0,101	-
	1%HPS	0,036	0,035	-	-
	SIN 1%	0,118	-	-	-

Finalmente se decidió que la muestra que mejor se comportaba en general era el poliestireno HPS, en base a lo siguiente:

- Densidad de la mezcla y porcentaje de huecos intermedia entre las evaluadas.
- Obtiene la resistencia frente a las deformaciones plásticas más alta (pendiente casi tres veces menor a la de referencia y reducción a la mitad de la profundidad de rodera respecto a la mezcla de referencia).
- Se trata de un poliestireno reciclado por lo que se reforzaría el impacto ambiental.
- Es un material que ha sido únicamente triturado y no procesado para su obtención.

A pesar de tratarse de mezclas tipo AC, tal como se expuso en el apartado 3.3.1.4 se decidió realizar el ensayo cántabro de pérdida de partículas con el polímero seleccionado para evaluar la cohesión de la mezcla, dichos resultados se recogen en la siguiente tabla.

Tabla 16. Resultados de las AC-16 S con sustitución del 1% por PS.

Ensayo	Parámetro	Resultado		
		REF	SIN 1%	1%HPS
Ensayo cántabro*	% pérdida de partículas	3,8	10,2%	14,4%

* Ensayo no recogido en el PG-3 para este tipo de mezclas.

Vemos en la *Tabla 16* que las muestras con retirada del 1% de betún tienen una pérdida de partículas significativamente superior a la mezcla de referencia. A pesar de este incremento los valores son inferiores a los exigidos a una mezcla porosa, aún sin poder comparar puesto que el comportamiento de ambas mezclas es diferente, se considera que a falta de un análisis más detallado estos valores estarían dentro de un rango adecuado, y que dada su granulometría continua, su mayor porcentaje de finos, y su menor porcentaje de huecos, su pérdida de partículas en condiciones reales no es equiparable a las que sufren las mezclas PA. Entre los resultados de la mezcla SIN1% y la 1%HPS no ha diferencias significativas (*Tabla 17*) por lo que puede concluirse que el PS no está colaborando en esta propiedad de la mezcla. Además, teniendo en cuenta valores de mezclas porosas ya que no existe normativa aplicable para este ensayo en éste tipo de mezclas, parecen valores razonablemente aceptables.

Tabla 17. p valores ensayo cántabro. Mezclas REF, SIN1% y 1%HPS

Ensayo	P(valor)	REF	SIN 1%
Ensayo cántabro de pérdida de partículas (UNE 12697-17)	1% HPS	0,030	0,311
	SIN 1%	0,030	-

4.1.1.2. Caracterización dinámica de las mezclas con sustitución del 1% de betún por PS.

Dentro del estudio de las mezclas con el poliestireno HPS se incluyó también la caracterización dinámica de las mezclas. En primer lugar, mediante el ensayo de compactabilidad de las mezclas por máquina giratoria, como puede verse en el *Gráfico 2*.

De este ensayo se concluye que para alcanzar la misma densidad, la energía requerida es directamente proporcional a la cantidad de poliestireno añadida, es decir, a mayor porcentaje de poliestireno mayor será la energía necesaria para alcanzar una misma densidad. Sin embargo puede que para obtener una resistencia suficiente frente a cargas del tráfico no sea necesario alcanzar densidades comparables a las de referencia en las mezclas modificadas con PS, por lo que podría no tener que incrementarse la energía con la cual se compactan. Este ensayo, además, resulta coherente con el incremento de huecos que han experimentado las mezclas al incorporar el poliestireno. Se comprueba estadísticamente que no hay diferencias significativas en ninguna de las dos muestras (*Tabla 20*).

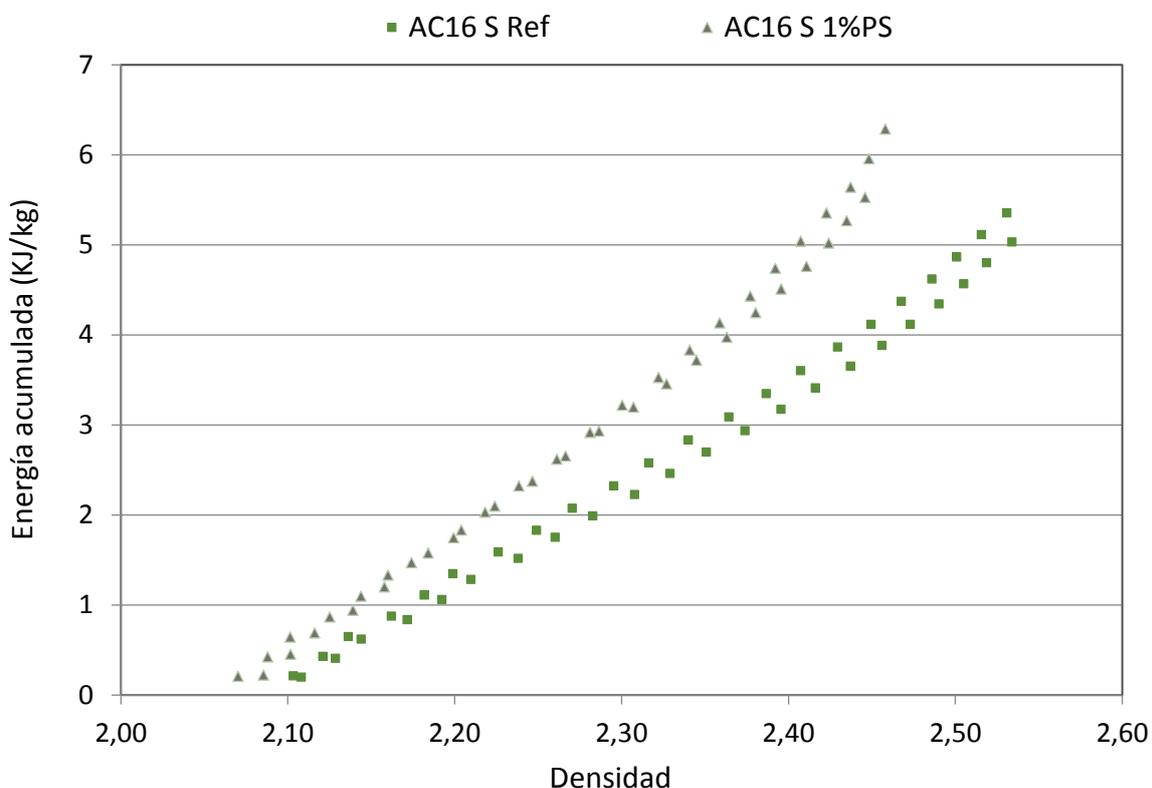


Gráfico 2. Resultados de ensayo de compactabilidad de las mezclas.

En segundo lugar, se realizó el ensayo de módulo dinámico en el que se obtuvieron los valores de la *Tabla 18* Se aprecia que los valores de rigidez son muy parecidos, y que el ángulo de fase de la mezcla con PS es ligeramente menor, lo que denotaría un comportamiento más elástico de la mezcla, aunque de nuevo obtuvo un valor de $p > 0,05$ y por lo tanto no siendo significativas las diferencias desde el punto de vista estadístico (*Tabla 20*). Se puede concluir por tanto que a pesar de la diferencia de huecos, y la incorporación del PS, la mezcla experimental no varía su rigidez.

Tabla 18. Resultados del Ensayo de módulo dinámico.

Frecuencia (Hz)	REF		1% HPS	
	Módulo dinámico ± desviación típica (MPa)	Angulo de fase ± desviación típica (°)	Módulo dinámico ± desviación típica (MPa)	Angulo de fase ± desviación típica (°)
0,1	893 ± 105	43,8 ± 1,4	1053 ± 309	36,2 ± 0,7
0,2	1185 ± 121	42,7 ± 1,5	1314 ± 390	35,5 ± 0,6
0,5	1704 ± 160	40,8 ± 1,6	1788 ± 535	34,5 ± 0,7
1	2222 ± 196	38,8 ± 1,6	2242 ± 663	33,2 ± 0,9
2	2879 ± 229	36,6 ± 1,7	2811 ± 827	31,7 ± 1,0
5	3978 ± 293	33,4 ± 1,7	3729 ± 1075	29,2 ± 1,2
8	4641 ± 333	31,5 ± 1,7	4271 ± 1213	27,7 ± 1,3
10	4974 ± 364	30,9 ± 1,7	4525 ± 1271	27,1 ± 1,3
20	6207 ± 428	28,1 ± 1,7	5431 ± 1451	25,1 ± 2,6
30	6951 ± 445	26,6 ± 1,6	6188 ± 1697	23,9 ± 1,3

Por último y utilizando la máquina hidráulica Zwick Z100, se realizó el ensayo de fatiga, cuyos resultados se exponen a continuación (Tabla 19). Donde S_0 es la tensión inicial y se corresponde con el valor de la tensión después de 100 ciclos bajo la deformación impuesta. El criterio de rotura adoptado supone rota la mezcla una vez se alcanza un valor de la tensión igual a $S_0/2$, es decir, cuando la rigidez del material se ve disminuida a la mitad. El ciclo (N) en el que se alcanza este valor será el ciclo de rotura. Por otro lado, se ha considerado el valor ϵ_6 como representativo de la resistencia a fatiga del material, siendo la deformación que presenta para 10^6 ciclos.

Tabla 19. Resultados del ensayo de resistencia a la fatiga.

Ensayo	Parámetro	Resultado	
		REF	1%HPS
Ensayo de resistencia a la fatiga (UNE-EN 12697-24. Anexo D)	So (MPa)	6905	6540
	Def. característica (mm/m)	154,2	136,8
	Línea de fatiga (ϵ)	$1,075 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,1405}$	$2,138 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,1990}$
	R ²	0,9877	0,8107

Los valores de módulo S_0 son muy similares, y coinciden con los obtenidos en el ensayo de módulo dinámico para la frecuencia de ensayo (30Hz). Aunque la deformación característica de la mezcla con PS es algo menor que la de referencia, desde el punto de vista estadístico se observa que los valores obtenidos no tienen diferencias significativas (Tabla 20) por lo que podemos concluir que la mezcla no empeora su comportamiento a fatiga a pesar de haber sustituido parte de su dosificación en betún por poliestireno.

Tabla 20. p valores de las mezclas REF y 1%HPS de los ensayos dinámicos.

Ensayo	P(valor)	REF
Ensayo de compactabilidad de las mezclas (EN 12697).	1% HPS	0,395
Ensayo de resistencia a la fatiga (UNE-EN 12697-24. Anexo D)	1% HPS	0,088
Ensayo de módulo dinámico (UNE-EN 12697-26. Anexo B).	1% HPS	0,451

4.1.2. Mezclas de tipo AC-16 con sustitución del 2% de betún.

Tras estudiar el comportamiento de la mezcla al remplazar el 1% de betún por PS, se procedió a analizar el comportamiento mecánico cuando se sustituía un 2% de betún sobre mezcla, lo que supone una reducción del betún original del 46,50%. La dosificación de esta nueva mezcla se puede ver en la *Tabla 21*. Al igual que en el apartado del 1% se realizó una mezcla en la que se retiró el betún y no se substituyó (*Tabla 22*).

Tabla 21. Dosificación AC-16 S con sustitución por 2%PS.

Áridos		Betún/mezcla	HPS/ mezcla
Ofita 16#8	33,9%	2,3%	2%
Ofita 8#4	24,6%		
Ofita 4#2	8,0%		
Caliza 2#0	32,7%		
Filler calizo	0,8%		

Tabla 22. Dosificación AC-16 S sin 2% de betún.

Áridos		Betún/ mezcla
Ofita 16#8	33,9%	2,3%
Ofita 8#4	24,6%	
Ofita 4#2	8,0%	
Caliza 2#0	32,7%	
Filler calizo	0,8%	

4.1.2.1. Análisis mecánico de las mezclas con 2% de sustitución de betún por PS.

En la *Tabla 23* pueden verse los resultados que obtuvo la mezcla experimental frente los de referencia para los ensayos que especifica el PG-3 para los hormigones bituminosos.

Tabla 23. Resultados de las AC-16 S con sustitución del 2% por PS.

Ensayo	Parámetro	Resultado	
		REF	2%HPS
Determinación de	Densidad aparente (kg/cm ³)	2,522	2,366
Huecos en mezcla (UNE 12697-8)	% Huecos	5,1%	11,0%
	% Huecos en árido	15,7%	20,9%
Ensayo de Sensibilidad al agua (UNE 12697-12)	Rt(Kp)	1991	1277
		Secas	1965
		Húmedas	1072
	% ITSR	99%	84%
Ensayo de Rodadura (UNE 12697-22)*	Pendiente (mm/1000 ciclos)	0,08	0,03
	Prof. Roderá (mm)	2,9	1,6

En este caso vemos como la densidad vuelve a ser inferior que en la muestra de referencia (2,522) y el porcentaje de huecos muy superior. También se observa que en el comportamiento frente a sensibilidad al agua se encuentra prácticamente en el límite de lo establecido por el PG-3, aunque empeora significativamente el resultado de la mezcla de referencia, algo que probablemente es debido a que duplica su porcentaje de huecos en mezcla.

Es en el ensayo de rodadura donde la muestra vuelve a tener un comportamiento sobresaliente, compartiendo prácticamente valores con la mezcla en la que sólo sustituíamos el 1% de betún por poliestireno (Gráfico 3). Sin embargo, a pesar del incremento de la resistencia frente a las deformaciones plásticas, la diferencia no es significativa según los p-valores recogidos en la Tabla 24, aunque nos encontramos en valores muy cercanos al límite de confianza.

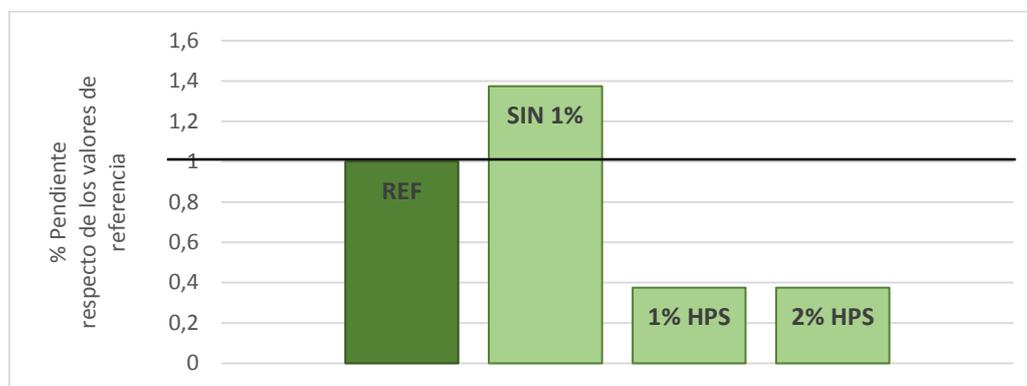


Gráfico 3. Variación de los valores de la pendiente en el ensayo de rodadura.

Tabla 24. P valores de las mezclas REF, 1%HPS y 2%HPS de ensayos recogidos en el PG-3.

Ensayo	P(valor)	REF	1%HPS
Ensayo de determinación de huecos en mezcla. UNE 12697-8.	2% HPS	0,000	0,000
Ensayo de Sensibilidad al agua UNE 12697-12. Probetas por vía seca	2% HPS	0,000	0,000
Ensayo de Sensibilidad al agua UNE 12697-12. Probetas por vía húmeda	2% HPS	0,000	0,000
Ensayo de rodadura. UNE 12697-22	2% HPS	0,053	0,040

Sin embargo, a pesar de que los resultados mecánicos obtenidos están en el rango habitual de los hormigones bituminosos convencionales, observamos que algunas de estas probetas contaban con una cohesión de partículas muy escasa, especialmente en las aristas, llegándose a poder disgregar en frío manualmente (Ilustración 15).



Ilustración 15. Disgregación de las probetas (A: probetas de pista; B: probetas Marshall)

Como en el caso de las mezclas con 1% de PS, en la Tabla 25 se recogen los resultados del ensayo cántabro de pérdida de partículas para evaluar la cohesión de la mezcla.

Tabla 25. Resultados de las mezclas AC-16 S con sustitución del 2% de betún.

Ensayo	Parámetro	Resultado		
		REF	SIN 2%	2%HPS
Ensayo cántabro*	% pérdida de partículas	3,8%	42,9%	44,8%

Podemos ver que en las mezclas con retirada y sustitución del 2% de betún la pérdida de partículas es mucho mayor, empeorando significativamente (la Tabla 26 recoge los p-valores) el comportamiento de la mezcla de referencia, además en este caso los resultados obtenidos son incluso superiores a los exigidos a las mezclas PA. Estadísticamente no hay diferencias entre retirar el 2% de betún y reemplazarlo por PS, por lo que los resultados son coherentes con el ensayo en el que se reemplazaba el 1%, concluyendo de nuevo que la aportación de PS no modifica esta propiedad.

Tabla 26. p valores ensayo cántabro. Mezclas REF, SIN1%, SIN2%, 1%HPS y 2%HPS.

Ensayo	P(valor)	REF	SIN 1%	1%HPS	SIN 2%
Ensayo cántabro de pérdida de partículas (UNE 12697-17)	2% HPS	0,030	0,030	0,030	0,882
	SIN 2%	0,030	0,030	0,030	-

Finalmente, en base a estos resultados, no se consideró viable llegar a reemplazar un 2% de betún sobre mezcla con esta metodología por lo que no se consideró oportuno caracterizar dinámicamente estas muestras

4.2. Mezclas tipo PA-16.

El estudio de las mezclas PA-16 siguió un proceso más o menos similar al realizado sobre las AC-16 S con dos diferencias. La primera de ellas que dentro de las PA se establecieron dos líneas paralelas de investigación ya que se estudió su comportamiento tomando dos mezclas como referencia, una de ellas con un betún modificado con polímeros (PMB) y la segunda utilizando el betún convencional 50/70 con el que se llevaron a cabo las mezclas AC-16, betún cuyo uso está menos extendido en este tipo de mezclas. La segunda diferencia fue que para este tipo de mezclas se decidió no llegar a valores del 2% de sustitución y por lo tanto sólo se presentarán valores de retirada y/o sustitución del 1% de betún por poliestireno. A continuación (Tabla 27) se presentan las dosificaciones utilizadas para las mezclas de referencia (REF). Posteriormente en la Tabla 28 vemos los resultados obtenidos con esta dosificación, tanto con el betún convencional como con el betún modificado con polímeros, utilizados como referencia.

Tabla 27. Dosificación PA 16 de Referencia.

Áridos	Betún*/ mezcla
Ofita 16#8	49,1%
Ofita 8#4	30,0%
Ofita 4#2	5,4%
Caliza 2#0	12,6%
Filler calizo	2,9%

* Betún correspondiente en cada caso (PMB o 50/70).

Tabla 28. Resultados de ensayos mecánicos sobre las mezclas PA-16 de referencia.

Ensayo	Parámetro	Resultado		
		REF 50/70	REF PMB	
Determinación de Huecos en mezcla (UNE 12697-8)	Densidad aparente (kg/cm ³)	2,118	2,162	
	% Huecos	21,4%	20,2%	
Ensayo de Sensibilidad al agua (UNE 12697-12)	Rt(Kp)	Secas	1179	1317
		Húmedas	945	1234
	% ITSr	80%	94%	
Ensayo Cántabro (UNE 12697-17)	% de pérdida de partículas	20,1%	4,9%	

4.2.1. Mezclas tipo PA-16 con sustitución del 1% de betún.

La dosificación de las mezclas con retirada o sustitución de Poliestireno quedan como vemos en las siguientes tablas (Tabla 29 y Tabla 30) y como cabe esperar son análogas para ambos tipos de betún utilizados.

Tabla 29. Dosificación de mezcla PA-16 con sustitución del 1% de betún por PS

Áridos		Betún*/ mezcla	HPS/ mezcla
Ofita 16#8	49,1%		
Ofita 8#4	30,0%		
Ofita 4#2	5,4%	3,3%	1%
Caliza 2#0	12,6%		
Filler calizo	2,9%		

* Betún correspondiente en cada caso (PMB o 50/70).

Tabla 30. Dosificación de mezcla PA-16 sin 1% de betún.

Áridos		Betún*/ mezcla
Ofita 16#8	49,1%	
Ofita 8#4	30,0%	
Ofita 4#2	5,4%	3,3%
Caliza 2#0	12,6%	
Filler calizo	2,9%	

* Betún correspondiente en cada caso (PMB o 50/70).

4.2.1.1. Caracterización mecánica de las mezclas PA-16 con betún modificado con polímeros.

En la tabla siguiente (Tabla 31), se presentan los resultados del ensayo de la mezcla PA-16 con sustitución del 1% de betún por poliestireno y al igual que en las mezclas de tipo AC, los valores correspondientes a la mera retirada del 1% de betún.

Tabla 31. Resultados de los ensayos mecánicos de las probetas PA-16 con sustitución del 1% de betún PMB por HPS

Ensayo	Parámetro	Resultado		
		REF PMB	SIN 1%	1% HPS
Determinación de Huecos en mezcla (UNE 12697-8)	Densidad aparente (kg/cm ³)	2,162	2,066	2,099
	% Huecos	20,2%	22,5%	25,0%
Ensayo de Sensibilidad al agua (UNE 12697-12)	Rt(Kp)	Secas	1317	1080
		Húmedas	1234	841
	% ITSr	94%	78%	80%
Ensayo Cántabro (UNE 12697-17)	% de pérdida de partículas	4,9%	8,1%	6,4%

A pesar del alto porcentaje de huecos de las mezclas PA, como en el caso de las mezclas AC, la adición de poliestireno hace que la densidad de las muestras baje de forma significativa y consecuentemente el porcentaje de huecos sea más elevado. En cuanto al ensayo de sensibilidad al agua, los resultados parecen indicar que se comportan de manera diferente las probetas ensayadas por vía seca (en las que como vemos en la Tabla 30 no se encuentran diferencias significativas) y en las probetas por vía húmeda donde observamos que sí afecta la retirada de betún y adición de PS. Comparando la resistencia conservada de la mezcla de referencia con la las probetas que llevan un 1% de PS podríamos caer en el error de creer que la mezcla empeora demasiado. No obstante, fijándonos en los resultados de resistencia a tracción de cada grupo de probetas vemos como, en el caso de las secas, el valor apenas varía mientras que sí que lo hace en el caso de las húmedas, aunque el valor de resistencia de 1070 Kp sigue considerándose aceptable para este tipo de probetas. Dada la diferencia significativa entre la mezcla SIN 1% de betún y la mezcla con 1% de PS, parece que el polímero, en este caso, sí está aportando un factor resistente, pero que no llega a suplir la falta de resistencia provocada por la reducción del betún. Por último, en el ensayo cántabro de pérdida de partículas, podemos ver como la sustitución de betún por PS no resta cohesión a la mezcla. Todos estos comentarios se ven respaldados en la Tabla 32 presentada a continuación.

Tabla 32. p valores de las mezclas PA-16 con betún modificado con polímeros PMB.

Ensayo	P(valor)	PMB	
		REF	SIN 1%
Determinación de Huecos en mezcla UNE 12697-12	1% HPS	0,000	0,034
	SIN 1%	0,001	-
Ensayo de Sensibilidad al agua UNE 12697-12, probetas por vía seca	1% HPS	0,668	0,126
	SIN 1%	0,058	-
Ensayo de Sensibilidad al agua UNE 12697-12, probetas por vía húmeda	1% HPS	0,003	0,003
	SIN 1%	0,041	-
Ensayo cántabro de pérdida de partículas UNE 12697-17	1% HPS	0,117	0,244
	SIN 1%	0,031	-

4.2.1.2. Caracterización dinámica de la mezcla PA-16 con betún modificado con polímeros.

Dentro del estudio de las mezclas PA, aunque no se finalizó su caracterización dinámica, sí se ensayó su compactabilidad mediante la máquina giratoria. Resumida en el gráfico como puede verse en el Gráfico 4.

En este caso, al igual que en las mezclas AC, el resultado indica que para alcanzar una misma densidad, la energía requerida es directamente proporcional a la cantidad de poliestireno añadida, es decir, que a mayor porcentaje de poliestireno mayor energía de compactación necesitará. Sin embargo, para este tipo de mezclas debido a la falta de finos las diferencias entre las densidades alcanzadas no son tan notables. Este ensayo, además, resulta coherente con el incremento de huecos que han experimentado las mezclas al incorporar el poliestireno. Finalmente se calculó el valor p estadístico (Tabla 33), el cual concluye que no hay diferencias significativas entre las mezclas.

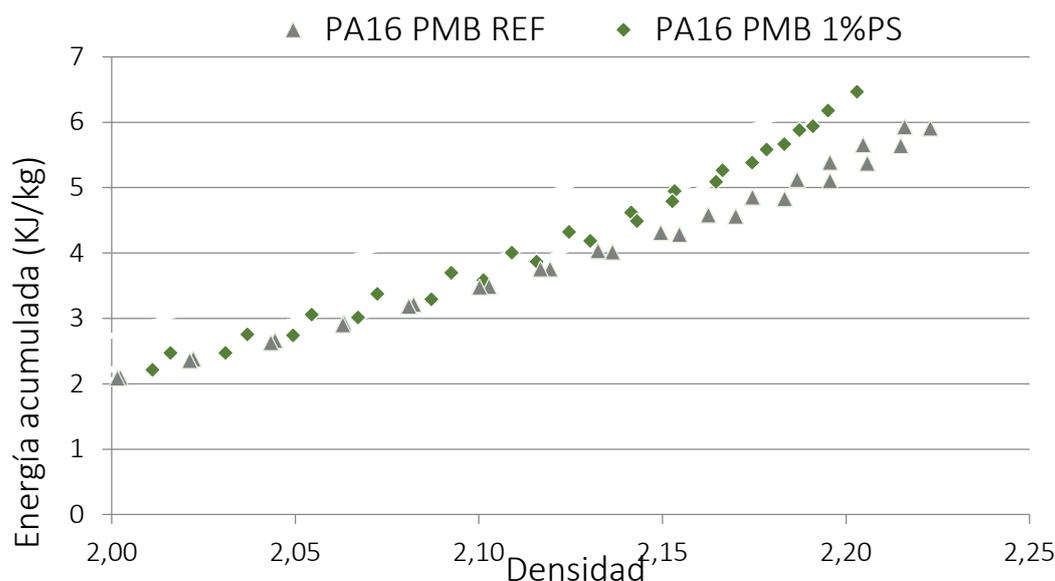


Gráfico 4. Resultados del ensayo de compactabilidad de las mezclas PA-16 con betún PMB.

Tabla 33. Valoración estadística del ensayo de compactabilidad PA-16 REF con PMB.

Ensayo	P(valor)	REF
Ensayo de compactabilidad de las mezclas (EN 12697).	1% HPS	0,877

4.2.1.3. Caracterización mecánica de las mezclas PA-16 con betún convencional.

Como última mezcla estudiada dentro de este trabajo, se presenta en la Tabla 34 los resultados obtenidos tras el ensayo de la mezcla PA-16 con betún convencional. Cuya dosificación ya se presentó tabulada en el epígrafe 4.2.1. Vemos aquí que en cuanto a densidad se mantiene la misma relación que en mezclas anteriores.

Por otro lado en el ensayo de sensibilidad al agua, no se ha considerado el resultado puesto que no se han obtenido valores coherentes entre la mezcla de referencia y la mezcla SIN1%, que a pesar de tener un 1% menos de betún, obtiene valores más altos de resistencia. Sin embargo, se aprecia una aparente menor vulnerabilidad frente a la acción del agua dado el alto porcentaje de la resistencia conservada.

Se observa tanto en las mezclas con retirada del betún como en las mezclas donde se sustituye betún por poliestireno. No obstante, estas diferencias no son tales desde el punto de vista estadístico (Tabla 35) donde no se detectan diferencias significativas. En el ensayo cántabro de pérdida de partículas tampoco se encuentran diferencias significativas entre ninguna de las mezcla, a pesar de que el porcentaje de las probetas 1%HPS sea notablemente superior al de referencia.

Tabla 34. Resultados de los ensayos mecánicos de las probetas PA-16 con sustitución de 1% de betún 50/70 por HPS

Ensayo	Parámetro	Resultado			
		REF 50/70	SIN1 %	1% HPS	
Determinación de Huecos en mezcla (UNE 12697-8)	Densidad aparente (kg/cm ³)	2,146	2,123	2,098	
	% Huecos	20,1%	22,7%	23,6%	
Ensayo de Sensibilidad al agua (UNE 12697-12)	Rt(Kp)	Secas	1179	1154	1089
		Húmedas	945	1001	1009
	% ITSR	80%	87%	93%	
Ensayo Cántabro (UNE 12697-17)	% de pérdida de partículas	19,5%	22,4%	28,8%	

Tabla 35. p valores de las mezclas PA-16 con betún convencional 50/70.

Ensayo	P(valor)	50/70	
		REF	SIN 1%
Determinación de Huecos en mezcla UNE 12697-12	1% HPS	0,725	0,390
	SIN 1%	0,640	-
Ensayo de Sensibilidad al agua UNE 12697-12, probetas por vía seca	1% HPS	0,424	0,412
	SIN 1%	0,280	-
Ensayo de Sensibilidad al agua UNE 12697-12, probetas por vía húmeda	1% HPS	0,096	0,870
	SIN 1%	0,395	-
Ensayo cántabro de pérdida de partículas UNE 12697-17	1% HPS	0,133	0,147
	SIN 1%	0,736	-

4.2.1.2. Caracterización dinámica de las mezclas PA-16 con betún convencional.

Por último se presentan en el Gráfico 5 los resultados obtenidos del ensayo mediante máquina giratoria. En este caso vemos que la curva de la mezcla modificada se sitúa por encima de la de referencia pero no hay grandes diferencias en cuanto a la densidad que se alcanza en los 512 ciclos a los que se limita el ensayo. Además estadísticamente se comprueba la similitud de ambas mezclas en cuanto a su trabajabilidad se refiere (Tabla 36)

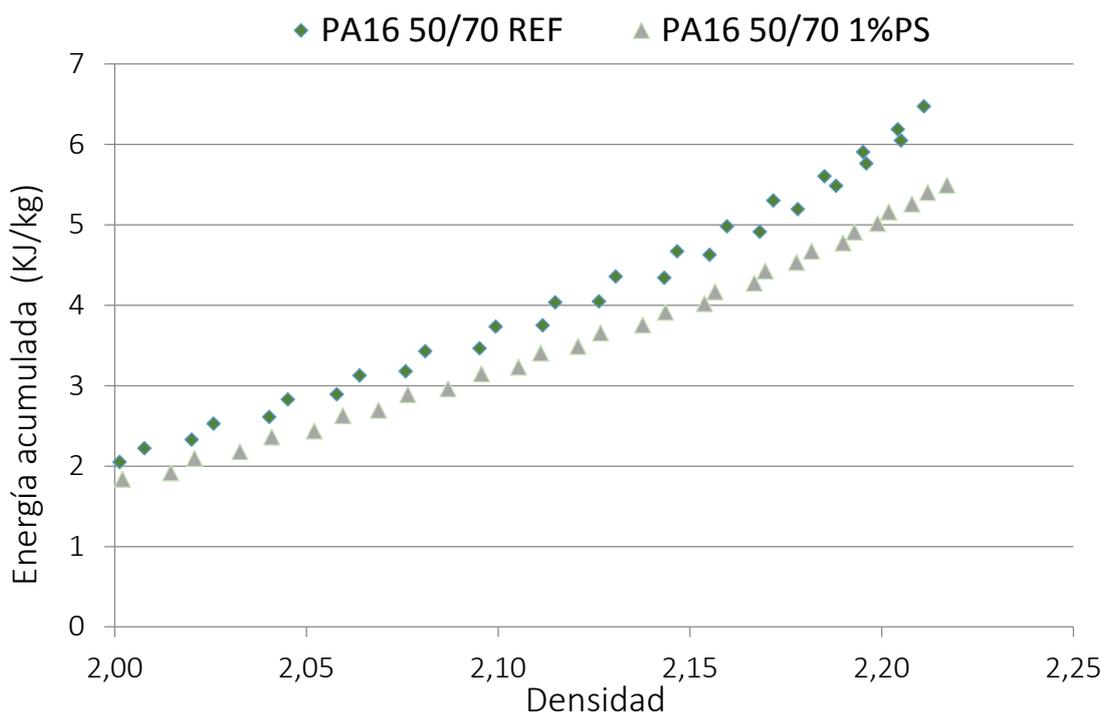


Gráfico 5. Ensayo de compactabilidad de las muestra PA-16 con 50/70

Tabla 36. Valoración estadística del ensayo de compactabilidad PA-16 REF con 50/70.

Ensayo	P(valor)	REF
Ensayo de compactabilidad de las mezclas (EN 12697).	1% HPS	0,381

5 Conclusiones.

5. Conclusiones generales.

En base a los objetivos planteados al inicio del trabajo, vemos como el primero de los puntos, relacionado con la reducción del betún utilizado en las mezclas bituminosas, se ve satisfecho. Aunque habría que ajustar el porcentaje óptimo de sustitución, a partir del cual el comportamiento de la mezcla no sea afectado de manera negativa, se observa, especialmente en términos de cohesión, que la sustitución del 2% de betún sobre mezcla no sería viable. No obstante, las mezclas cuya sustitución alcanza el 1% de betún sobre mezcla sí son alentadoras de cara a continuar siendo ensayadas (ensayos de escalado, transporte, etc.), con el fin de ser puestas en obra, dado que en algunos casos se mejoran las características de las mezclas convencionales. En base a lo anterior, se concluye también un cumplimiento del segundo objetivo, dado que el intercambio de betún por PS correspondiente a nuestras dosificaciones contribuye a la reutilización de residuos plásticos.

Por otro lado, la rentabilidad económica de la investigación asociada a este trabajo queda en entredicho por el elevado coste que tienen hoy en día los polímeros reciclados, que tienen precios similares a los de los betunes que se pretende sustituir (los PS utilizados en este proyecto rondan los 500€/t y recordemos que el precio de los betunes estaba entre los 450 y los 600€/t en función de sus características). Sin embargo, su rentabilidad social es muy elevada, especialmente desde el punto de vista ambiental.

Con el fin de cuantificar esta mejora, se ha calculado la cantidad de CO₂ y otros gases nocivos para la atmósfera que evitaríamos emitir con la reducción estudiada del 1% del betún sobre mezcla (23,9% del betún). Con dicha reducción conseguiríamos, sólo en un kilómetro de carretera, evitar la utilización de 43,7 toneladas de betún. Esto resultaría en una reducción de la emisión de 2,13 toneladas de gases nocivos, todas ellas consecuencia de la extracción y procesado del betún, ya que la energía empleada en la preparación del PS reciclado se considera despreciable frente a aquella. El método de fabricación de las mezclas tendría un coste similar en ambos casos, debido a la incorporación por vía seca de las partículas plásticas, para lo cual no se requiere mayor inversión en maquinaria ni modificar el proceso constructivo de forma significativa.

Además, si esta y otras tecnologías de reciclaje se pusieran en marcha, el aumento de la demanda de estos plásticos reciclados provocaría la generalización y optimización de sus procesos de obtención y, como consecuencia, una bajada de los precios, convirtiéndolos entonces en una opción mucho más beneficiosa económicamente.

En relación al estudio estadístico, la utilización de la estadística inferencial ha nutrido este trabajo de un mejor análisis de los datos. Los resultados han permitido valorar mejor las diferencias o similitudes entre las diferentes mezclas y, si bien es verdad que en alguno de los casos hubiese sido necesario un mayor número de probetas para realizar un análisis más exhaustivo, los resultados han sido en general satisfactorios.

5.1. Conclusiones particulares.

En el caso del hormigón bituminoso (**AC-16 S**), se observa que las mezclas cuya sustitución es del 1% de betún por poliestireno cumplen con el resto de restricciones normativas recogidas en el PG-3, aun obteniendo un mayor porcentaje de huecos. En este sentido, merece una mención especial la mejora producida en términos de resistencia a las deformaciones plásticas evaluada mediante el ensayo de rodadura. En este ensayo las mezclas experimentales reducen a la mitad las deformaciones registradas, a pesar de tener un volumen de huecos mayor, debido a la rigidez de los polímeros.

En cuanto a los ensayos dinámicos a los que fueron sometidas las mezclas, se produce un incremento notable del esfuerzo de compactación necesario para alcanzar la densidad obtenida según el ensayo de

compactabilidad de las muestras en máquina giratoria. No obstante, se alcanzan unos valores suficientes de resistencia para su puesta en obra a pesar de su menor densidad. Por tanto, aunque cabría estudiarlo con más detalle, podría no ser necesario alcanzar la densidad de referencia, por lo que no se incrementarían los esfuerzos ni los costes de compactado de las mezclas. En los ensayos de módulo dinámico y fatiga, el resultado, sin ser sobresaliente, encaja perfectamente con el de cualquier mezcla convencional AC, sin apreciarse ninguna diferencia.

Se detecta, dentro de las mezclas tipo hormigón bituminoso (AC), que al sustituir parte del betún aglutinante de la mezcla es necesario evaluar la cohesión del conjunto con el sustitutivo considerado, plásticos en este caso. Por tanto, han de realizarse ensayos extra respecto a los que se establecen en el PG-3 para este tipo de mezcla. Hemos suplido esta carencia dentro del presente trabajo realizando el ensayo cántabro de partículas, que figura en norma para mezclas drenantes.

Por su parte, en el caso de las mezclas drenantes (**PA-16**) vemos que, dentro de los ensayos de caracterización mecánica, igual que en el caso de las mezclas AC, se obtienen resultados dentro de norma para la sustitución del 1% de betún por poliestireno, incluyendo también en este caso el ensayo de huecos. No obstante, se ha observado un comportamiento poco uniforme en los resultados de sensibilidad al agua en las mezclas con betún 50/70. Problema que, debido a contratiempos imprevistos con los equipos, no ha sido estudiado en detalle aún.

De entre los ensayos dinámicos realizados sobre las muestras AC, las mezclas porosas sólo fueron expuestas al ensayo en máquina giratoria, en el que se observó que el incremento del esfuerzo de compactación producido sobre las AC no era tal en este caso. Esto es debido a que al tratarse de mezclas de granulometría más abierta, con mayor porcentaje de huecos y menor cantidad de finos, requieren, en general, un menor esfuerzo de compactación.

5.2. Futuras líneas de investigación.

En base a todas las actividades y los resultados analizados durante la ejecución de este trabajo fin de máster, se presentan varios frentes abiertos de los que podrían derivarse estudios complementarios, como son:

- Ajuste y diseño de un método pormenorizado para el análisis del porcentaje de pérdida de partículas para estos hormigones bituminosos (mezclas AC) singulares, comparable al ensayo cántabro existente en el caso de las mezclas drenantes tipo PA.
- Cálculo del porcentaje óptimo de sustitución de betún por poliestireno.
- Análisis de la posibilidad de añadir poliestireno con una granulometría menor, estudiando la influencia del tamaño del PS en la sustitución del betún.
- Utilización de otras muestras poliméricas de tipo poliestireno procedentes directamente de los residuos sólidos urbanos, con un menor coste económico.
- Análisis del diseño de nuevas mezclas cuando no es equivalente el porcentaje de betún eliminado y el de poliestireno añadido
- Estudio de las mezclas AC diseñadas con PS incrementando la energía de compactación para analizar el comportamiento de las mezclas con una proporción de huecos comparable a las convencionales.
- Análisis del comportamiento dinámico de las mezclas PA cuando incorporan PS para reemplazar betún.
- Continuación del ensayo de este tipo de polímeros enfocando y dosificando las mezclas no hacia la pavimentación de carreteras orientadas al tráfico rodado, sino hacia construcciones con menores solicitaciones: adoquinado de calles, cubiertas o pavimentación de obras menores como carriles bici.

6 Referencias bibliográficas

6. Referencias.

1. Dirección General de Carreteras. Pliego de prescripciones técnicas particulares para obras de carretera y puentes (PG-3). . 1976-2015:Ministerio de Fomento, Gobierno de España.
2. European asphalt Pavement Assotiation, EAPA. EAPA, European asphalt pavement association. <http://www.eapa.org/>. Updated 2015.
3. Asotiation of Plastics Manufacturers. Plastics europe, asotiation of plastics manufacturers. <http://www.plasticseurope.es/>. Updated 2016.
4. Dibyendu S, Bhanu N, Sarfaraz, A., Kandpal,L., Mathur G. Density measurements of plastics - A simple standard test method. [file:///C:/Users/Marta/Downloads/density%20measurement%20of%20plastics%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/Marta/Downloads/density%20measurement%20of%20plastics%20(3).pdf). Sept 2003;10:561-562,563.
5. Desai R, Vora N. Use of plastic in bituminous concrete mixes. *PARIPEX, Indian Journal of Reserarch*. 2013.
6. Reyes Lizcano F, Madrid Ahumada M, Salas Callejas S. *Infraestructura Vial*. 2007;9:17.
7. Casey D, McNally C, Gibney A, Gilchrist MD. Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt. *Resour Conserv Recycling*. 2008;52(10):1167-1174.
8. Punith VS, Veeraragavan A. Behavior of asphalt concrete mixtures with reclaimed polyethylene as additive. *J Mater Civ Eng*. 2007;19(6):500-507.
9. Attaelmanan M, Feng CP, Al A. Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier. *Constr Build Mater*. 2011;25(5):2764-2770.
10. Panda M, Mazumdar M. Utilization of reclaimed polyethylene in bituminous paving mixes

. *American Society of Civil Engineers*. 2002.
11. Ahmadinia E, Zargar M, Karim MR, Abdelaziz M, Shafigh P. Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt. *Mater Des*. 2011;32(10):4844-4849.

12. Lastra-González P, Calzada-Pérez MA, Castro-Fresno D, Vega-Zamanillo Á, Indacochea-Vega I. Comparative analysis of the performance of asphalt concretes modified by dry way with polymeric waste. *Constr Build Mater.* 2016;112:1133-1140.
13. Shankar AUR, Koushik K, Sarang G. **Performance studies on bituminous concrete mixes using waste plastics.** *Indian Roads Congress.* 2013;6:1-11.
14. Mauskar J. Performance evaluation of polymer coated bitumen built roads. *Programme Objective Series, Probes/122/2008-2009, Ministry of Environment and Forest.* 2008.
15. Hammond G, Jones C. Inventory of carbon & energy (ICE) version 2.0. . 2011;7.
16. del Río Prat, M^a Eugenia. *Estudio de los procesos de compactación y post-compactación de mezclas bituminosas empleando nuevos índices energéticos: Aplicación a mezclas de alto módulo que contienen cantos rodados.* GITECO, Universidad de Cantabri; 2011.

